

CAPITOLO 2

METODI

2.1. Introduzione:

La metodologia utilizzata per la caratterizzazione stratigrafico-sedimentologica delle successioni quaternarie affioranti nella media Valle del Fiume Crati si basa sull'analisi di *facies*; essa ha per obiettivo la ricostruzione paleoambientale e la comprensione dell'organizzazione, in senso laterale e verticale (cioè nello spazio e nel tempo) degli ambienti deposizionali.

Questo tipo di approccio porta a definire le unità stratigrafico-deposizionali (o deposizionali) intese come insieme di strati che possono riconoscersi come il prodotto di determinati ambienti e processi sedimentari e la cui comprensione permette di ricostruire le relazioni stratigrafiche all'interno dei bacini sedimentari.

L'unità base della classificazione stratigrafico-deposizionale è la *facies* definita come l'insieme dei caratteri fisici legati ad un ben definito processo (processi) sedimentario; in sintesi, una *facies* è un corpo sedimentario tipicamente di spessore metrico e caratterizzato da attributi fisici (litologia, tessitura, strutture sedimentarie e organiche, geometrie e spessori), che lo differenziano dai sedimenti associati sia verticalmente che lateralmente.

Ne deriva, pertanto, che per giungere all'interpretazione paleo-ambientale, occorre analizzare le associazioni di *facies*, cioè due o più *facies* geneticamente legate tra loro e formanti un unico corpo sedimentario; il loro raggruppamento in elementi deposizionali

permette di definire i sistemi deposizionali, che comprendono più ambienti sedimentari contemporanei.

I rapporti latero-verticali tra le associazioni di *facies* ed i sistemi deposizionali sono stati poi interpretati in termini stratigrafico-sequenziali e dunque in termini di variazioni relative del livello marino.

2.2. Stratigrafia sequenziale:

La stratigrafia sequenziale è considerata una delle più importanti discipline di sintesi della geologia del sedimentario, poiché cerca di spiegare l'architettura deposizionale dei sedimenti a scala di bacino, in funzione delle variazioni relative del livello marino.

Nella sua forma più semplice, la stratigrafia sequenziale è un metodo stratigrafico descrittivo, che utilizza le discontinuità e le superfici di continuità ad esse correlabili per dividere una successione sedimentaria in sequenze.

Tale disciplina, nata negli anni settanta dalla stratigrafia sismica, ha avuto tra gli sviluppi più recenti quello della stratigrafia sequenziale ad alta risoluzione (Hardie *et alii*, 1986; Van Wagoner *et alii*, 1990; Goldhammer *et alii*, 1991), con il richiamo alla teoria di Milankovitch per spiegare l'origine dei cicli ad alta frequenza.

Pur considerando i diversi campi di applicazione, essa viene intesa in questo lavoro come strumento per l' "individuazione delle sequenze che costituiscono il riempimento di un determinato bacino sedimentario e riconoscimento del loro significato nell'ambito

dell'evoluzione geologica dello stesso bacino" (Carter *et alii*, 1991; Carter 1998).

La sequenza è l'unità fondamentale della stratigrafia sequenziale (Mitchum, 1977; Vail *et alii*, 1977; Jervey, 1988; Posamentier & Vail, 1988; Posamentier *et alii*, 1988) e nella sua accezione originale indica "un'unità stratigrafica costituita da una successione relativamente continua di strati geneticamente legati, delimitata alla base ed alla sommità da superfici di discontinuità o dalle superfici di continuità ad esse correlabili" (Mitchum *et alii*, 1977); le suddette superfici rappresentano, pertanto, limiti di sequenza, intesi come superfici di discontinuità che si formano durante la fase di abbassamento relativo del livello marino, in corrispondenza delle quali si verifica un'erosione subaerea, eventualmente sottomarina, che produce uno *hiatus* significativo (Mitchum *et alii*, 1977; Mitchum & Van Wagoner, 1991; Van Wagoner *et alii*, 1988).

In realtà, questa è la definizione dei limiti di sequenza di tipo 1, che differiscono da quelli di tipo 2 sulla base dell'entità dell'abbassamento del livello marino e dell'erosione ad essa associata (Van Wagoner *et alii*, 1988).

In accordo con Van Wagoner *et alii* (1988), un limite di sequenza di tipo 1 si forma in seguito ad esposizione subaerea e quindi erosione dell'intera piattaforma, con conseguente spostamento della sedimentazione verso il bacino; ciò provoca la sovrapposizione di depositi continentali o parali su sedimenti di mare basso, con formazione di una *subaereal unconformity*; verso il bacino, la *subaerial unconformity* trova continuità nella *correlative conformity*, che da un

punto di vista temporale rappresenta la fine della regressione forzata (Hunt & Tucker, 1992).

Un limite di sequenza di tipo 2 si origina, invece, quando il livello relativo del mare si abbassa, senza però raggiungere l'*offlap break*, ovvero la rottura di pendenza lungo il profilo deposizionale e senza il verificarsi di significativi fenomeni erosivi (Emery & Myers, 1996).

Comunque, alcuni autori (Posamentier & Allen, 1999) suggeriscono di abbandonare questa distinzione ritenuta artificiale, al fine di semplificare la terminologia e di evitare cattive interpretazioni di questi concetti.

Nella stratigrafia sequenziale, l'architettura e le geometrie deposizionali sono descrivibili in termini di unità stratigrafiche raggruppabili in vari "ordini" organizzati gerarchicamente; essi comprendono i rapporti tra singoli strati e insiemi di strati a costituire le parasequenze, insiemi di parasequenze a formare i *systems tract* ed insiemi di *systems tract*, ovvero le sequenze.

Le parasequenze sono state definite da Van Wagoner (1985) come "successioni relativamente continue di strati geneticamente legati, delimitate da superfici di ingressione marina (*marine flooding surface*) e dalle superfici ad esse correlate"; le parasequenze si formano in seguito ad oscillazioni nell'equilibrio tra l'apporto sedimentario e la creazione di spazio per i sedimenti (Van Wagoner *et alii*, 1990; Swift *et alii*, 1991; Posamentier & Allen, 1993; Helland-Hansen & Martinsen, 1996; Coe, 2003; Storms & Hampson, 2005), andando, pertanto, a costituire dei cicli di unità regressive (*upward-coarsening*), delimitate da superfici in

corrispondenza delle quali si apprezza un aumento della profondità di deposizione (figura 2.1).

Tale approfondimento è generalmente associato a fenomeni minori di erosione sottomarina o di non deposizione (Van Wagoner *et alii*, 1990; Swift *et alii*, 1991; Posamentier & Allen, 1993; Helland-Hansen & Martinsen, 1996; Coe, 2003; Storms & Hampson, 2005).

Figura 2.1: Schema mostrante una tipica distribuzione di *facies* marine lungo una parasequenza (da Ketzer, 2002).

Di ordine gerarchico superiore alle parasequenze sono gli apparati deposizionali, detti *systems tract*, definiti come “insieme di unità deposizionali contemporanee”, ovvero insiemi di associazioni (tridimensionali) di litofacies geneticamente legate (Brown & Fisher, 1977) (figura 2.2).

Secondo il modello di Vail *et alii* (1977), al di sopra di un limite di sequenza si sviluppa l'apparato deposizionale di stazionamento basso o *lowstand systems tract* (LST), seguito dall'apparato deposizionale trasgressivo o *transgressive systems tract* (TST) e dall'apparato deposizionale di stazionamento alto o *highstand systems tract* (HST) (figure 2.3 e 2.4).

Figura 2.2: Schema mostrante una tipica sequenza deposizionale (da Ketzer, 2002). I sistemi di stazionamento basso si sviluppano nel tratto inferiore di risalita eustatica, quando il tasso di apporto sedimentario supera il tasso di risalita relativa del livello marino; pertanto, i depositi sono

caratterizzati da una geometria prevalentemente progradazionale (VAN WAGONER *et alii*, 1988) e contemporaneamente aggradazionali.

L'apparato deposizionale trasgressivo (TST) si sviluppa durante la fase d'incremento della risalita relativa del livello del mare, nella quale il tasso di creazione di spazio per i sedimenti eccede gli apporti sedimentari. Il limite inferiore è dunque rappresentato da una superficie trasgressiva o *trasgressive surface* e cioè da una superficie di massima progradazione, mentre quello superiore da una superficie di massima ingressione o *maximum flooding surface*; il TST è caratterizzato da geometrie prevalentemente retrogradazionali.

L'apparato deposizionale di stazionamento alto (HST) è costituito dai depositi legati alla fase finale della trasgressione, allo stazionamento alto ed alla fase iniziale della caduta relativa del livello marino. Pertanto, è caratterizzato da un tasso di innalzamento relativo del livello marino che diminuisce nel tempo e che si traduce nella formazione di una geometria dapprima aggradazionale e successivamente progradazionale, in rapporto di *downlap* rispetto alla superficie di massima inondazione (*maximum flooding surface*); pertanto, è delimitato inferiormente dalla superficie di massima ingressione e superiormente dal limite della sequenza soprastante.

Infine, l'apparato di regressione erosiva o *forced-regression systems tract*, o *falling sealevel systems tract* comprende i depositi rappresentativi della fase di caduta del livello marino relativo (Hunt & Tucker, 1992; Helland-Hansen & Gjelberg, 1994) e pertanto i depositi di "regressione erosiva" (tipicamente depositi continentali su *facies* marine), nonché i depositi risedimentati nella parte distale del bacino.

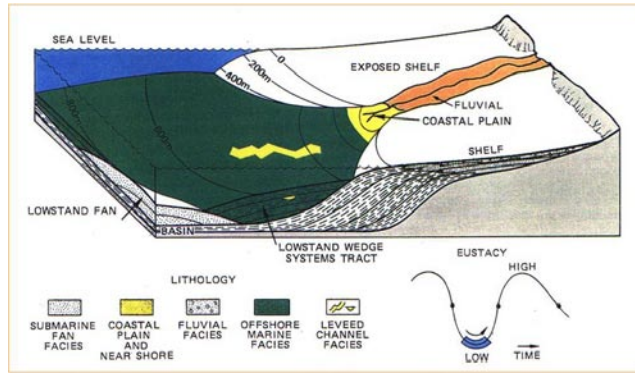


Figura2.3a: *Lowstand systems tract.*

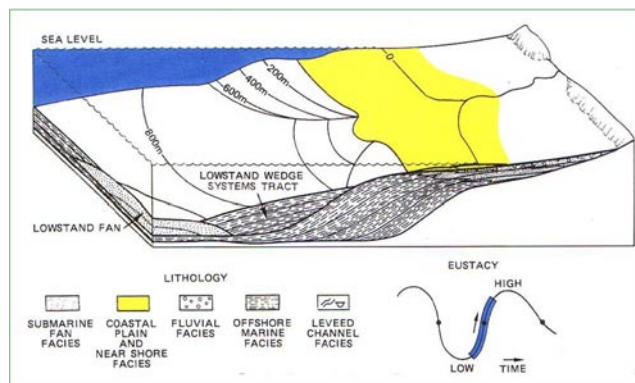


Figura 2.3b: *Transgressive systems tract.*

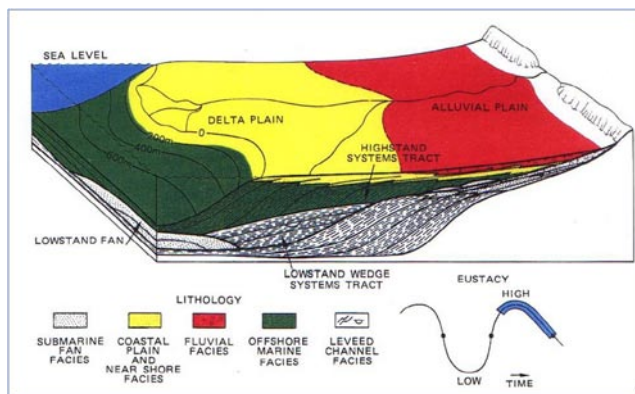


Figura 2.3c: *Highstand systems tract.*

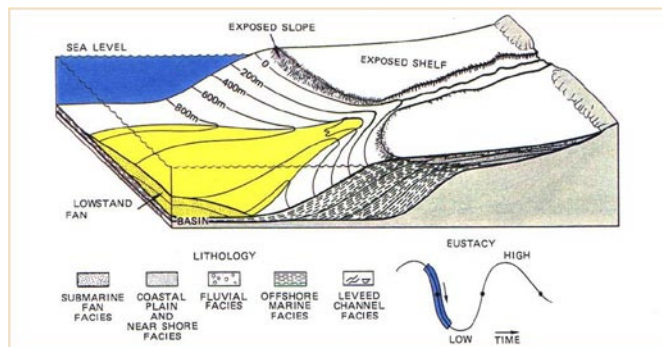


Figura 2.3d: *Forced regression systems tract.*

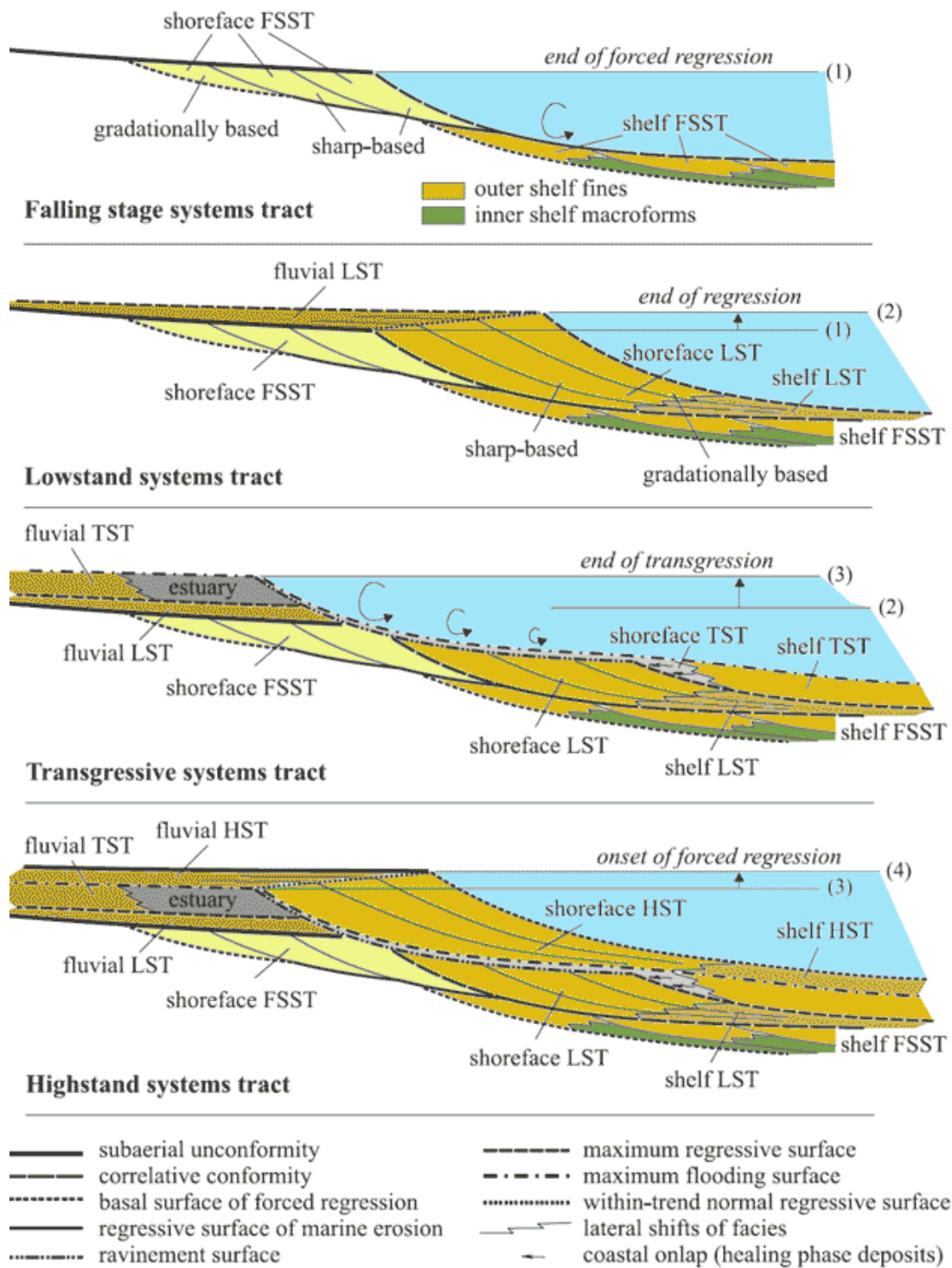


Figura 2.4: Schema mostrante i rapporti tra *facies* e le relative superfici stratigrafiche, nella zona di transizione tra un ambiente fluviale ed un ambiente di mare basso (da Catuneanu, 2002).

Nel caso delle sequenze di alto ordine (*high-order sequence*), risulta difficile la distinzione tra gli apparati deposizionali legati alla caduta del

livello marino, per cui essi sono considerati in un unico apparato regressivo, noto come *regressive systems tract* (RST) (Naish & Kamp, 1997) e dunque come *systems tract* aggiuntivo ai tre dello schema classico di VAIL *et alii* della stratigrafia sequenziale.

Pertanto, il RST (Embry, 1995) è delimitato alla base dalla *maximum flooding surface*, mentre al *top* da una *subaerial unconformity* che trova continuità in una superficie di massima regressione o *maximum regressive surface* verso il bacino; è caratterizzato da una generale geometria progradazionale, con conseguente “*shallowing-coarsening-upward trend*”, legato allo spostamento delle facies costiere verso il bacino (Catuneanu *et alii*, 1998).

Con la definizione del concetto di RST, le sequenze di alto ordine prendono il nome di *transgressive–regressive sequence* (Embry and Johannessen, 1992).

Per quanto concerne le superfici erosive e non che si osservano lungo le sequenze deposizionali, di seguito ne verranno descritti i caratteri principali.

2.2.1. Flooding surface:

Marine flooding surface è il termine inizialmente usato per una superficie “lungo la quale vi sono evidenze di un brusco innalzamento relativo del livello marino (Van Wagoner *et alii*, 1988); la definizione cambia successivamente in *flooding surface* in modo da includere anche gli ambienti continentali.

In pratica, il termine *flooding surface* sta a indicare l’inondazione di aree precedentemente emerse o comunque situazioni nelle quali c’è evidenza di un approfondimento (Bhattacharya, 1993); tipicamente,

una *flooding surface* il limite di una parasequenza (Van Wagoner *et alii*, 1990).

Infine, Van Wagoner *et alii* (1988) suggeriscono che l'approfondimento associato ad una *flooding surface* può essere accompagnato da erosione marina; in tali casi, comunque, è più comune utilizzare il termine *ravinement surface* (Bhattacharya, 1993).

2.2.2. *Ravinement surface* :

La *ravinement surface* (Stamp, 1921) è una superficie erosiva di origine marina, che si forma nel corso di innalzamenti relativi del livello marino e viene pertanto definita anche come *transgressive wave ravinement surface* (Swift, 1968).

La profondità dell'erosione è generalmente pari a circa 10m, ovvero al limite inferiore della *shoreface* e dunque è pari alla profondità dell'onda normale (Saito, 1994); comunque, in casi particolari può essere maggiore (30-40m) come documentato da Sunamura (1987).

Le *ravinement surface* sono comunemente superfici relativamente piane (Bergman & Walker, 1987), leggermente inclinate verso il bacino (Nummedal & Swift, 1987) e sono mantellate quasi sempre da *lag* trasgressivi, ovvero livelli residuali prodotti dalla rielaborazione dei depositi costituenti il substrato in annegamento (Van Wagoner *et alii*, 1990); questi livelli sono diacroni, in quanto progressivamente più giovani verso terra (Jervey, 1988), sono generalmente spessi da pochi decimetri a 2 metri, sono conglomeratici e ricchi nei componenti più resistenti e talora, prevalentemente fossiliferi.

Chiaramente, la *ravinement surface* ed il relativo *lag* trasgressivo sono ricoperti da associazioni di *facies* notevolmente più distali, rispetto a

quelle poste immediatamente al di sotto della superficie stessa e generalmente, si tratta di sabbie con laminazioni *hummocky* e/o bioturbate; nei settori più distali possono accumularsi depositi condensati a grana fine e bioturbati (Kidwell, 1989), dato lo scarso apporto sedimentario nel corso della trasgressione (Monstad, 2000; Steel *et alii*, 2000).

2.2.3. *Transgressive surface*:

Il termine *transgressive surface* (Posamentier & Vail, 1988) viene concepito dalla necessità di separare i depositi dell'apparato di stazionamento basso da quelli del sistema trasgressivo, poiché è una superficie che separa depositi progradanti da depositi retrogradanti; pertanto, può essere definita anche come *maximum regressive surface* (Helland-Hansen & Martinsen, 1996; Helland-Hansen and Gjelberg, 1994) ed utilizzata anche per le sequenze di alto ordine, in quanto tale superficie separa il *lowstand systems tract* dal *transgressive systems tract* e dunque, nel caso delle sequenze trasgressivo-regressive, separa il *regressive systems tract* dal *transgressive systems tract*.

In contesti di mare basso, può coincidere con la *ravinement surface*, ma in ogni modo, il termine *transgressive surface* è utilizzato in questo lavoro per indicare una superficie che marca la base di un "*fining-deepening upward trend*".

Detto ciò, una *transgressive surface* può essere identificata secondo due criteri, rispettivamente geometrici e sedimentologici. Nel primo caso, separa depositi con geometria progradazionale da depositi a geometria retrogradazionale (Embry, 1993; 1995); nel secondo caso, è la prima significativa *flooding surface* posta al top del *lowstand systems*

tract (Van Wagoner et alii, 1988, 1990), o comunque la prima *flooding surface* che marca l'ingressione (Haq et alii, 1988).

2.2.4. Maximum flooding surface:

La *maximum flooding surface* è un tipo particolare di *flooding surface*.

Analogamente a quanto visto per la *trasgressive surface*, anche questa superficie può essere individuata secondo due differenti criteri, rispettivamente, geometrici e sedimentologici.

Nel primo caso ("*type A*" surfaces; Catuneanu et alii, 1998), la *maximum flooding surface* segna il passaggio da depositi trasgressivi (o retrogradanti) a depositi regressivi (o progradanti) (Posamentier et alii, 1988; Galloway, 1989). In tal modo, corrisponde alla superficie di *downlap* posta al top del *transgressive systems tract* (Van Wagoner et alii, 1988) e pertanto, può essere definita anche superficie di massima trasgressione o *surface of maximum transgression* (Helland-Hansen & Gjelberg, 1994); questo criterio è utilizzato soprattutto nello studio di profili sismici.

Nel secondo caso, il termine *maximum flooding surface* sta ad indicare la superficie lungo la quale si è raggiunta la massima profondità in sezione verticale e dunque la superficie corrispondente alla massima ingressione ("*type B*" surfaces; Catuneanu et alii, 1998); pertanto, corrisponde ad un periodo di scarso apporto sedimentario e dunque, è generalmente marcata dalla presenza di orizzonti condensati (Vail, 1988).

2.2.5. Regressive surface of marine erosion:

La *regressive surface of marine erosion* è una superficie erosiva di origine marina prodotta nel corso di una regressione forzata della linea

di costa (Plint 1988, Plint & Nummedal, 2000); marca, pertanto, la base dei depositi appartenenti al *forced regressive systems tract* (Hunter & Tucker, 1992, 1995) o *falling stage systems tract* (Plint & Nummedal, 2000).

Comunque, la sua formazione è controllata dal gradiente del bacino e dal tasso di subsidenza e quando presente può essere pavimentata da un *lag* residuale (Plint & Nummedal, 2000).

2.2.6. Sequence boundary:

Come spiegato sopra, i limiti di sequenza possono essere di tipo 1 o di tipo 2.

Un punto molto discusso della stratigrafia sequenziale è, però, quale superficie guida scegliere come limite di sequenza ed inoltre, alcuni autori non sono concordi neppure nel ritenere che come limite di sequenza debbano essere considerate necessariamente superfici legate ad abbassamenti relativi del livello marino.

Le opinioni a riguardo sono riassumibili nelle seguenti posizioni:

1) modello tradizionale (VAIL *et alii*, 1977; Michtum *et alii*, 1977): la sequenza si deposita durante un ciclo di variazione eustatica, che inizia e termina in vicinanza di due successivi punti di flesso situati in corrispondenza dei tratti in discesa della curva del livello marino.

2) stratigrafia genetica (Galloway, 1989): individua delle sequenze delimitate dalla superficie di massima ingressione (*maximum flooding surface*), che presenta il vantaggio di essere una superficie di facile riconoscimento, soprattutto nel caso di limiti di sequenza tipo 2.

3) Diverse opinioni sulla posizione del limite di sequenza derivano dall'interpretazione che viene data ai depositi di "regressione erosiva",

ovvero se vengono considerati come parte del sovrastante *lowstand systems tract*, parte del sottostante *highstand systems tract*, oppure un *systems tract* a sé stante.

Nel caso in cui i depositi di “regressione erosiva” sono considerati parte dell’*lowstand systems tract*, è inevitabile posizionare il limite alla base dei depositi di “regressione erosiva”, in corrispondenza di una superficie erosiva di regressione marina (*regressive surface of marine erosion*) (Posamentier *et alii*, 1992; Ainsworth & Pattison, 1994; Morton & Suter, 1996); questa soluzione in pratica è riconducibile al caso 1, ovvero al caso della stratigrafia sequenziale classica e deriva dall’interpretazione dei depositi di “regressione erosiva” come depositi di tipo 1.

Nel caso invece che i depositi di “regressione erosiva” sono considerati parte dell’*highstand systems tract*, il limite di sequenza è posizionato in corrispondenza della superficie erosiva più evidente, al di sotto della quale tutti i depositi vengono attribuiti al ciclo precedente.

Se, infine, questi depositi sono considerati un *systems tract* diverso (Hunt & Tucker, 1992), viene riconosciuto valore di limite di sequenza alla superficie poligenica che si forma alla sommità dei depositi di “regressione erosiva” (superficie di *bypass*); i depositi di “regressione erosiva” in questo caso sono intesi di tipo 2 ed in questa accezione, una sequenza si svilupperebbe tra due minimi successivi della curva di oscillazione del livello marino relativo.

4) Gli Autori che riconoscono l’esistenza dell’*regressive systems tract* (Naish & Kamp, 1997), pongono il limite di sequenza tra le sequenze cicliche sopra i depositi di caduta.