

## CAPITOLO 6 - CHAPTER 6

# SCHEMA STRUTTURALE DELL'AREA (\*) STRUCTURAL SETTING OF THE STUDY AREA (\*)

GIANFRANCO GASPERI

### 6.1 L'evoluzione della pianura e l'orogenesi delle catene alpina e appenninica

L'origine della Pianura Padana è relativamente recente; infatti sino a meno di 1 milione di anni fa l'area era interamente occupata dal mare costituendo l'estrema propaggine nord-occidentale del Mare Adriatico: successivamente il mare si ritira gradualmente dai suoi margini alpini ed appenninici cedendo da Ovest verso Est fino a lasciare scoperto con alterne vicende anche l'Adriatico settentrionale (fig. 15.3), per poi raggiungere, nella prima metà dell'Olocene, le posizioni attuali. In superficie affiorano per lo più depositi continentali recenti o recentissimi per cui le strutture profonde sono note solo attraverso le ricerche di idrocarburi (Agip Mineraria, 1959; Pieri & Groppi, 1981; Mattavelli & alii, 1983; Dondi, 1985; Cassano & alii, 1986; Dondi & D'Andrea, 1987) e quelle più superficiali dalle ricerche idriche (Gr. St. Falde Acquifere Profonde, 1979; Regione Emilia-Romagna, 1998).

Dal punto di vista geologico, la Pianura Padana è un bacino sedimentario terziario posto sulla terminazione settentrionale del blocco adriatico-pugliese, compreso tra il fronte degli opposti accavallamenti, le falde sud-vergenti delle «Alpi Meridionali» e le strutture appenniniche nord-vergenti, e soggetto al duplice fenomeno di compressione delle opposte catene (fig. 6.2).

Il limite orografico delle catene, che corrisponde al margine della Pianura Padana, non coincide con il limite strutturale delle Alpi e dell'Appennino settentrionale in quanto queste si estendono ampiamente nel sottosuolo della pianura dove vengono a scontrarsi (*Carta Geomorfologica*, cfr. sez. B-B').

Le Alpi sono suddivise in due sistemi tettonici separati dalla Linea Insubrica: uno, a vergenza europea, è rappre-

### 6.1 Evolution of the Po Plain and orogenesis of the alpine and apennine chains

*The Po Plain is of relatively recent origin. Until less than 1 Ma ago, the area was entirely covered by the Adriatic sea. The sea then gradually retreated eastwards from its Alpine and Apennine margins, leaving the North Adriatic area (fig. 15.3) alternatively submerged and emerged, and reached its present-day position during the first half of the Holocene. Surface sediments are mainly recent or very recent continental deposits; therefore deep structures are only known through research carried out when drilling for oil (Agip Mineraria, 1959; Pieri & Groppi, 1981; Mattavelli & alii, 1983; Dondi, 1985; Cassano & alii, 1986; Dondi & D'Andrea, 1987); shallower investigations aimed at studying water resources (Gr. St. Falde Acquifere Profonde, 1979; Regione Emilia-Romagna, 1998).*

*From the geological viewpoint, the Po Plain is a Tertiary sedimentary basin lying on the northern end-member of the Adriatic-Apulia block, between the fronts of opposing overthrusts, i.e., the south-verging thrusts of the «Southern Alps» and the north-verging Apennine structures, and subject to the double phenomenon of compression by the opposite chains (fig. 6.2).*

*The orographic boundary of the chains, corresponding to the margin of the Po Plain, do not coincide with the structural boundary of the Alps and Northern Apennines, since they are extensively found in the subsurface of the plain, where they collide (Geomorphological Map, cfr. section B-B').*

*The Alps are subdivided into two tectonic systems separated by the Insubric Line. One, with European vergence, is the typical fold and thrust belt, north-verging towards Euro-*

(\*) Si vedano la carta strutturale e le sezioni geologiche.

(\*) See *Structural Map and Geological Cross Sections*.

sentato dal classico edificio a falde accavallate verso Nord, verso l'Europa, e l'altro a vergenza opposta, africana, forma le «Alpi Meridionali» o Sudalpino.

Il sistema nord-vergente è formato da diversi elementi strutturali principali che rappresentano i resti di antichi bacini, appartenenti a domini paleogeografici caratterizzati da differenti storie cinematiche (cfr. Carta Strutturale, nel Foglio 3 della *Carta Geomorfologica*). Abbiamo così che durante il Mesozoico il Dominio Elvetico si sviluppa sulla zolla continentale nord-europea, il Dominio Pennidico, sul margine della stessa zolla e in cui si aprono due profondi bacini, il vallese e il piemontese, e il Dominio Austroalpino che appartiene invece al blocco continentale africano, al Gondwana.

Di questi grandi domini alpini ricordiamo qui il bacino mesozoico piemontese, appartenente al Dominio Pennidico, perché è l'unico tra quelli a vergenza europea che viene a contatto con la pianura nell'estremo limite occidentale di questa. Esso era caratterizzato da crosta di tipo oceanico e si prolungava verso Sud collegandosi ad un analogo bacino mesozoico, quello ligure, appartenente all'Appennino: entrambi derivano dall'apertura giurassica della Tetide.

L'orogenesi alpina si sviluppa in diverse fasi dal Cretaceo all'Attuale: la fase eoalpina dal Cretaceo al Paleocene, la fase mesoalpina dall'Eocene all'Oligocene e la fase neoalpina dal Miocene all'Attuale.

Le «Alpi Meridionali», affacciate direttamente sulla Pianura Padana e poste a Sud della Linea Insubrica, derivano interamente dall'antico margine continentale africano. Esse si evolvono tettonicamente secondo due sistemi di fasce strutturali ad andamento arcuato: un sistema occidentale, lombardo, ed uno veneto posto ad Est, che si accrescono in fasi successive con polarità rispettivamente verso Sud e verso Sud-Est (Castellarin & alii, 1992). I due settori sono separati da un cuneo dell'avampaese, che affiora al margine della catena e di cui fanno parte i Monti Lessini, Berici ed Euganei, limitato da sistemi di faglie rappresentate verso Ovest dal sistema giudicariense e verso Est dalla linea Schio-Vicenza. Questo blocco separa la Pianura Padana s.s. da quella veneta.

Durante la fase cretacea superiore, o eoalpina, si sviluppa per primo l'arco occidentale più interno (quello posto presso le Linee Insubrica); dall'Oligocene al Tortoniano si originano le strutture arcuate occidentali frontali e quelle orientali interne; l'arco frontale orientale si sviluppa successivamente tra il Messiniano e il Plio-Pleistocene (figg. 6.1 e 6.2).

La catena appenninica settentrionale si è venuta formando dal Cretaceo superiore al Plio-Pleistocene ad opera della tettonica di accrezione da domini paleogeografici meso-cenozoici da cui sono derivati i diversi elementi tettonici distinti nella citata Carta Strutturale. Le Unità Liguri corrispondono ai residui dell'oceano tetideo, le Subliguri si sono deposte su crosta assottigliata africana adiacente alla zona oceanica. Falda Toscana, Unità Metamorfica Toscana, Unità Modino-Cervarola e Dominio Umbro-Marchigiano derivano da domini di pertinenza africana (Boccaletti & alii, 1987; Vai & Castellarin, 1992).

*pa; the other, verging in the opposite direction towards Africa, forms the «Southern Alps» or South Alpine Domain («Sudalpino»).*

*The north-verging orogenic belt is made up of several main structural elements, representing the remains of ancient basins belonging to various paleogeographic domains with different kinematic histories (cfr. Structural Map, in Sheet 3 of Geomorphological Map). Thus, during the Mesozoic, the Helvetic Domain developed on the North European continental block, and the Penninic Domain on the margin of the same block in which two deep basins open: the Valais basin and the Piemonte basin. On the other hand, the Austroalpine Domain belongs to the African continental block, i.e. Gondwana.*

*Of these large Alpine domains, the Mesozoic Piemonte basin, belonging to the Penninic Domain, is here described, since it is the only one of the Europa-verging domains which comes into contact with the extreme western boundary of the Po Plain. It was characterized by oceanic-type crust and extended southwards, meeting a similar Mesozoic basin, the Ligurian, belonging to the Apennines. Both originated from the Jurassic opening of the Tethys.*

*Alpine orogenesis developed in various phases from the Cretaceous to the Present: the Cretaceous-Paleocene eo-Alpine, Eocene-Oligocene meso-Alpine, and Miocene-Present neo-Alpine phases.*

*The «Southern Alps», giving directly on the Po Plain South of the Insubric Line, originated entirely from the ancient African continental margin. They are evolving tectonically along two systems of arcuate fold and thrust belts: the western (Lombard) and eastern (Veneto) systems, which accreted in later phases with polarity respectively to the South and South-East (Castellarin & alii, 1992). The two sectors are separated by a wedge-shaped foreland, which outcrops at the margin of the chain containing the Lessini, Berici and Euganei Hills, bounded by fault systems represented to the West by the Giudicarie system and to the East by the Schio-Vicenza Fault. This wedge separates the Po Plain s.s. from the Veneto plain.*

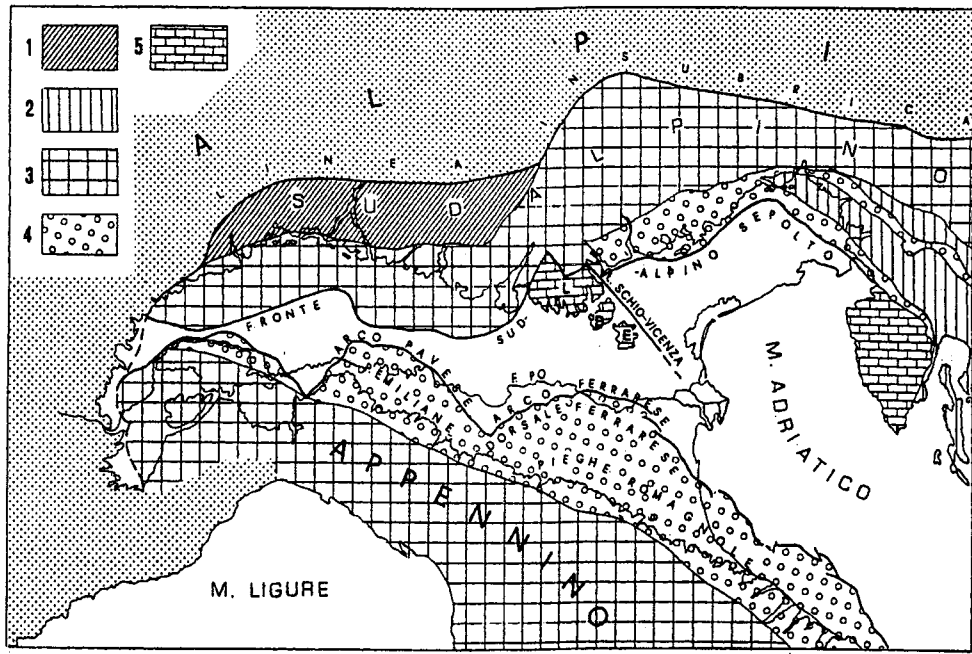
*During the early Cretaceous or eo-Alpine phase, the first to develop was the inner western arc (near the Insubric Line). The external, western, arched structures and the inner eastern ones developed from the Oligocene to the Tortonian; the external eastern arc later developed between the Messinian and Plio-Pleistocene (figs. 6.1 and 6.2).*

*The northern Apennine chain upbuilding took place between the early Cretaceous and the Plio-Pleistocene, due to accreting tectonics from the Meso-Cenozoic paleogeographic domains from which the various tectonic elements shown in the Structural Map attached to Sheet 3 of the Geomorphological Map are derived. The Ligurian units correspond to the remains of the Tethys ocean, and the sub-Ligurian units were deposited on the thinning African crust adjacent to the oceanic zone. The Tuscan Nappe, Tuscan Metamorphic Unit, Modino-Cervarola Unit and Umbro-Marches Domain all derive from originally African domains (Boccaletti & alii, 1987; Vai & Castellarin, 1992).*

*The Apennine orogenesis, which is closely linked to the extensional evolution of the Western Mediterranean,*

FIG. 6.1 - Schema strutturale della Pianura Padana e delle adiacenti catene (da Castellarin & alii, 1992, modif.). Legenda: età della strutturazione tettonica: 1 - eoalpina; 2 - mesoalpina; 3 - miocenica; 4 - messiniana e plio-pleistocenica; 5 - avampaese; L - M. Lessini; E - M. Euganei; B - M. Berici.

FIG. 6.1 - Structural diagram of Po Plain and adjacent chains (after Castellarin & alii, 1992, modified). Key: age of tectonic structures: 1 - eo-Alpine; 2 - meso-Alpine; 3 - Miocene; 4 - Messinian and Plio-Pleistocene; 5 - foreland; L - Lessini Hills; E - Euganei Hills; B - Berici Hills.



La strutturazione dell'Appennino, che è strettamente connessa all'evoluzione estensionale del Mediterraneo occidentale, ha portato le unità Liguri, a cui si sovrappongono stratigraficamente le Epiliguri deposte dopo la prima fase tettonica, a costituire una estesa coltre alloctona che a partire dal Miocene inferiore si accavalla al di sopra degli altri domini sino al margine padano dell'Appennino (Gasperi & alii, 1984; Castellarin & alii, 1985). Il fronte della catena, strutturato in una serie di archi, si sviluppa nel Pliocene e nel Pleistocene, contemporaneamente all'arco alpino orientale.

L'area dell'attuale Pianura Padana durante il Mesozoico costituisce l'avampaese comune alle due catene e dall'Oligocene in poi evolve in avanfossa, prima legata al Sudalpino e poi, dal Messiniano, alla catena appenninica. L'avanzata delle opposte falde, sviluppatesi in due distinte tappe, hanno indotto sprofondamenti flessurali nell'antistante avampaese padano e il formarsi di successivi bacini di avanfossa confinati al margine delle due catene in surrezione (fig. 6.1). Le due avanfosse a polarità opposta si accrescono quindi successivamente sullo stesso avampaese e vengono in parte a sovrapporsi (Boccaletti & alii, 1990).

Le orogenesi in atto coinvolgono, tra l'Oligocene e il Miocene, i settori adiacenti alle Alpi generando strutture sud-vergenti e, a partire dal Pliocene, coinvolgono i settori posti a fronte dell'Appennino dando luogo a strutture con vergenza a Nord e a Nord-Est (Carta Geomorfologica, cfr. sez. A-A' e B-B').

I sedimenti triassici-miocenici presenti nel substrato della pianura, correlabili con quelli affioranti nel Sudalpino, sono come questi caratterizzati dalle facies tipiche del margine passivo africano con ampio sviluppo di piattaforma

meant that the Ligurian Units, stratigraphically overlain by the epi-Ligurian Units which were deposited after the first tectonic phase, became an extensive allochthonous nappe. From the Lower Miocene onwards, this nappe overthrust the other domains as far as the Po Plain margin of the Apennine (Gasperi & alii, 1984; Castellarin & alii, 1985). The frontal thrust of the chain, built up in a series of arcs, developed during the Pliocene and Pleistocene, at the same time as the Eastern Alpine arc.

During the Cretaceous-Eocene, the area of the present-day Po Plain was the same foreland common to the two chains and, from the Oligocene onwards, evolved into a foredeep, first linked to the Sudalpino and then, from the Messinian, to the Apennine chain. The advance of the nappes from the opposite chains, in two separate steps, caused downwarping in the facing foreland and the formation of later foredeep basins confined to the margins of the two rising chains (fig. 6.1). The two opposing foredeeps then grew on the same foreland, partly overlying each other (Boccaletti & alii, 1990).

Since the Oligocene up to the Miocene, these orogenesis phases involved adjacent sectors of the Alps, generating south-verging structures and, from the Pliocene, they also involved the sectors facing the Apennines, giving rise to North- and North-East-verging structures (Geomorphological Map, cfr. sections A-A' and B-B').

The Triassic-Miocene sediments in the plain subsurface, linked to those outcropping in the Sudalpino, are similar to those of the typical facies of the passive African margin, with extensive development of carbonatic platforms from the Triassic to the Lower Jurassic, followed from the Jurassic to the Eocene by generalized sinking with sedimentation

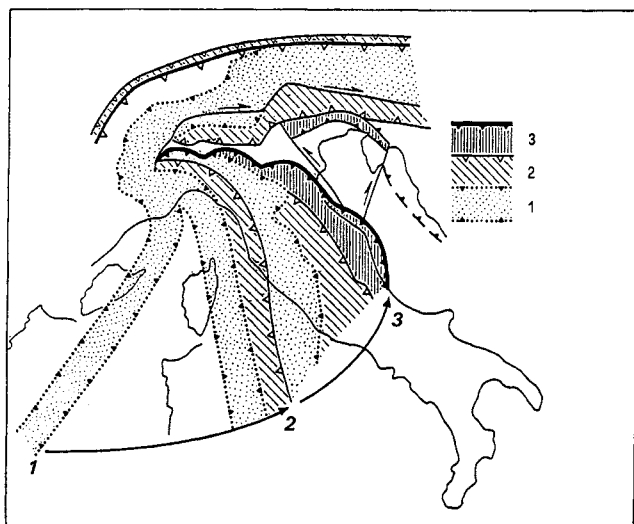


FIG. 6.2 - Tappe dell'accresione tettonica delle Alpi Calcaree Meridionali e dell'Appennino dall'Oligocene al Pleistocene (da Castellarin & alii, 1992, modif.): 1 - presunto Fronte delle catene nel pre-Oligocene; 2 - Fronte delle catene nel Miocene medio; 3 - idem, nel Plio-Pleistocene.

FIG. 6.2 - Stages of tectonic accretion in Southern Limestone Alps and Apennines, from Oligocene to Pleistocene (after Castellarin & alii, 1992, modif.): 1 - presumed pre-Oligocene Front of the chains; 2 - Middle Miocene emplacement; 3 - Plio-Pleistocene emplacement.

me carbonatiche dal Trias al Giurassico inferiore seguite, nel Giurassico, da generale sprofondamento con sedimentazione sino all'Eocene di sequenze bacinali con marne, calcari pelagici, selci e sedimenti torbiditici di provenienza settentrionale; permane solo sino alla fine del Cretaceo inferiore un'isolata piattaforma a Rudiste, quella di Bagnolo, riconosciuta nel sottosuolo a Nord di Reggio Emilia ad una profondità di oltre 4.500 m (Bosellini & alii, 1981).

A partire dall'Oligocene l'area della Pianura Padana, come si è accennato, viene parzialmente coinvolta nell'orogenesi delle adiacenti catene con conseguente cambiamento del quadro geodinamico: da margine subsidente di tipo passivo passa a margine continentale attivo con l'individuarsi di due successivi bacini molassici sinorogenici, uno, più antico, legato alle Alpi e l'altro pliocenico-quadernario legato all'orogenesi appenninica. L'area padana da questo momento è caratterizzata da una subsidenza molto accentuata e da un apporto detritico imponente e l'attiva convergenza obliqua delle zolle europea e apulo-africana dà luogo allo svilupparsi di diversi cicli sedimentari separati da discontinuità di estensione regionale (Cremonini & Ricci Lucchi, 1982).

## 6.2 La tettonogenesi post-Eocenica

Sul lato alpino della pianura, in corrispondenza del margine lombardo, cioè nel settore della pianura posto ad Ovest del Lago di Garda, si sviluppa dopo l'Eocene una potente sedimentazione clastica alimentata dalla catena sudalpina stessa condizionata da sistemi di *thrust* migranti progressivamente verso Sud (Gelati & alii, 1988, 1992). Nell'Oligocene superiore si ha la deposizione della «Gonfolite lombarda» costituita da potenti risedimenti conglomeratici ed arenacei alternati a peliti, organizzati in sistemi deposizionali di conoide sottomarina,

of basinal sequences with marls, pelagic limestones, cherts and flysches fed from the North. At the end of the Lower Cretaceous, only the isolated platform, with Rudistids, of Bagnolo remained identified in the subsoil North of Reggio Emilia at a depth of more than 4,500 m (Bosellini & alii, 1981).

As already mentioned, starting from the Oligocene the Po Plain area was partially involved in the orogenesis of the adjacent chains, with consequent changes in the geodynamic picture: from passive subsiding to active continental margin, with the development of two successive synorogenic molasse basins, of which the older belonged to the Alps and the Pliocene-Quaternary one to the Apennines. From this stage onwards, the Po Plain area was characterized by intense subsidence and very conspicuous clastic sedimentation, whereas the active oblique convergence of the European and Apulo-African blocks gave rise to several sedimentary cycles separated by discontinuities (Cremonini & Ricci Lucchi, 1982).

## 6.2 Post-Eocene tectonics

After the Eocene, on the Alpine side of the plain near the Lombard margin, i.e., West of Lake Garda, thick clastic sedimentation developed, fed by the Sudalpino chain itself and influenced by thrust systems migrating progressively towards the South (Gelati & alii, 1988, 1992). In the Upper Oligocene the deposition of the «Lombard Gonfolite» took place, which is composed of thick conglomeratic and arenaceous sediments alternating with pelite, organized in submarine fan depositional systems, passing southwards to external-platform or scarp arenaceous turbidite.

Heteropically to the Gonfolite (now outcropping in marginal reliefs between the rivers Adda and Ticino), the pelagite of the Marne di Gallare Group was deposited. Star-

passanti verso Sud a torbiditi arenacee di piattaforma esterna o di scarpata.

In eteropia rispetto alla Gonfolite (che ora affiora in rilievi marginali tra il F. Adda e il F. Ticino) si depositano le pelagiti del Gruppo delle Marne di Gallare che a partire dal Langhiano sono a loro volta eteropiche verso Sud e Sud-Est alle torbiditi della Formazione marnoso-arenacea, presente nel sottosuolo padano meridionale e ampiamente affiorante nell'Appennino romagnolo. Nell'attuale fascia assiale della pianura ampie zone sono emerse o costituivano alti strutturali.

Il progradare dei *thrust* sudalpini coinvolge dal Serravalliano in poi il margine alpino del bacino molassico che, inglobato nella catena, viene ad emergere ed è soggetto ad erosione, mentre nelle zone meridionali continua la sedimentazione detritica per lo più fine.

Alla fine del Tortoniano l'attività dei maggiori *thrust* sudalpini cessa e si chiude il ciclo della molassa lombarda; nell'area padana spessori relativamente modesti di sedimenti messiniani o più recenti, poco o nulla deformati, li ricoprono in discordanza (cfr. *Carta Geomorfologica*, sez. A-A').

All'estremità orientale della Pianura Veneta, ai piedi delle estreme propaggini della catena Dinarica vergente verso SW che chiude verso Est la pianura stessa, si sviluppa, contemporaneamente alla molassa sudalpina della Gonfolite, l'avanfossa della catena stessa.

A partire dal Serravalliano-Tortoniano l'attività dei *thrust* interessa il settore veneto del Sudalpino ad Est del blocco Lessini-Berici-Euganei e le strutture sudalpine a direzione W-E sud-vergenti si sovrappongono alle precedenti strutture dinariche a direzione NW-SE. Si sviluppa una nuova avanfossa a vergenza sudalpina che si viene a sovrapporre alla precedente avanfossa dinarica (fig. 6.3) (Massari, 1990). La sedimentazione è caratterizzata da sistemi deposizionali che vanno da proto-delta fangosi con corpi conglomeratici canalizzati a conoidi alluvionali conglomeratici ed arenacei.

Durante il Messiniano la sedimentazione molassica è interrotta in corrispondenza della profonda fase erosiva legata all'abbassamento del livello del mare che interessa tutto il Mediterraneo (Rizzini & Dondi, 1978; Ryan & Cita, 1978). Dopo la trasgressione pliocenica legata alla risalita del livello del mare, l'attività tettonica e la sedimentazione molassica si sviluppano ulteriormente in questo settore e proseguono sino al Quaternario, testimoniata, tra l'altro, dalla intensa sismicità dell'area (Slejko & alii, 1987) e dalla presenza di estesi conoidi attivi.

In ampi settori della pianura posti a Sud dei rilievi montuosi dei Lessini, Berici ed Euganei mancano sedimenti miocenici (*Carta Geomorfologica*, cfr. sez. C-C', D-D').

### 6.3 La tettonesi post-Miocenica

Dal Messiniano sino al Quaternario la tettonica di accrezione dell'Appennino settentrionale, contemporanea ora all'apertura del Mar Tirreno, interessa le zone esterne della catena e coinvolge l'avampaese padano sviluppando

ting from the Langhian, this was heteropic to the South and South-East to the turbidite of the marly-sandstone formation occurring in the southern Po Plain subsurface and amply outcropping in the Romagna Apennines (Umbria-Marche Domain). In the present-day axial belt of the plain, extensive areas emerged or made up structural highs.

From the Serravallian onwards, the prograding Sudalpino thrusts involved the Alpine margin of the molasse basin which, involved in the chain, finally emerged and was eroded, while mainly fine-grained detritic sedimentation continued in the southern areas.

At the end of the Tortonian, the activity of the main Sudalpino thrusts and the sedimentation of Lombard molasses ceased. In the Po Plain area, relatively small thicknesses of Messinian or more recent sediments, only slightly or not at all deformed, covered it with unconformity (cfr. Geomorphological Map, section A-A').

At the eastern end of the Veneto plain, at the foot of the extreme tips of the SW-verging Dinaric chain which closes the plain itself to the East, the foredeep of the Dinaric chain developed at the same time as the Sudalpino molasses of the Gonfolite.

From the Serravallian-Tortonian onwards, thrust activity involved the Veneto sector of the Sudalpino, East of the Lessini-Berici-Euganei block, whereas the W-E South-verging Sudalpino structures overlapped the older NW-SE trending Dinaric structures. A new foredeep developed, with Sudalpino vergence, which overthrust the older Dinaric foredeep (fig. 6.3) (Massari, 1990). Sedimentation was typical of depositional systems, ranging from muddy proto-delta type with conglomeratic channelized bodies to conglomeratic and arenaceous alluvial fans.

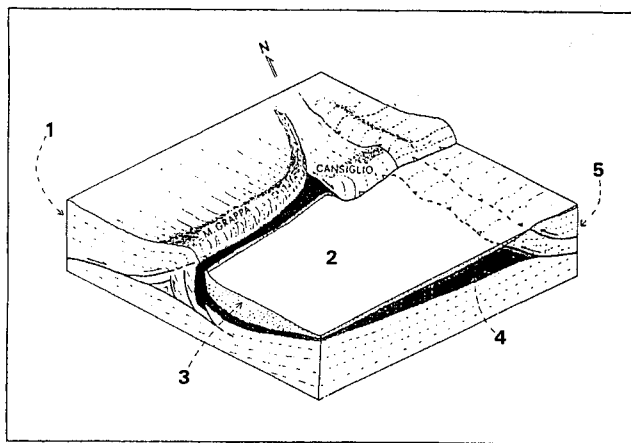


FIG. 6.3 - L'avampaese veneto fu dal Paleocene al Miocene medio coinvolto nella tettonica dinarica e successivamente, dal Miocene medio al Quaternario, in quella sudalpina (da Massari, 1990): 1 - Alpi Meridionali; 2 - Pianura Veneta; 3 - Avanfossa sudalpina; 4 - Avanfossa dinarica; 5 - Dinaridi.

FIG. 6.3 - Veneto foreland was involved in Dinaric tectonics from Paleocene to Middle Miocene, and in Sudalpine tectonics from Middle Miocene to Quaternary (from Massari, 1990): 1 - Southern Alps; 2 - Venetian plain; 3 - South-alpine foredeep; 4 - Dinaric foredeep; 5 - Dinarides.

su di esso l'avanfossa (Cremonini & Ricci Lucchi, 1982; Gasperi & alii, 1986; Castellarin & alii, 1985; Vai, 1987; Conti & Gelmini, 1994). All'estremità occidentale della pianura, in seguito all'accentuarsi della rotazione delle Alpi Liguri, si va riducendo drasticamente lo spazio dell'avampaese. Anche il settore veneto è, come sopra ricordato, tettonicamente attivo ed è svincolato, per mezzo della linea Schio-Vicenza, da quello lombardo, ora inattivo.

La ripresa della sedimentazione si svolge per lo più a ridosso del margine settentrionale dell'Appennino, in una fascia che dal Piemonte meridionale giunge sino alle Marche. L'Appennino ormai emerso fornisce all'avanfossa abbondante detrito (Dondi & D'Andrea, 1984; Ricci Lucchi, 1984).

Il nuovo ciclo sedimentario inizia nel Messiniano, durante l'abbassamento del livello del mare dovuto all'isolamento del Mediterraneo con la deposizione per lo più di torbiditi di ambiente salmastro in profondi bacini separati da alti strutturali e a loro volta separati dal resto del Mediterraneo. Con il Pliocene, il ristabilirsi del livello del mare porta a una generale trasgressione e il mare ricopre ampie aree prima emerse. La deposizione pelitica (Formazione delle argille del Santerno) interessa vaste zone, mentre torbiditi arenaceo-pelitici di piana basinale e di conoide sottomarina (Formazioni di Porto Corsini e di Porto Garibaldi) si depongono nelle zone più profonde. Depositi di mare poco profondo caratterizzano le aree piemontesi (Sabbie di Asti), la Pianura Veneta (Sabbie di Eraclea) e alcuni alti strutturali posti quasi al centro della pianura. Non si hanno sedimenti del Pliocene inferiore lungo il bordo alpino o sono limitati ad aree ristrette.

Durante le fasi tettoniche del Pliocene medio-superiore diversi tratti all'interno della pianura vengono ad emergere. Con il Pleistocene si inizia un nuovo ciclo sedimentario marino che porta al colmamento del bacino padano e il mare viene a ricoprire quasi completamente le terre prima emerse. I sedimenti sabbiosi prevalgono nella pianura veneta precedentemente emersa.

Una diversa evoluzione interessa nel Pliocene e nel Pleistocene l'area occidentale della Pianura Padana, cioè il settore racchiuso nel semicerchio delle Alpi Occidentali, posto ai piedi della catena stessa.

Questo settore viene ad emergere definitivamente già dal Pliocene inferiore e al mare si sostituisce gradualmente una piana alluvionale subsidente: la sedimentazione da marina passa dapprima a deltizia dominata dalle maree e poi a continentale. Si tratta del «Villafranchiano» (Pliocene inferiore-Pleistocene inferiore) (Carraro, 1996), successione potente oltre un centinaio di metri (fig. 6.4).

Il bacino molassico appenninico è profondamente e intensamente coinvolto nella tettonica appenninica con lo svilupparsi di sistemi di *thrust* nord-vergenti. La strutturazione deriva da una tettonica di embricazione esplicata in condizioni sottomarine soprattutto durante il Pliocene, di modo che l'intensa deposizione ne risulta fortemente controllata. I *thrust* a sviluppo planimetrico arcuato con concavità volta verso l'Appennino delineano strutture positive antiformi, separate dalle adiacenti ana-

*In the Messinian, molasse sedimentation was interrupted during the deep erosional phase linked with sea level lowering involving the entire Mediterranean Sea (Rizzini & Dondi, 1978; Ryan & Cita, 1978). After the Pliocene transgression caused by a rise in sea level, tectonic activity and molasse sedimentation further developed in this sector and continued until the Quaternary, as also shown by the intense seismicity of the area (Sleiko & alii, 1987) and by the presence of large active fans.*

*Large areas of the plain South of the Lessini, Berici and Euganei Hills do not contain Miocene sediments (Geomorphological Map, cfr. sections C-C', D-D').*

### 6.3 Post-Miocene tectonics

*From the Messinian to the Quaternary, the accretion tectonics of the Northern Apennines, now coeval with the opening of the Tyrrhenian Sea, involved the external zones of the chain and the Po Plain foreland, developing the fore-deep on it (Cremonini & Ricci Lucchi, 1982; Gasperi & alii, 1984; Castellarin & alii, 1985; Vai, 1987; Conti & Gelmini, 1994). The foreland at the western end of the plain was greatly reduced as a consequence of the accentuated rotation of the Ligurian Alps. As previously mentioned, also the Veneto sector was tectonically active and detached itself from the Lombard sector, now inactive, through the Schio-Vicenza Fault.*

*Sedimentation started again mainly along the northern margin of the Apennine, in a belt running from southern Piemonte to the Marche, and the now emerged Apennine supplied the foredeep with conspicuous detrital material (Dondi & D'Andrea, 1984; Ricci Lucchi, 1984).*

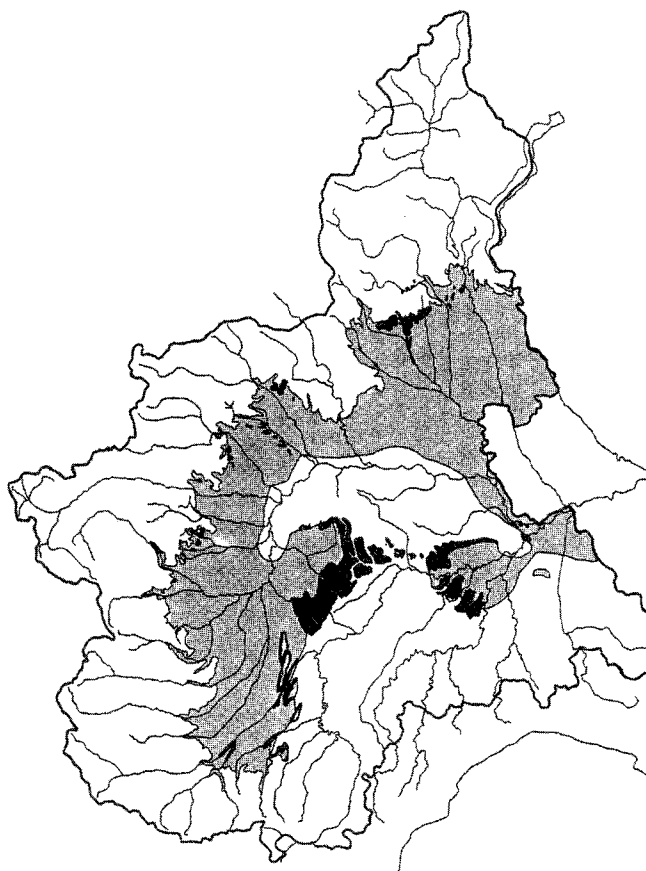
*The new sedimentary cycle began in the Messinian, during the sea level lowering due to the isolation of the Mediterranean, with the deposition of mainly brackish-environment turbidite in deep basins isolated by structural highs and separated from the Mediterranean. During the Pliocene, the rise in sea level caused general transgression and the sea again extensively covered land which had previously emerged. Pelitic deposition («Santerno Clay Formation») involved very large areas, whereas basinal-plain and submarine-fan arenaceous-pelitic turbidites («Porto Corsini and Porto Garibaldi Formations») were deposited in the deeper areas. Shallow-sea deposits are typical of the Piemonte areas («Asti Sands»), Veneto Plain («Eraclea Sands») and some structural highs almost in the centre of the plain. There are no, or very discontinuous, early Pliocene sediments along the Alpine border.*

*During the tectonic phases of the middle-late Pliocene, various stretches inside the plain began to emerge. With the Pleistocene a new marine sedimentary cycle filling the plain basin began, and the sea again almost completely covered the previously emerged land. Sandy sedimentation prevailed in the previously emerged Veneto plain.*

*In the Pliocene and Pleistocene, evolution in the western area of the Po Plain, i.e., the sector enclosed in the semi-circle of the Western Alps, at the foot of the chain itself, was different. This sector had already definitively emerged*

FIG. 6.4 - Distribuzione del Villafranchiano nell'area piemontese (da Carraro, 1996). In nero i lembi affioranti; in grigio quelli sepolti. Linea nera continua: confini della Regione Piemonte.

FIG. 6.4 - Distribution of Villafranchian in Piemonte (from Carraro, 1996). In black: outcropping; in grey: buried. Solid line: border of Regione Piemonte.



loghe strutture da aree sprofondate, sinformi, sulle quali sovrascorrono (cfr. ad esempio la sez. B-B' tra Ponte all'Oglio e Soresina).

Risultano coinvolti dalla tettonica compressiva i sedimenti del Pliocene inferiore e del Pliocene medio-superiore; al contrario i depositi del Quaternario documentano il forte rallentamento, o l'interruzione, della tettonica compressiva precedente.

Nel Quaternario, infatti, con l'attenuarsi dei movimenti tettonici nord-vergenti si ha il prevalere, nella fascia pedeappenninica, di una subsidenza generalizzata maggiormente accentuata; la sedimentazione si sviluppa su tutta la Pianura Padana in amplissime ondulazioni colmando residue depressioni del sistema bacinale precedente. Lo spessore dei sedimenti plio-quaternari è estremamente variabile essendo legato alla subsidenza differenziata delle strutture in dipendenza della attiva tettonica; esso supera i 7.000 m nelle zone di massimo accumulo, mentre quelli quaternari da soli superano i 2.000 m (cfr. sez. C-C' in corrispondenza di Parma, sez. D-D' a Nord di Albareto).

Il volume dei sedimenti, argille e sabbie in prevalenza, deposti nella Pianura Padana durante il Pliocene è stato valutato in 97.000 km<sup>3</sup> e in 95.000 km<sup>3</sup> durante il Quaternario (Bartolini & alii, 1996). La grande quantità dei se-

*in the early Pliocene, and the sea, which had invaded the area, gradually gave way to a subsiding alluvial plain: sedimentation evolved from marine to tide-dominated deltaic and then to continental. This is the «Villafranchiano» (lower Pliocene-lower Pleistocene) (Carraro, 1996), a sequence more than 100 m thick (fig. 6.4).*

*The Apennine molasse basin was deeply and intensely involved in the Apennine tectonics, with the development of north-verging thrust systems. The Apennine structures derived from imbrication tectonics, which took place in submarine conditions, mainly during the Pliocene, so that the intense sedimentation was strongly controlled. Arcuate thrusts concave towards the Apennines defined positive antiform structures, separated from similar adjacent structures by sunken, synform areas, which they overthrust (Geomorphological Map, cfr. for example, section B-B' between Ponte dell'Oglio and Soresina).*

*The Pliocene sediments were involved in compressive tectonics, whereas the Quaternary deposits reveal a great reduction or interruption in such activity. In the Quaternary, reduced north-verging tectonic movements in the pede-Apennine belt gave rise to generalized and more accentuated subsidence. In the entire Po Plain sedimentation developed in flat residual depressions of the preceding basinal system. The thickness of the Plio-Quaternary sediments va-*

dimenti depositi durante il più breve intervallo di tempo quaternario viene imputato alla maggiore velocità di sollevamento delle catene con conseguente maggiore erosione, a cui va forse aggiunto il maggior tasso di erodibilità dei versanti connesso alle varie fasi di deterioramento climatico che caratterizzano il Pleistocene.

Dal Piemonte all'Adriatico tre grandi archi adiacenti inviluppano le strutture appenniniche padane delineando il Fronte dell'Appennino Sepolto. All'esterno di questo si estende la Monoclinale Pedalpina, un grande e relativamente tranquillo elemento strutturale, avampese dell'Appennino pliocenico. Nel settore lombardo in brevi tratti il fronte appenninico si accavalla, al di sotto dei depositi quaternari, sulle più antiche strutture frontali sepolte delle Alpi Meridionali (*Carta Geomorfologica*, cfr. sez. B-B').

Lungo il bordo appenninico padano i sedimenti pliocenici e quaternari appaiono piegati all'interno di una flessura con sensibile immersione verso la pianura e vengono ad affiorare essendo sollevati di alcune centinaia di metri. Questa struttura costituisce il «Lineamento Frontale Appenninico», cerniera tra la catena in sollevamento e l'avanfossa, tutt'ora in pieno sviluppo (Castellarin & alii, 1985; Gasperi & alii, 1989).

Il raccorciamento tettonico post-messiniano dell'area padana viene valutato tra i 10 e i 20 chilometri a seconda dei settori, il che si traduce in una relativa traslazione delle unità del margine appenninico padano verso Nord al di sopra dell'avanfossa padana di pari entità in meno di 6 Ma, considerando stabile l'antistante settore della pianura di pertinenza alpina (Bartolini & alii, 1983; Castellarin & alii, 1985).

Per arresto della subsidenza, o per inversione della stessa, forse in corrispondenza di una delle fasi glaciali quaternarie che hanno prodotto abbassamenti del livello del mare sino a 100-150 m rispetto all'attuale e in seguito ad un aumento degli apporti dalle catene in surrezione, acquista maggiore estensione la pianura alluvionale rispetto all'ambiente marino (fig. 15.3). Il mare, che invaso da estesi conoidi di provenienza alpina già dal Pliocene inferiore aveva abbandonato il settore più occidentale della pianura, a partire da circa 1 milione di anni fa si ritira dai suoi margini e verso Est. Data la irregolare profondità del fondo del mare padano nel Pleistocene, con aree poco profonde od emerse accanto ad altre profonde, e per l'effetto della subsidenza differenziale, bracci di mare o lagune salmastre persistono anche quando la maggior parte dell'area è emersa (Colombetti & alii, 1975).

L'ultimo episodio di sedimentazione marina è rappresentato dalle «Sabbie Gialle» litorali, cioè da depositi sabbioso-ciottolosi di spiaggia che, grazie anche all'abbondante apporto sedimentario, migrano verso il centro della pianura e verso l'Adriatico.

Dopo la Formazione delle Sabbie Gialle, ritenute di età pleistocenica inferiore-media, la sedimentazione generalmente riprende in condizioni continentali o al massimo costiere e l'ambiente, cosperso di stagni e paludi, è dominato dalla dinamica dei fiumi.

*ries greatly, since it is linked to differentiated subsidence due to active tectonics. Thickness exceeds 7,000 m in the areas of maximum accumulation, and Quaternary deposits alone exceed 2,000 m (Geomorphological Map, cfr. section C-C' near Parma, and section D-D' North of Albareto).*

*The volume of sediments, clays and sands mainly deposited in the Po Plain has been evaluated at 97,000 km<sup>3</sup> during the Pliocene and at 95,000 km<sup>3</sup> during the Quaternary (Bartolini & alii, 1996). The great amount of sediments deposited during the shorter period of the Quaternary is believed to be due to the greater rate at which the chains rose, with consequent greater erosion, and, perhaps, also the greater degree of slope erodibility due to the various phases of climatic deterioration characteristic of the Pleistocene.*

*From the Piemonte to the Adriatic, three large adjacent arcs enfold the plain Apennine structures, outlining the front of the buried Apennine chain. Outside this was the pede-Alpine Monoclinial, a large and relatively undeformed structural element, foreland of the Pliocene Apennines. In short stretches in the Lombard sector, the Apennine front overthrust older buried frontal structures of the Southern Alps, under the Quaternary deposits (Geomorphological Map, cfr. section B-B').*

*Along the NE Apennine border, the Pliocene and Quaternary sediments are buckled up as a monoclinial fold dipping towards the plain, and then outcrop uplifted of some hundred metres. This structure is the «Frontal Apennine Lineament», a hinge between the rising chain and the fore-deep, still in a state of full development (Castellarin & alii, 1985; Gasperi & alii, 1989).*

*The post-Messinian tectonic shortening of the plain area is calculated to be between 10 and 20 km, according to sector, which means a relative northward translation of the Apennine margin, above the Po Plain foredeep, of equal extent in less than 6 Ma, considering as stable the forward sector of the plain belonging to the Alps (Bartolini & alii, 1983; Castellarin & alii, 1985).*

*Due to a standstill or inversion in subsidence, perhaps during one of the Quaternary glacial phases which caused sea level lowering of 100-150 m with respect to the present-day level, and for increasing supplies from rising chains, the alluvial plain became larger, reducing the marine environment (fig. 15.3). The sea, which had retreated due to the presence of extensive fans of Alpine provenance already in the early Pliocene, had withdrawn from the most westerly sector of the plain starting about 1 Ma ago, and further retreated eastwards. Due to the irregular depth of the sea bottom during the Pleistocene, with shallow or emerging areas next to deep ones, and also to the effects of differential subsidence, stretches of sea or brackish lagoons persisted, even when most of the area had emerged (Colombetti & alii, 1975).*

*The last episode of marine sedimentation is represented by «Sabbie Gialle» («Yellow Sands»), i.e., sandy-pebbly beach deposits which, owing to abundant sedimentary supply, migrated towards the centre of the plain and towards the Adriatic.*

La subsidenza, e quindi l'accumulo dei sedimenti, si sviluppa ancora in modo differenziale regolata dalla compattazione dei sedimenti deposti e dall'attività di alcune delle strutture profonde. Nelle aree centrali della pianura abbiamo sedimenti alluvionali potenti oltre 600 m (Colombetti & alii, 1975), mentre in corrispondenza di una delle strutture positive posta nelle zone centrali della pianura essi sono potenti solo 80 m (cfr. sez. D-D', Cavone 2) (Pellegrini & alii, 1976).

Le strutture dell'Appennino sepolto sono causa di deformazioni anche vistose dei sedimenti continentali (Desio, 1965; Gasperi & Pellegrini, 1968; Gasperi & alii, 1989; Bartolini & alii, 1983) oltre che di divagazioni e diversioni del percorso dei fiumi.

Il settore veneto della Pianura Padana è quello tettonicamente più attivo; in esso è tutt'ora in atto il sottoscorrimento crostale della litosfera adriatica al di sotto delle Alpi orientali (Massari, 1990; Castellarin & alii, 1992) che è, tra l'altro, causa della intensa sismicità del settore.

#### 6.4 Le principali strutture padane sepolte

La maggior parte del sottosuolo padano profondamente coinvolto nella tettonica delle adiacenti catene costituisce, dal punto di vista strutturale, parte integrante di queste. La parte centrale della Pianura Padana non coinvolta dalle orogenesi (fig. 6.1) costituisce l'avampace comune alle due catene, un elemento strutturale ad assetto poco o nulla deformato di cui affiora parte nei Lessini-Euganei-Berici e nell'Istria (*Carta Geomorfologica*, cfr. sez. C-C' tra Parma 1 e Verona, sez. D-D' tra Secchia e Zevio, sez. E-E' tra Varano 1 e Lavariano 1).

Nel settore Nord della pianura adiacente alle Alpi ad Ovest del sistema Lessini-Euganei-Berici, al di sotto dei sedimenti plio-quadernari le strutture alpine consistono in ripetuti *thrust* che si accavallano verso Sud la cui attività sembra esaurirsi nel Miocene inferiore (cfr. sez. A-A' e B-B'). Il fronte dei *thrust* individua il «Fronte Sepolto del Sudalpino», fronte del prisma di accrezione tettonica.

Dopo il Miocene inferiore l'area è andata soggetta a un relativamente basso rapporto subsidenza/sedimentazione: le strutture precedenti appaiono ricoperte da lembi discontinui di sedimenti miocenici medio e superiore, sepolti a loro volta da quelli pliocenici e quadernari distribuiti su tutta l'area, ma con spessori maggiori a Sud mentre presso il margine alpino si assottigliano e, a luoghi, mancano. Il Plio-Quadernario costituisce la Monoclinale Pedalpina (cfr. le sezioni) alla quale appartiene anche il settore posto a Sud del sistema Lessini-Euganei-Berici; qui però mancano i sedimenti compresi tra il Paleocene e il Pliocene inferiore (cfr. sez. D-D' tra Cavone e Zevio) e relativamente ridotto è anche il Quadernario (cfr. sez. E-E').

Il sottosuolo tra il F. Po e la catena appenninica, parte integrante di questa catena, si presenta strutturato a partire dal Pliocene in serie di *thrust*, accavallati gli uni agli altri.

*After the Yellow Sands, lower-middle Pleistocene, sedimentation generally started again, in continental or at most coastal conditions, and the environment, with scattered ponds and marshes, came to be dominated by fluvial dynamics.*

*Subsidence and thus sediment accumulation again developed differentially, controlled by compaction of deposited sediments and activity by some of the deep structures. In the central areas of the plain, the thickness of alluvial sediments normally exceeds 600 m (Colombetti & alii, 1975), whereas near one of the positive structures (Geomorphological Map, cfr. section D-D', Cavone 2), alluvial deposits are only 80 m thick (Pellegrini & alii, 1976).*

*The structures of the buried Apennines are the cause of sometimes very evident deformations in the continental sediments (Desio, 1965; Gasperi & Pellegrini, 1968; Bartolini & alii, 1983; Gasperi & alii, 1989); as well as changes in river courses.*

*The Veneto sector of the Po Plain is the most active from the tectonic viewpoint. Ongoing crustal overthrusting of Adriatic lithosphere under the Eastern Alps (Massari, 1990; Castellarin & alii, 1992) is also partly responsible for the intense seismicity of the sector.*

#### 6.4 Main buried structures in the Po Plain

*From the structural viewpoint, most of the Po Plain subsurface deeply involved in the tectonics of the adjacent chains forms an integral part of them. The central part of the Po Plain not involved in this orogenesis (fig. 6.1) is the foreland common to the two chains, a structural element which is only slightly or not at all deformed, and which crops out in the Lessini-Euganei-Berici Hills and in Istria (Geomorphological Map: cfr. section C-C' between Parma 1 and Verona; section D-D' between Secchia and Zevio; section E-E' between Varano 1 and Lavariano 1).*

*In the North sector of the plain, near the Alps and West of the Lessini-Euganei-Berici system, Alpine structures under the Plio-Quaternary sediments consist of repeated thrusts overthrusting southwards, the activity of which ceased in the early Miocene (Geomorphological Map, cfr. sections A-A' and B-B'). The front of the thrusts identifies the «Sudalpino Buried Front» of the tectonic accretion wedge.*

*After the early Miocene, the area was subjected to a relatively low subsidence/sedimentation ratio. The pre-Miocene structures were covered by discontinuous middle or late Miocene sediments, buried by Pliocene and Quaternary deposits distributed throughout the area, although they are thicker to the South and thinner near the Alpine margin where they sometimes taper out completely. The Plio-Quaternary deposits make up the pede-Alpine Monoclinale (Geomorphological Map, cfr. the sections), to which the area South of the Lessini-Euganei-Berici system also belongs. Here, however, the sediments between the Paleocene and early Pliocene are missing (Geomorphological Map, cfr. section D-D' between Cavone and Zevio). Relatively thin is the Quaternary too (cfr. section E-E').*

*The subsurface between the river Po and the Apennine chain, which forms an integral part of this chain, developed*

Le strutture positive sono sempre caratterizzate da sottili coperture di depositi, al contrario le zone frontali dei *thrust* appaiono interessate da una pronunciatissima subsidenza documentata dal cospicuo spessore dei depositi localizzato presso le fronti o al di sotto degli embrici (cfr. sez. C-C', D-D').

La sedimentazione, attiva durante lo svilupparsi delle strutture, risulta controllata dagli elementi strutturali stessi, i quali individuano bacini asimmetrici in cui la maggiore subsidenza e il maggiore accumulo si ha nelle zone frontali esterne dei *thrust* (cfr. sez. B-B' tra Turro e Cremona Sud, tra Cremona Sud e Soresina; sez. C-C' tra Felino e Collecchio, tra Parma 1 e Rodigo; sez. D-D' tra Levizzano e Modena 1, tra Modena 1 e Albareto, tra Albareto e Cavone 2, tra Cavone 2 e Nogara; sez. E-E' tra Marzeno e Cotignola, tra Bagnacavallo e Longastrino, tra Longastrino e Codigoro). Le culminazioni di alcuni *thrust* vengono ad emergere anche per lunghi intervalli di tempo (cfr. sez. D-D' Cavone 2, sez. E-E' Longastrino).

Le strutture positive non si presentano isolate, ma riunite in fasci a direzione appenninica; abbiamo così tra Pavia e Reggio Emilia il fascio delle «Pieghie Emiliane» (cfr. sez. B-B' tra Ponte dell'Oglio e Soresina; sez. C-C' tra Felino e Parma 1), ad Est di Reggio Emilia le «Pieghie Romagnole» (cfr. sez. D-D' tra Maranello e Albareto 1, sez. E-E' tra Marzeno e Bagnacavallo); da Reggio Emilia a Ferrara ed oltre le «Pieghie Ferraresi» o «Dorsale Ferrarese», che è la struttura sepolta più elevata, emersa a lungo durante il Pliocene superiore e il Pleistocene (cfr. sez. D-D' Cavone, sez. E-E' Longastrino).

Il «Fronte dell'Appennino Sepolto» è delineato dall'involuppo esterno dei *thrust* appenninici-padani che disegnano in pianta tre grandi archi, la cui evoluzione si è sviluppata in modo diacrono coinvolgendo per primi i settori occidentali: l'«Arco del Monferrato», che comprende le strutture più elevate e al cui interno affiorano unità pre-plioceniche di pertinenza alpina ed appenninica; l'«Arco di Pavia», che si scontra con il fronte sudalpino sepolto sovrapponendosi (sez. B-B' presso Soresina) e infine l'«Arco della Dorsale Ferrarese» (fig. 6.1).

L'intersezione tra gli archi corrisponde ad aree di massimo accumulo dei sedimenti plio-quadernari: tra l'Arco del Monferrato e quello di Pavia lo spessore dei sedimenti supera i 3.000 m, mentre tra l'Arco di Pavia e l'Arco della Dorsale Ferrarese supera i 7.000 m, valore che è massimo dell'intero bacino padano-adriatico.

Infine, un aspetto particolare relativo a queste strutture, è quello legato alla presenza di giacimenti di idrocarburi; le strutture positive padane sono, infatti, frequentemente sede di giacimenti di idrocarburi sia nel Pliocene sia in formazioni più antiche (v. anche Capitolo 14). I giacimenti a gas, in maggior parte biogenici, hanno *reservoir* nel Miocene superiore-Pliocene-Pleistocene, mentre giacimenti di olio sono ubicati per lo più in sedimenti più antichi, giurassici o cretacei (cfr. sez. D-D', Cavone) o anche triassici (Malossa, presso Treviglio).

*as fold thrusts from the Pliocene onwards. Their positive structures are always characterized by thin sedimentary covers, unlike the frontal parts of the thrusts which are affected by extreme subsidence, as shown by the considerable thickness of the deposits near the fronts or under the imbricated folds (Geomorphological Map, cfr. sections C-C', D-D').*

*Sedimentation, active as the structures developed, was controlled by the structural elements themselves, including asymmetrical basins in which the greatest subsidence and accumulation occurred in the external frontal areas of the thrusts (Geomorphological Map: cfr. section B-B' between Turro and Cremona Sud, and between Cremona Sud and Soresina; section C-C' between Felino and Collecchio, Parma 1 and Rodigo; section D-D' between Levizzano and Modena 1, Modena 1 and Albareto, between Albareto and Cavone 2, between Cavone 2 and Nogara; section E-E' between Marzeno and Cotignola, between Bagnacavallo and Longastrino, and between Longastrino and Codigoro). The tops of some thrusts also emerged for long periods of time (Geomorphological Map, cfr. section D-D', Cavone 2, and section E-E', Longastrino).*

*The positive structures do not occur in isolation, but are linked by belts with Apennine vergence. Thus, the «Emilian Fold Belt» is found between Pavia and Reggio Emilia (Geomorphological Map: cfr. section B-B' between Ponte dell'Oglio and Soresina; section C-C' between Felino and Parma 1), the «Romagna Folds» East of Reggio Emilia (Geomorphological Map: cfr. section D-D' between Maranello and Albareto 1; section E-E' between Marzeno and Bagnacavallo) and, from Reggio Emilia to Ferrara and beyond, the «Ferrara folds» or «Ferrara Ridge», which is the shallowest buried structure and which emerged for a long period during the Upper Pliocene and Pleistocene (Geomorphological Map: cfr. section D-D', Cavone, and section E-E', Longastrino).*

*The «Buried Apennine Front» is defined by the external folding of the Apennine plain thrusts forming three large arcs, the development of which was diachronous, involving first the western sectors: the «Monferrato Arc», which includes the highest structures and inside which Alpine and Apennine pre-Pliocene units crop out; the «Pavia Arc», which collides against the buried Sudalpine front, overthrusting it (Geomorphological Map, section B-B', near Soresina) and the «Ferrara Ridge Arc» (fig. 6.1). The intersections between these arcs correspond to areas of maximum accumulation of Plio-Quaternary sediments. Between the Monferrato and Pavia Arcs, their thickness exceeds 3,000 m and between the Pavia and Ferrara Ridge Arcs 7,000 m, the maximum value of the entire Po Plain-Adriatic basin.*

*Lastly, one particular aspect of these structures is the presence of hydrocarbon deposits. The positive structures frequently contain such deposits in both Pliocene and older formations (see also Chapter 14). The gas, mainly of biogenic origin, is located in Upper Miocene-Pliocene-Pleistocene reservoirs, whereas the oil deposits are mainly located in older sediments of Jurassic, Cretaceous (Geomorphological Map, cfr. section D-D', Cavone) or even Triassic age (Malossa, near Treviglio).*