



# ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS Y MODELOS SEDIMENTARIOS



# INDICE

## **MÓDULO 1. INTRODUCCIÓN**

- 1.1. Sistemas y Modelos Sedimentarios y Estratigráficos
- 1.2. Parámetros y factores que controlan los procesos y patrones de depositación

## **MÓDULO 2. SECUENCIAS ESTRATIGRÁFICAS**

- 2.1. Generalidades
- 2.2. Sistemas depositacionales
- 2.3. Superficies estratigráficas claves

## **MÓDULO 3. PRINCIPALES MODELOS SEDIMENTARIOS CLÁSTICOS**

- 3.1. Generalidades
- 3.2. Caracterización y reconocimiento de los principales modelos sedimentarios fluviales
- 3.3. Caracterización y reconocimiento de los principales modelos sedimentarios deltaicos
- 3.4. Caracterización y reconocimiento de los principales modelos sedimentarios próximo-costeros
- 3.5. Caracterización y reconocimiento de los principales modelos sedimentarios marino-profundos

## **MÓDULO 4. MODELOS SEDIMENTARIOS CARBONÁTICOS**

- 4.1. Características sedimentarias generales
- 4.2. Sistemas depositacionales carbonáticos.
- 4.3. Superficies estratigráficas claves



# MÓDULO 1



# INTRODUCCIÓN

**Sistemas y Modelos Sedimentarios y Estratigráficos**



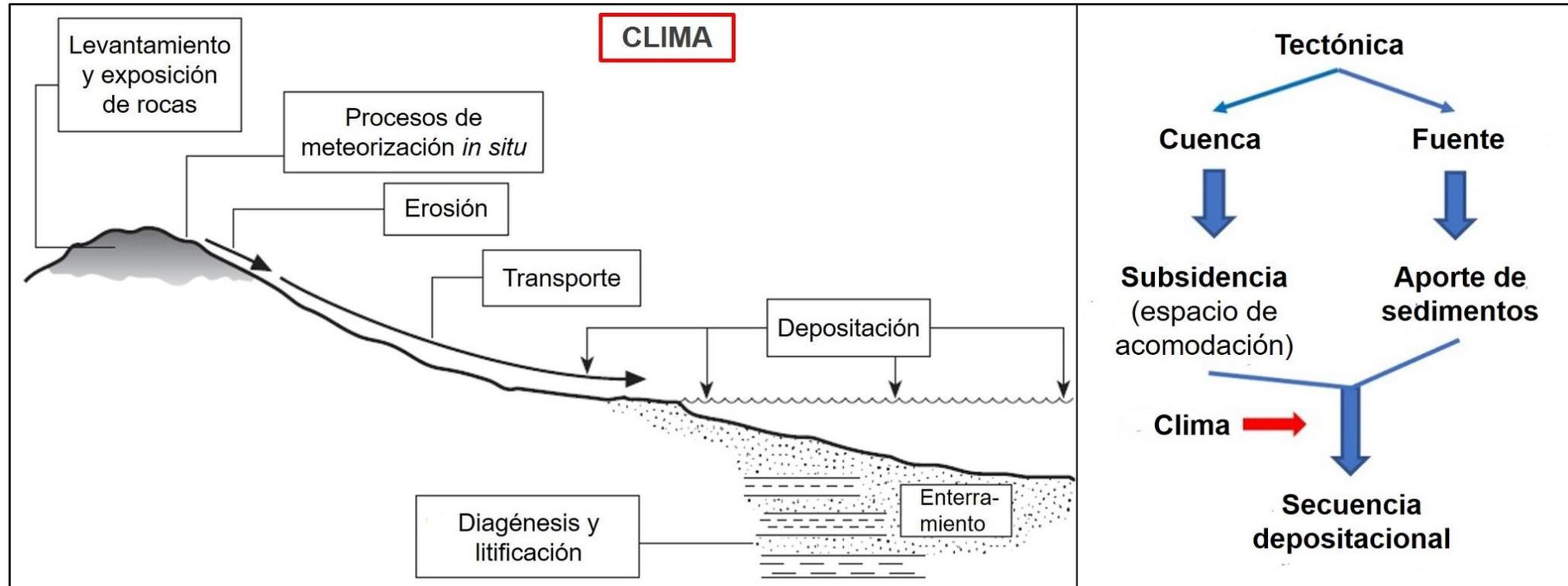


Fig. 1.1. Procesos envueltos en la formación de una sucesión de rocas sedimentarias clásticas. El clima es un factor de primer orden que incide directamente en los procesos de meteorización y erosión de la roca fuente, en el transporte de los sedimentos y en los cambios eustáticos del nivel del mar. La tectónica dentro y fuera de la cuenca incidirá en el régimen de subsidencia de la misma y en el levantamiento de las áreas fuentes, respectivamente. Modificado de Nichols (2008) y Zabala *et al.* (2009).



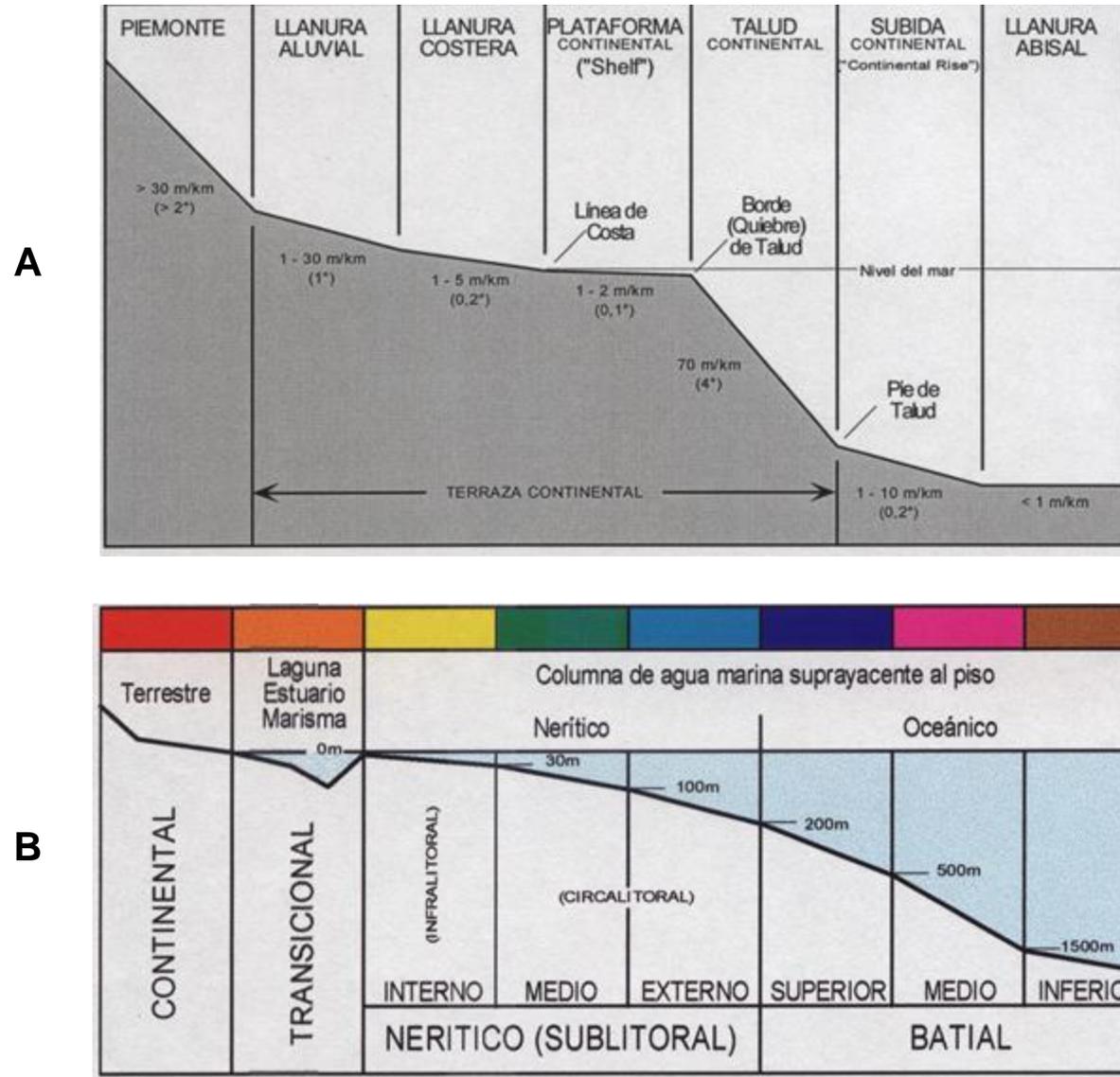


Fig. 1.2. A) Morfología y B) batimetría marina en bordes cotinentales



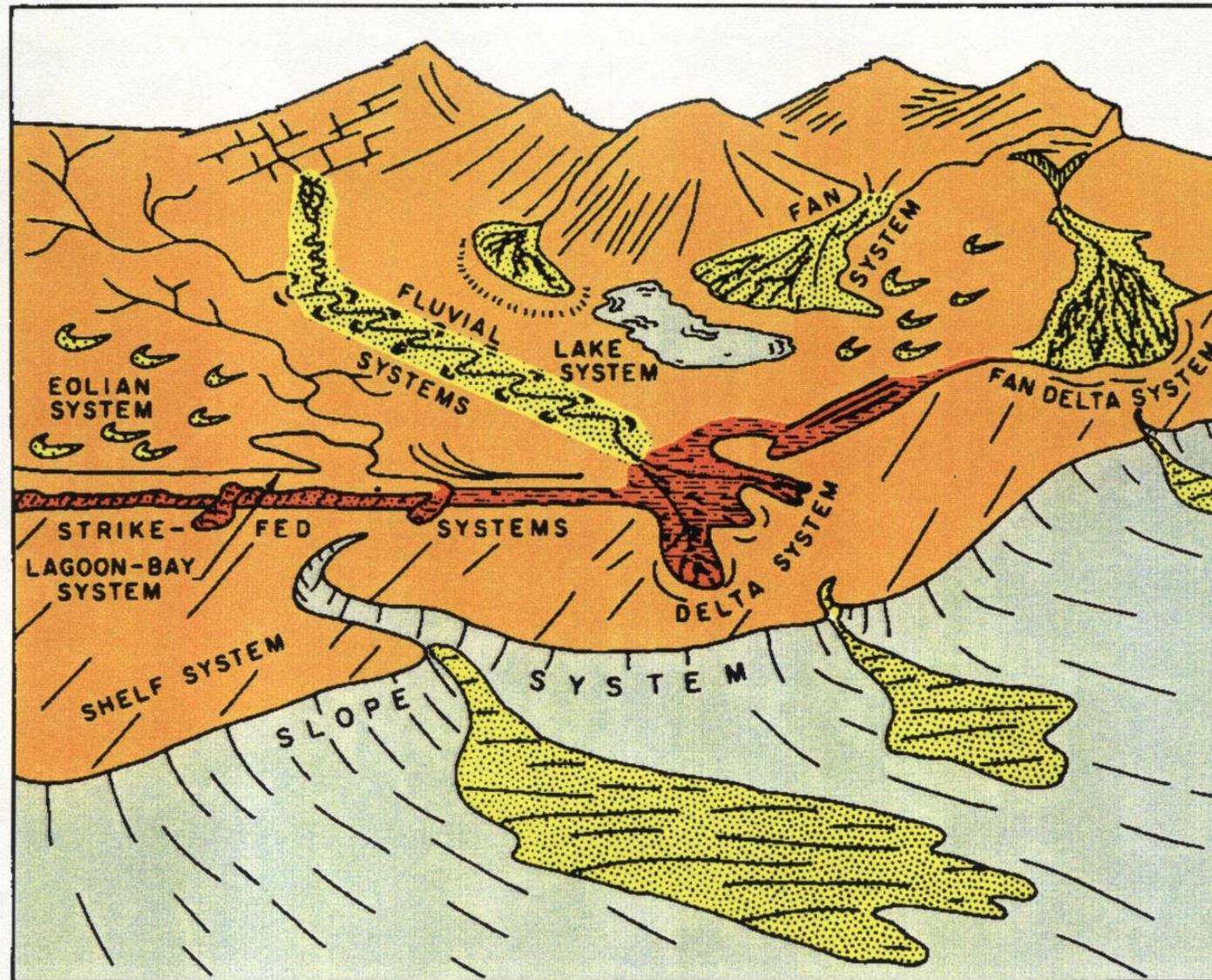
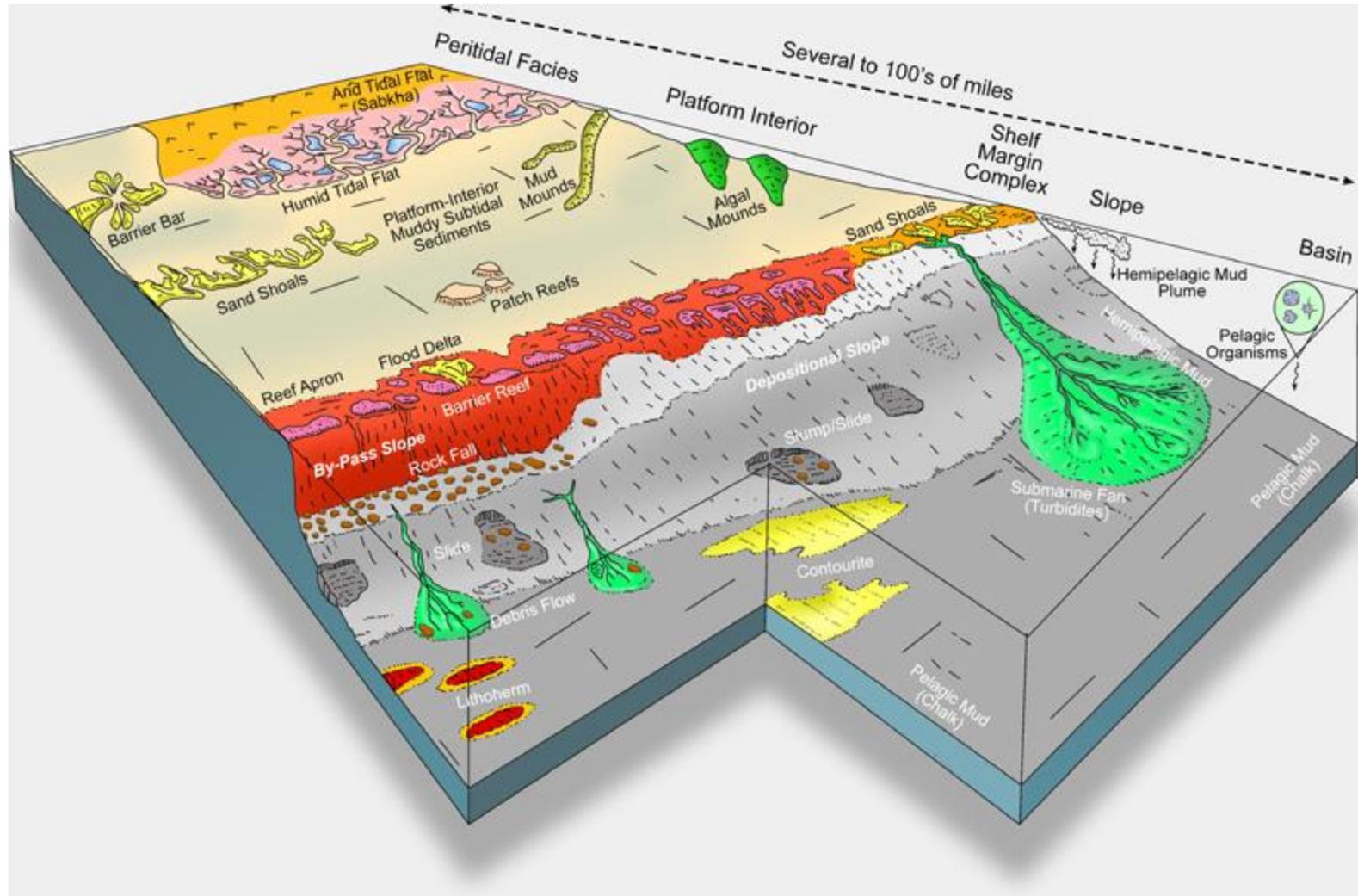


Fig. 1.3. Resumen de los principales sistemas sedimentarios clásticos (Lugo, 1997)





1.4. Modelo deposicional de una plataforma carbonática somera y la distribución de importantes elementos arquitecturales y facies. Modificado de Loucks *et al.* (2003).



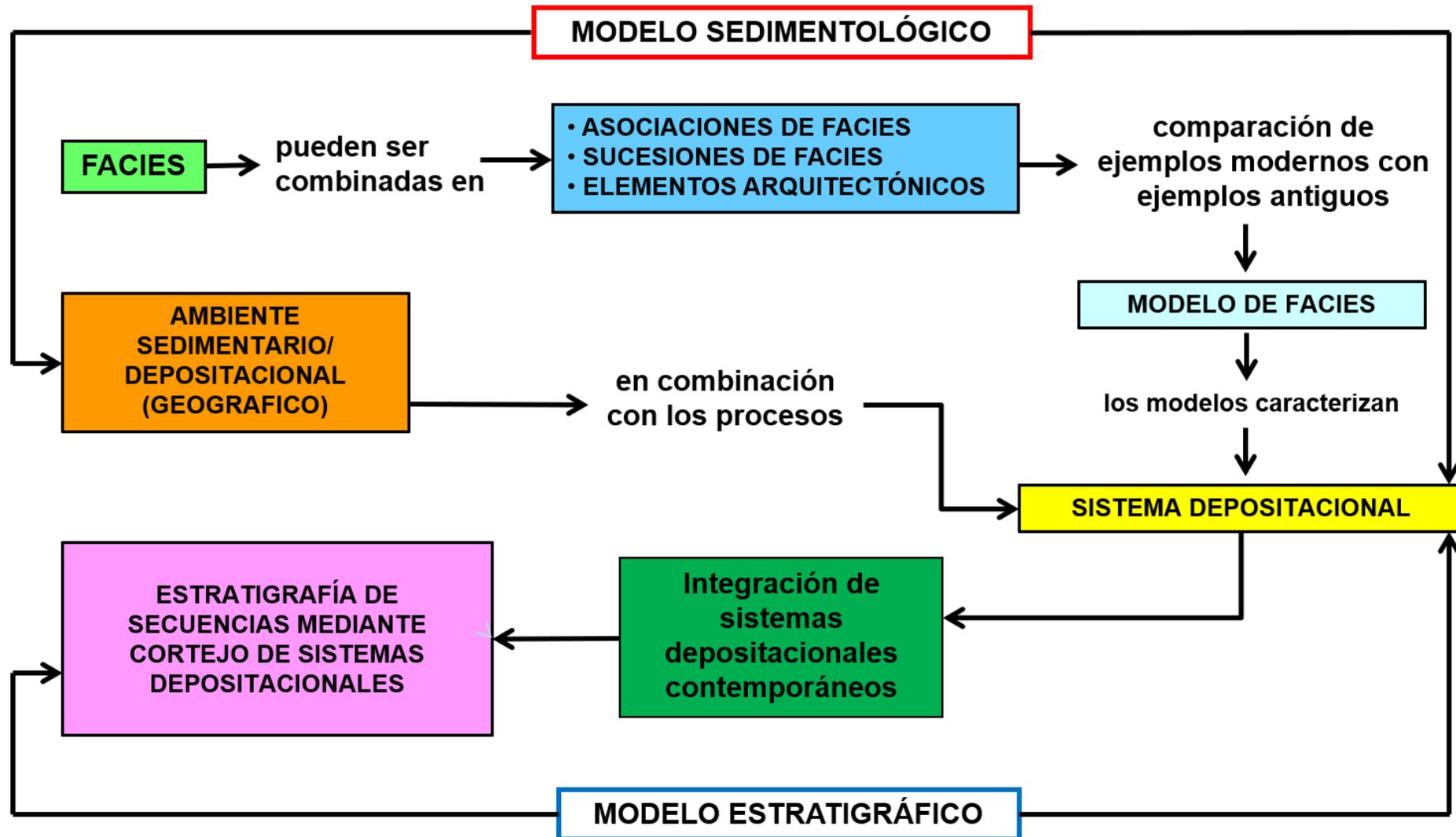
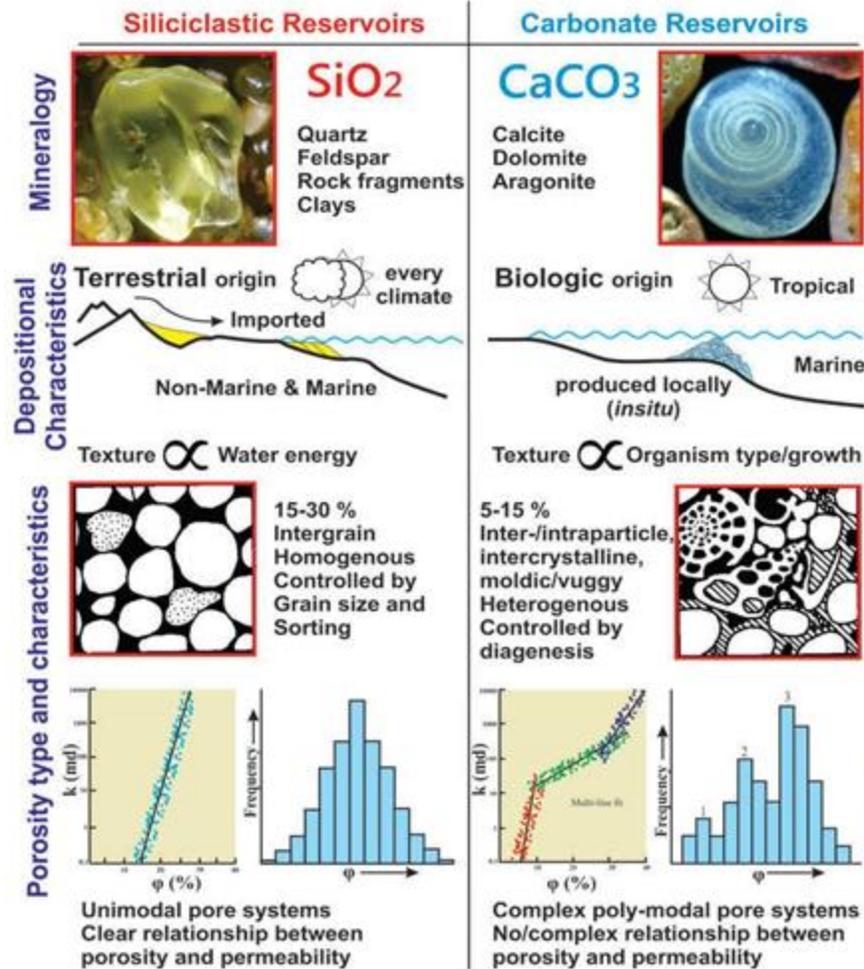


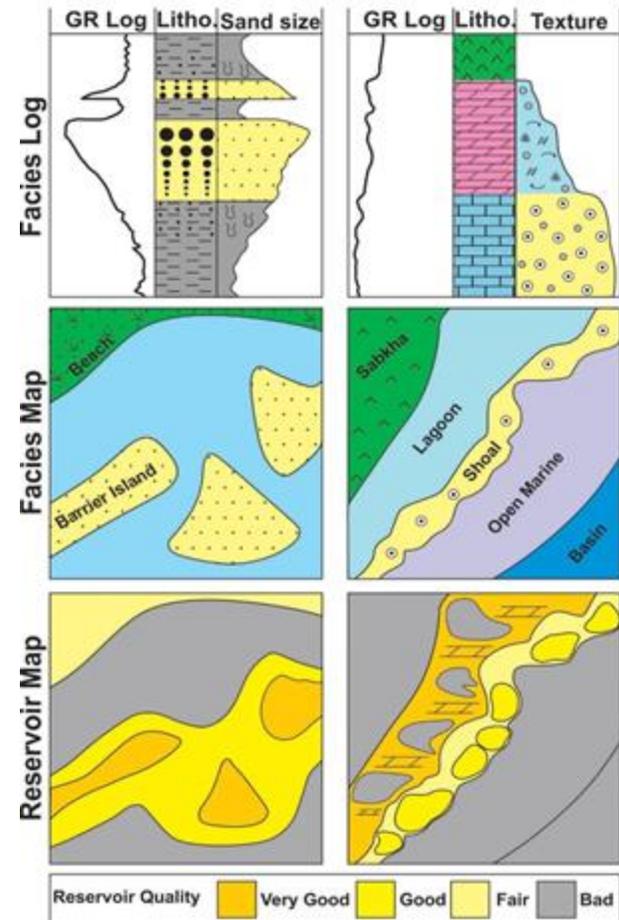
Fig. 1.5. Relaciones entre facies, ambiente de sedimentación, sistema de sedimentación y sistemas encadenados.





© B. Esrafil-Dizaji, 2021

**Sandstone Reservoir vs. Carbonate Reservoir**



© B. Esrafil-Dizaji, 2021

Fig. 1.6. Principales diferencias sedimentarias entre yacimientos clásticos y carbonáticos. (Tomado de Claude Morgan (2021), Mexico Petroleum Geoscience Group. <https://www.facebook.com/groups/430159417618680>)



## MODELO ESTÁTICO DE YACIMIENTOS

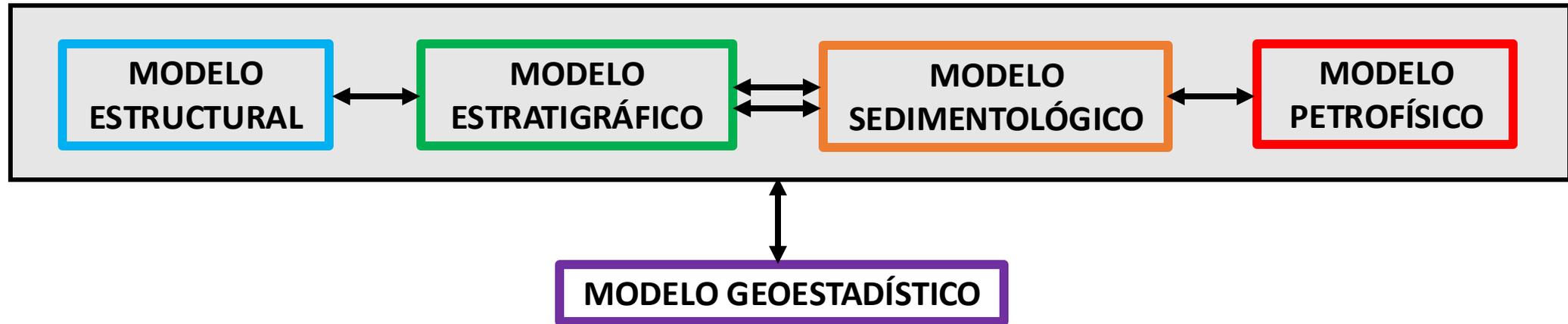


Fig. 1.7. Etapas a cubrir en el Modelaje Estático de Yacimientos



## **MODELO SEDIMENTARIO O SEDIMENTOLÓGICO**

Define el ambiente sedimentario, la geometría, la orientación, la distribución y la calidad sedimentológica de los yacimientos y unidades de flujo, sus límites laterales y barreras verticales, tomando en consideración las características litológicas obtenidas a partir de la correlación núcleo / perfil, muestras de canal y de pared (Fig. 1.7).

## **MODELO ESTRATIGRAFICO**

Identifica y caracteriza las unidades cronoestratigráficas, los ciclos de sedimentación / depositación y su extensión espacial, a partir del análisis de núcleos o corazones, perfiles de pozos y el apoyo de estudios bioestratigráficos y sismoestratigráficos, para así definir los principales geocuerpos como yacimientos, sus límites y su distribución espacial y temporal (Fig. 1.8).



## Modelo Sedimentológico



Fig. 1.8. Diagrama ilustrativo de las actividades y objetivos a ser alcanzados con la elaboración de un modelo sedimentológico de yacimientos petrolíferos. Fuente: [http://www.petrociencia.com.ve/Msedi\\_estra.php](http://www.petrociencia.com.ve/Msedi_estra.php)



## Modelo Estratigráfico

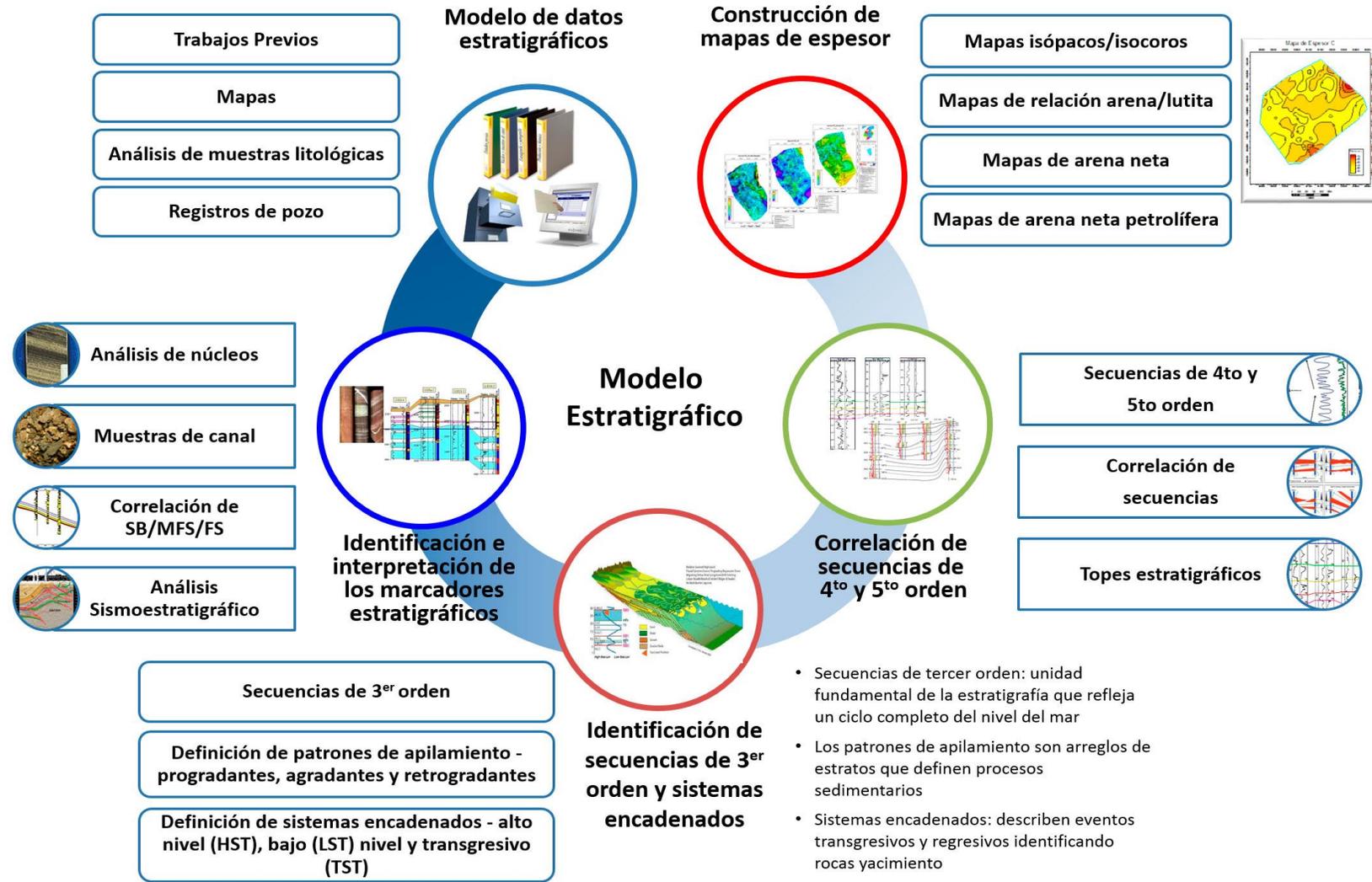


Fig. 1.9. Diagrama ilustrativo de las actividades y objetivos a ser alcanzados con la elaboración de un modelo estratigráfico de yacimientos petrolíferos. Fuente: [http://www.petrociencia.com.ve/Msedi\\_estra.php](http://www.petrociencia.com.ve/Msedi_estra.php)

## UN BUEN MODELO SEDIMENTARIO ES LA BASE DE UN BUEN MODELO ESTRATIGRAFICO

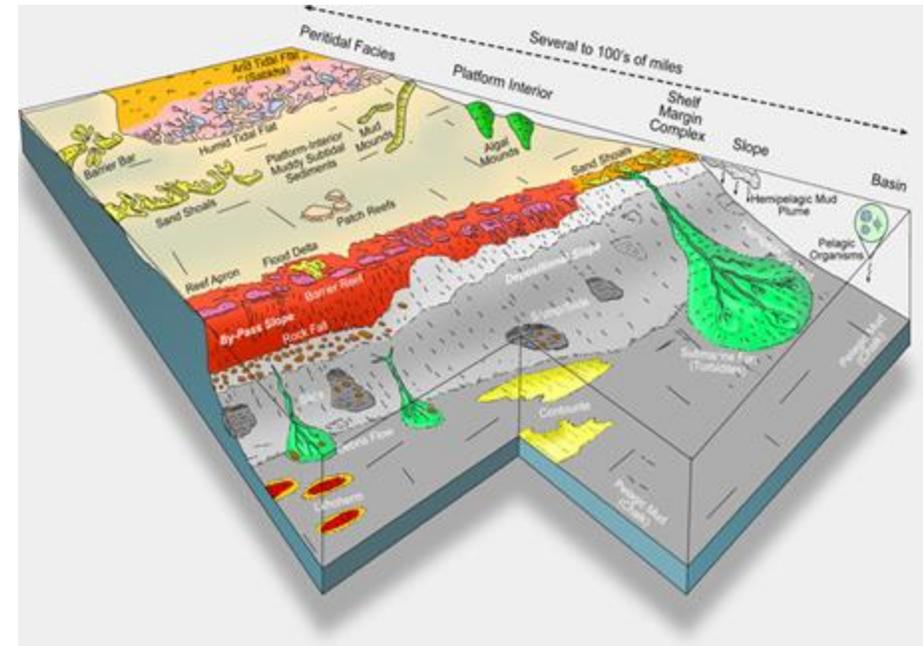
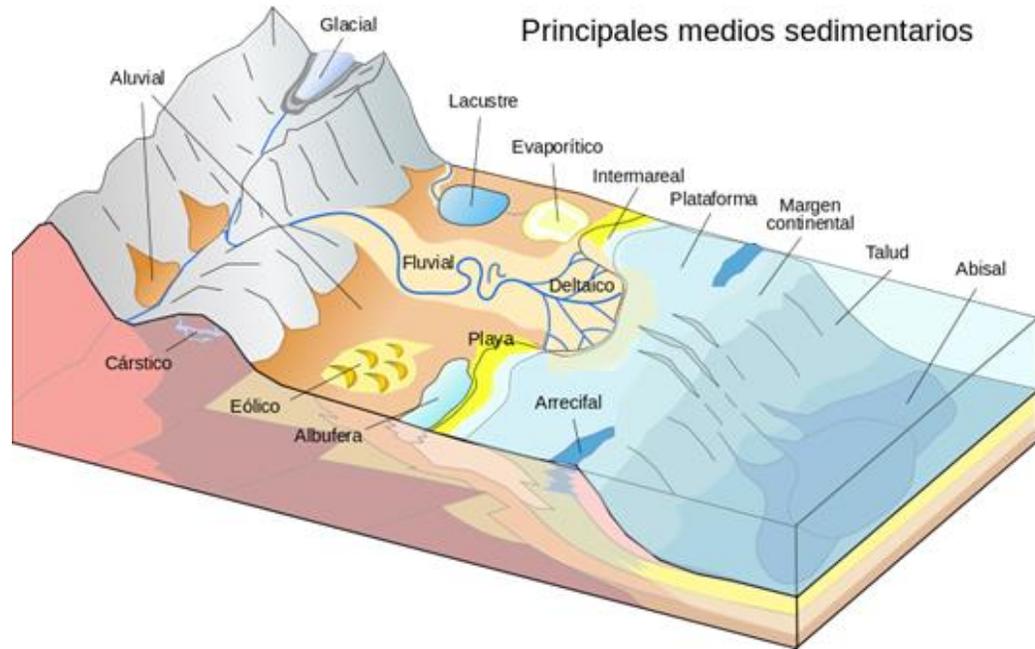


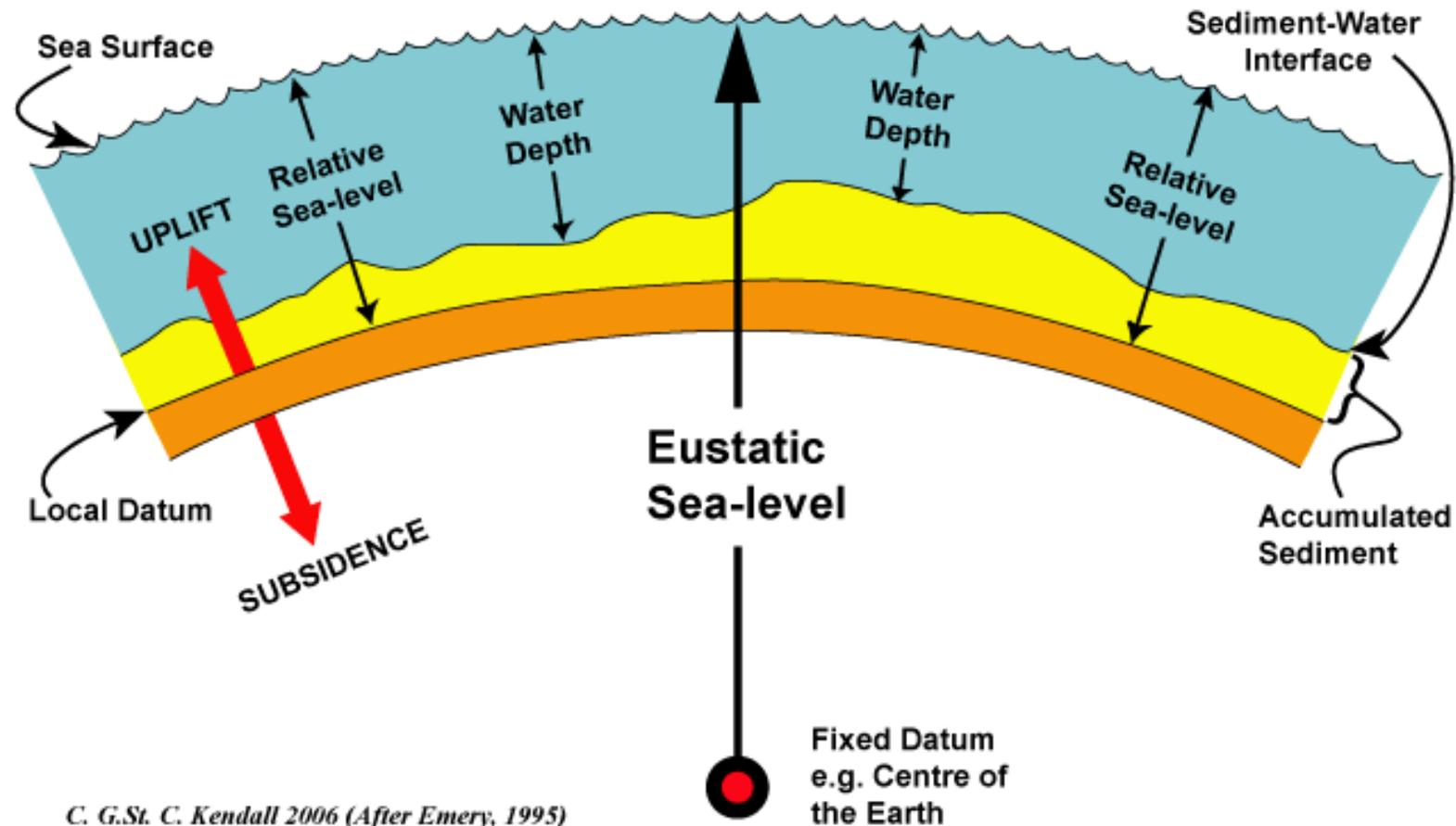
Fig. 1.10. Ambientes y sistemas sedimentarios siliciclásticos y carbonáticos. Los procesos físicos y químicos actúan principalmente para siliciclásticos; mientras que en los carbonatos, los procesos químicos y biológicos predominan.



# INTRODUCCIÓN

**Parámetros y factores que controlan los procesos y patrones de depositación**





*C. G.St. C. Kendall 2006 (After Emery, 1995)*

Fig. 1.11. Eustacia, nivel relativo del mar y profundidad de agua, como una función de la superficie del mar, el fondo del mar y la posición del datum del substrato (Tomado de Kendall, 2006)



**Transgresión y Regresión:** eventos responsables de los depósitos sedimentarios sobre los márgenes continentales, basicamente sobre la plataforma; aunque registros de regresión se pueden presentar sobre el talud y la planicie oceánica proximal.

- La transgresión y la regresión son términos que se refieren a los procesos de migración de la línea de costa sobre la plataforma, en dirección al continente o hacia el mar, a través del tiempo geológico.
- Las transgresiones están controladas por una interrelación entre el aporte de sedimentos y el ascenso relativo del nivel del mar, cuando la tasa de ascenso del nivel del mar supera a la de aporte sedimentario.
- Si el nuevo espacio creado sobre la plataforma (acomodamiento) excede a la cantidad de sedimentos introducidos, entonces la línea de costa se desplaza hacia el continente y se dice que el mar ha transgredido y los sedimentos retrogradado (Fig. 1.12, 1.15).
- Las regresiones ocurren cuando el influjo neto de sedimentos excede la capacidad del nuevo espacio creado (acomodamiento) durante un ascenso relativo del nivel del mar, de tal manera que la línea de costa se desplaza hacia el mar (regresión normal). Se dice entonces que el mar ha progradado, al igual que los sedimentos (Fig. 1.12, 1.15). Una regresión también puede ocurrir durante una etapa de muy lento ascenso o detenimiento del nivel relativo del mar (Fig. 1.17), como también durante un descenso del mismo (regresión forzada; Fig.1.14).
- Las regresiones normales son observadas comunmente en los complejos de progradación de los sistemas depositacionales de nivel alto (HST) y nivel bajo (LST) final o tardío.



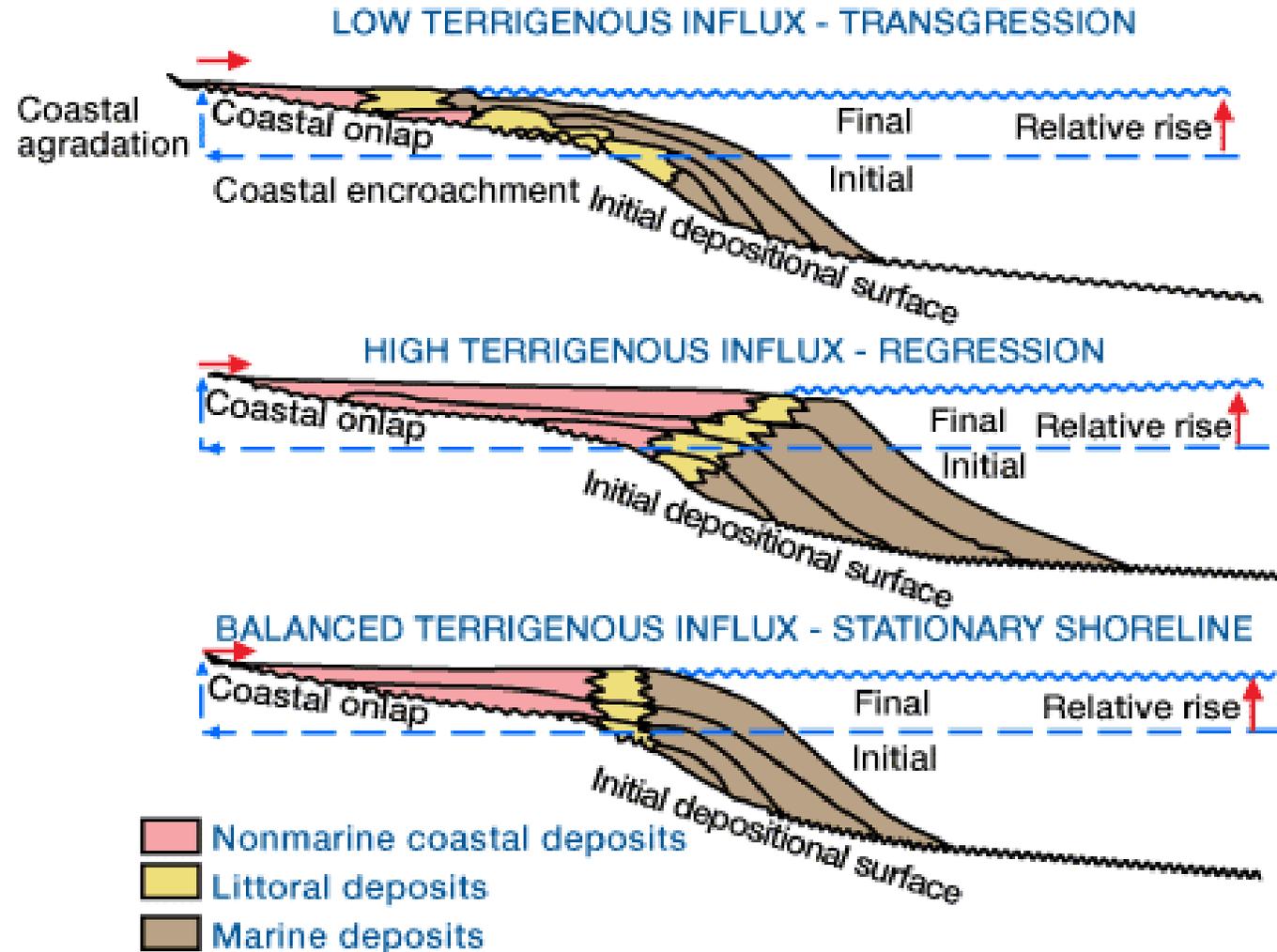
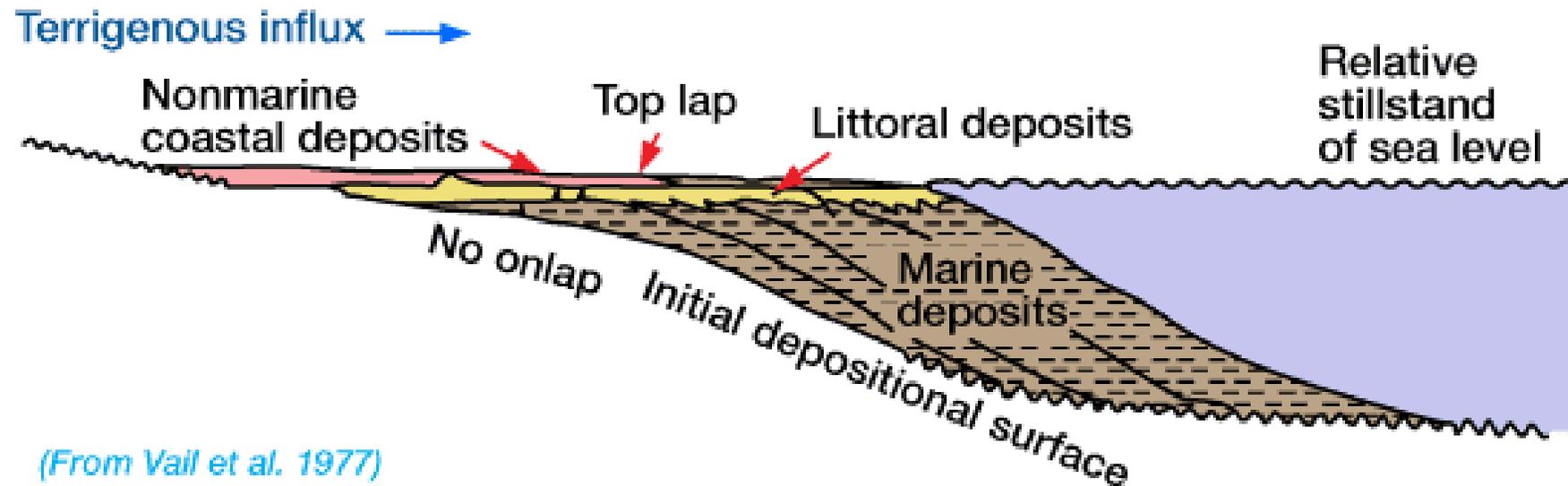


Fig. 1.12. Esquemas diagramáticos que muestran los procesos de transgresión, regresión y solapamiento costero (coastal onlap) durante un ascenso relativo del nivel del mar. La tasa de influjo de terrígenos determina si la transgresión, la regresión o la línea de costa estacionaria, se producen durante el ascenso relativo del nivel del mar. (Tomado de Vail et al., 1977)





*(From Vail et al. 1977)*

Fig. 1.13. La progradación sedimentaria con mínima o ninguna agradación indica que el nivel relativo del mar ha permanecido estático en un momento dado (usualmente luego de un ascenso máximo). Sin ningún ascenso relativo del nivel de base, los depósitos costeros no marinos y/o litorales no pueden apilarse agradacionalmente, por lo cual no se produce acuñaamiento costero, pero si se produce la progradación sin agradación (toplap). (Tomado de Vail et al., 1977)



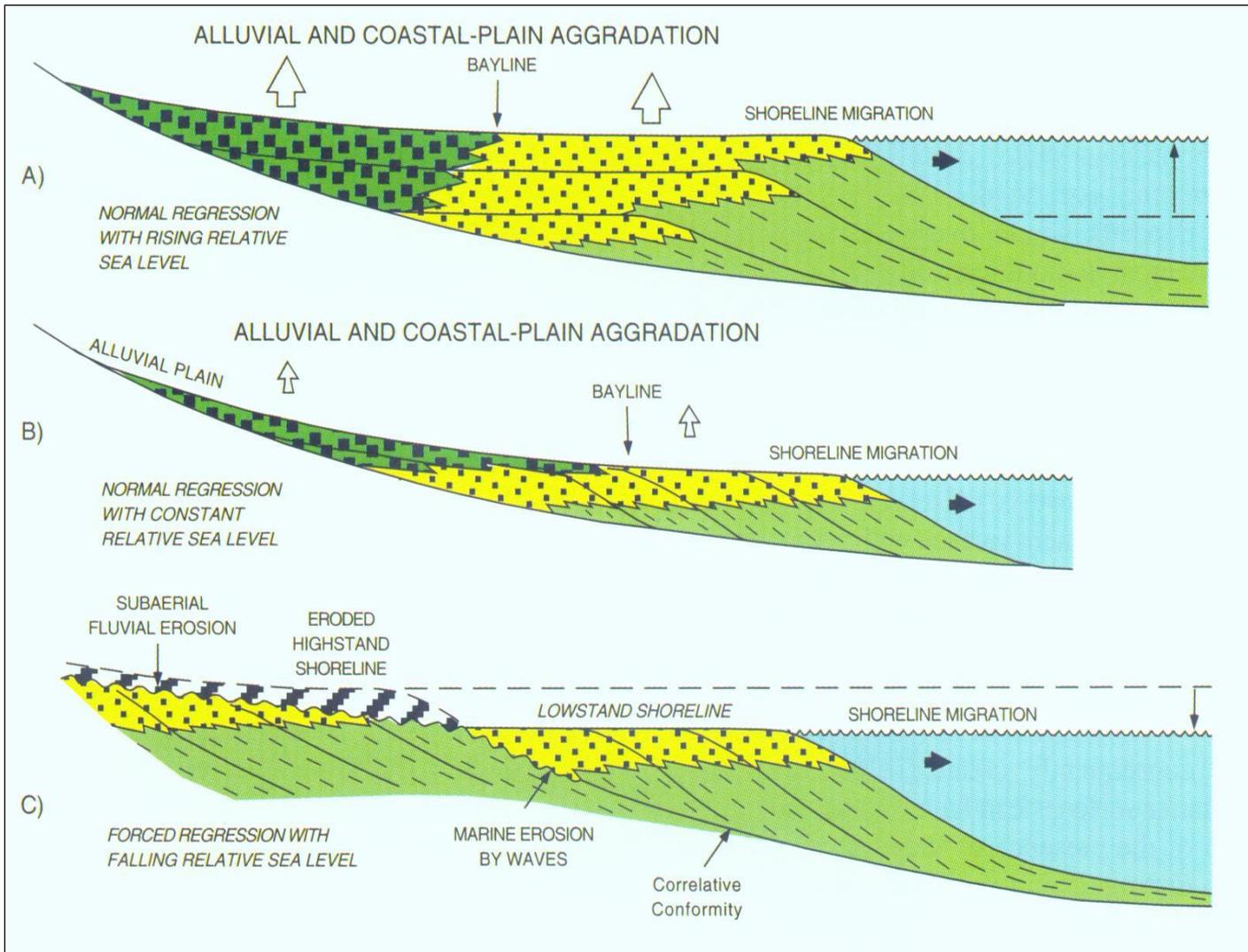


Fig. 1.14. Regresiones normal y forzada. A y B) representan regresiones normales que ocurren durante un ascenso y un detenimiento (stillstand) del nivel relativo del mar, respectivamente, cuando la tasa de aporte de sedimentos excede a la tasa de nuevo espacio adicional (nuevo acomodo). C) representa la regresión forzada que ocurre cuando el nivel relativo del mar cae. Los depósitos costeros de lowstand quedan separados por una zona de transito sedimentario (bypass) de los depósitos costeros del highstand infrayacente y se forma una "discordancia" en la base de la parte proximal de los depósitos de lowstand y una superficie concordante correlativa en la parte distal. Note que la regresión normal está asociada con agradación y progradación, mientras que la regresión forzada se asocia con descenso y progradación de los depósitos (Tomado de Posamentier and Allen, 1999)



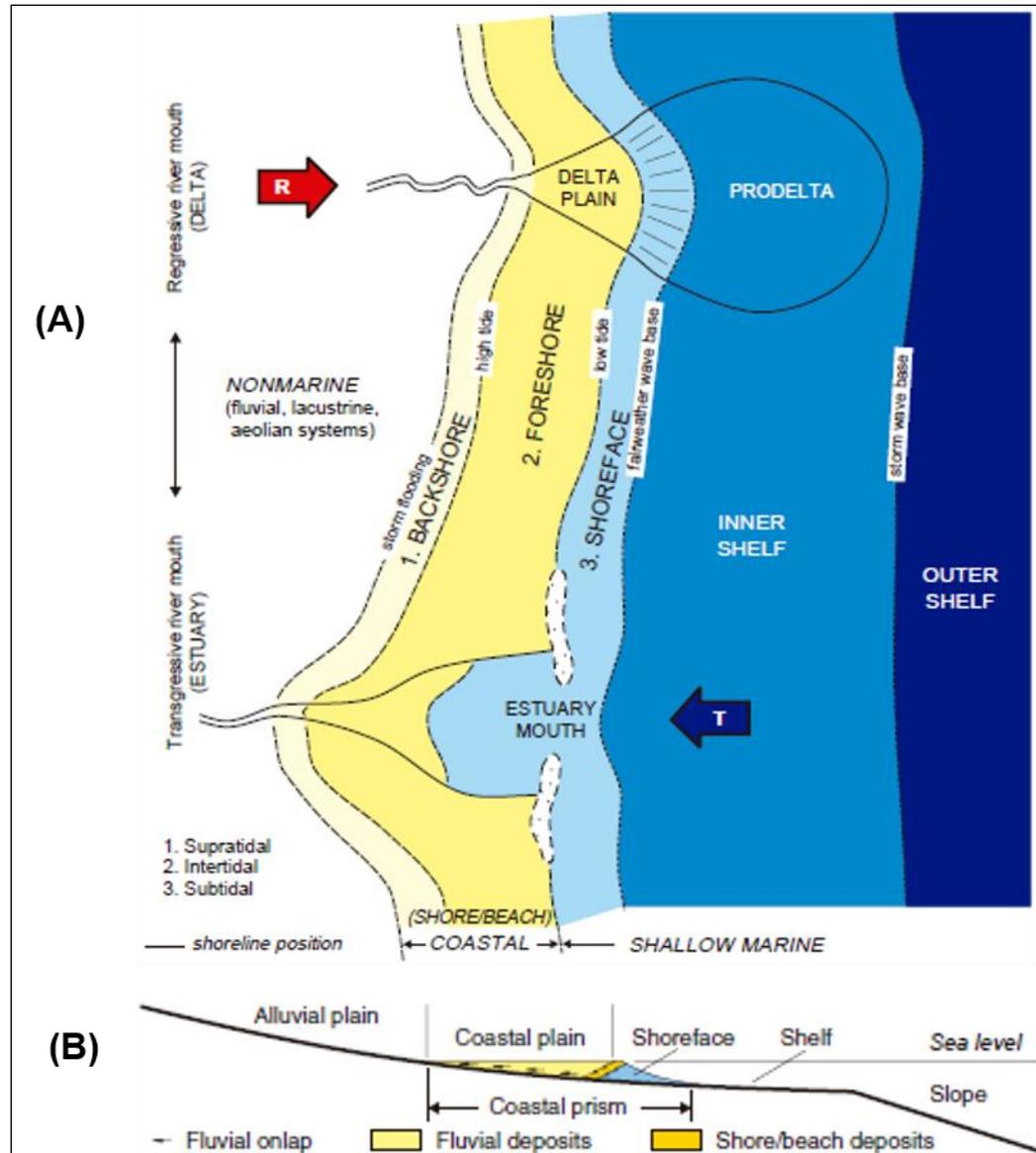


Fig. 1.15. (A) Transición de ambientes marinos a no-marinos. Las flechas grandes indican el cambio en la posición de la franja costera en los dos ambientes de desembocadura fluvial (R: regresivo; T: transgresivo). Note que el carácter de la costa (transgresivo vs regresivo) puede cambiar a lo largo del rumbo debido a variaciones en la subsidencia y aporte de sedimentos. (B) Perfil orientado con el buzamiento ilustrando los principales ambientes depositacionales y geomorfológicos de una plataforma continental: planicie aluvial, planicie costera, franja costera (incluye los ambientes intermareal y supramareal) y marino somero (anteplaya y plataforma). (Tomado de Catuneanu, 2005)



## CICLICIDAD Y RITMICIDAD ESTRATIGRAFICA

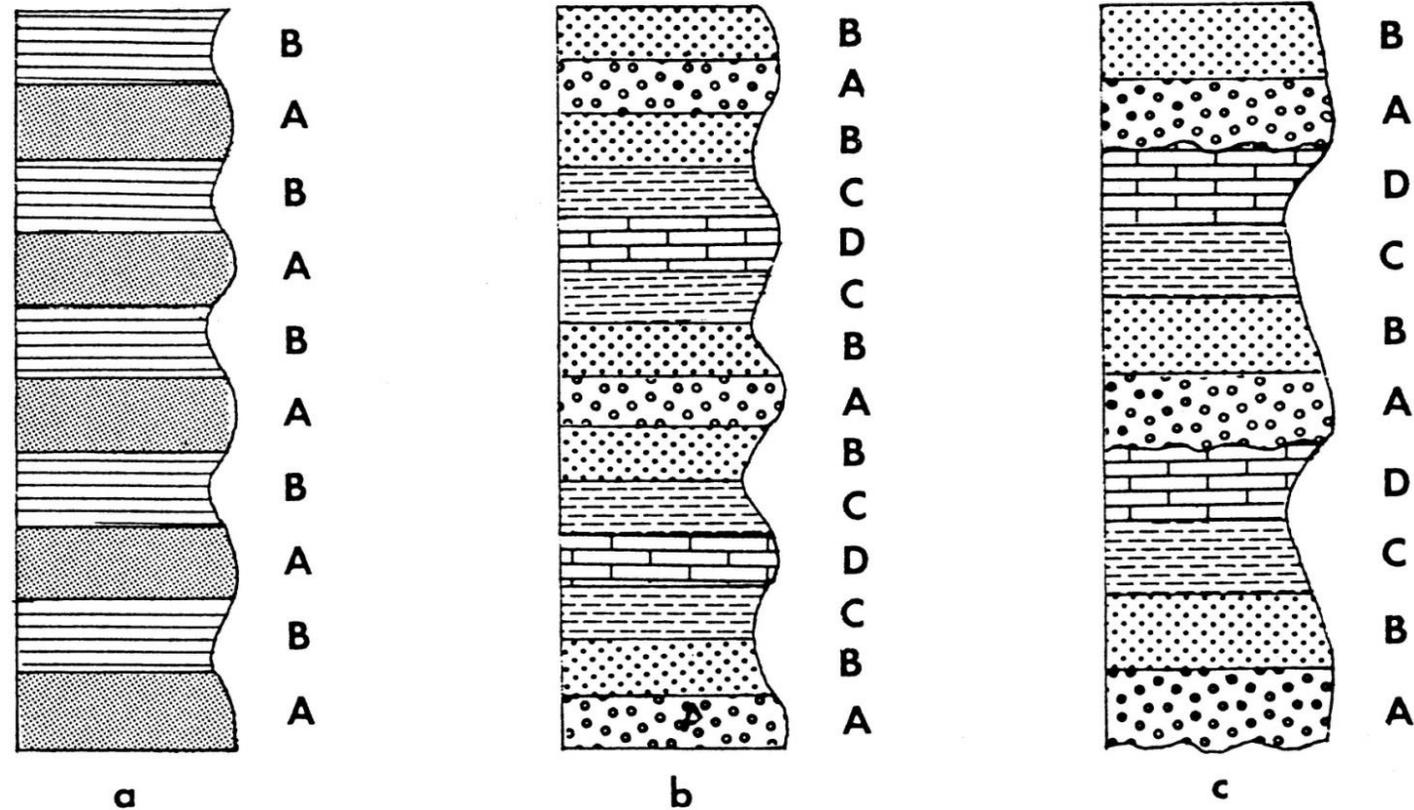


Fig. 1.16 .Disposición vertical de facies y secuencias depositadas en función los cambios relativos del nivel del mar: (a) alternancia; (b) ciclo; (c) ritmo. (Tomado de Corrales et al., 1978)



## TENDENCIAS DEPOSITACIONEALES

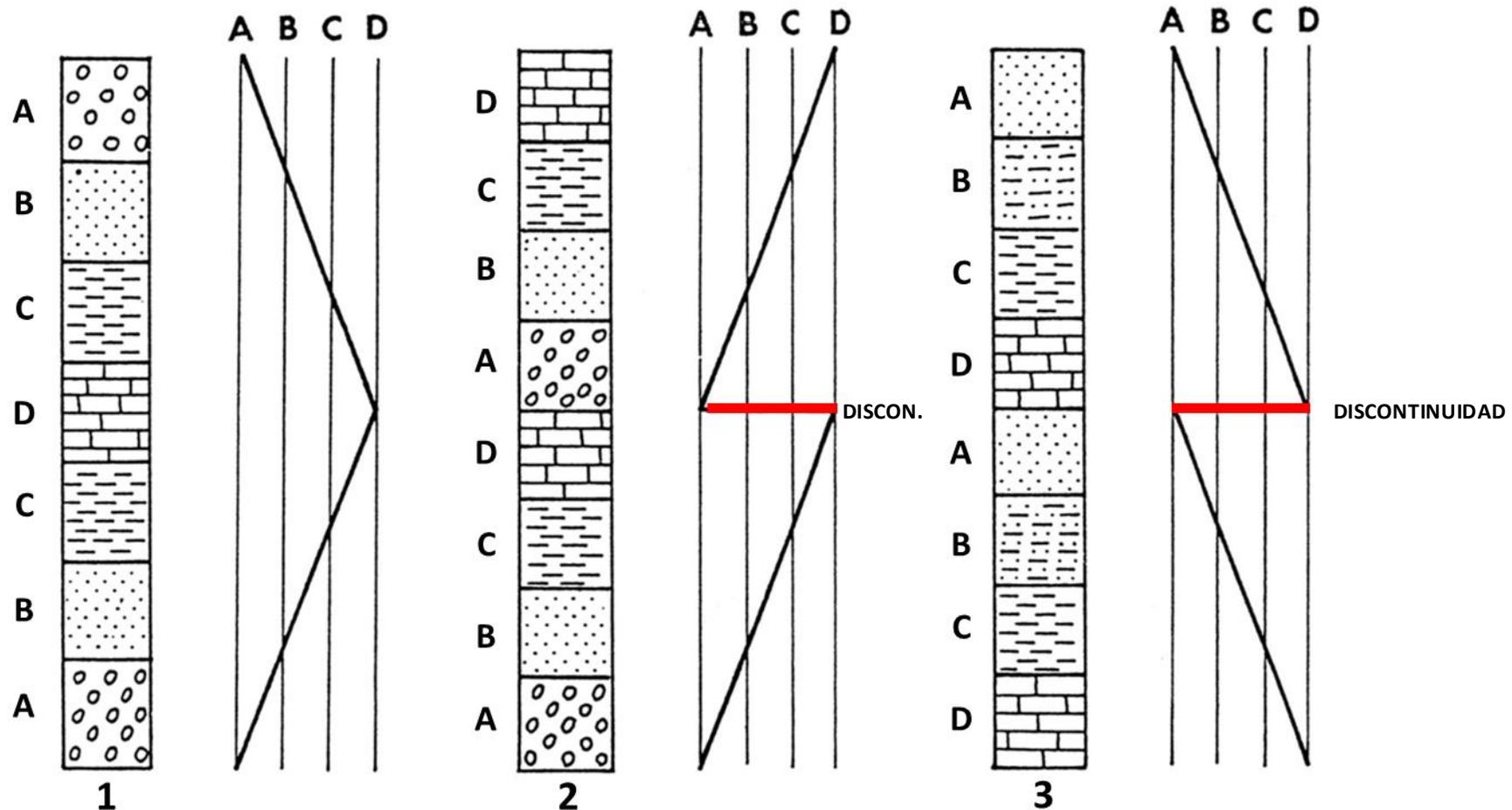


Fig. 1.17. Tendencias de secuencias sedimentarias en función de los cambios relativos del nivel del mar. 1) secuencia cíclica simétrica transgresiva-regresiva; 2) secuencia cíclica asimétrica transgresiva; 3) secuencia cíclica asimétrica regresiva. Recuerde siempre que los eventos depositacionales son cíclicos. (Modificado de Corrales et al., 1978)



## CICLOS EUSTÁTICOS

- Son intervalos de tiempo geológico durante los cuales se produce a escala global, un ascenso y un descenso del nivel medio del mar (Fig. 1.18)
- Se han reconocido seis (6) órdenes de ciclos eustáticos: ciclos de primero a sexto orden o megaciclos, superciclos, ciclos y paraciclos eustáticos de cuarto a sexto orden.
- Los ciclos de primer orden (megaciclo) duran más de 50 m.a., los de segundo orden (superciclo) oscilan entre 3 y 50 m.a., los de tercer orden (ciclo) varían entre 0,5 y 3 m.a. y los de cuarto, quinto y sexto orden (paraciclos) tienen una duración entre 0,08 y 0,5 m.a., 0,08 y 0,03 m.a. y 0,03 y 0,01 m.a., respectivamente (Fig. 1.19).



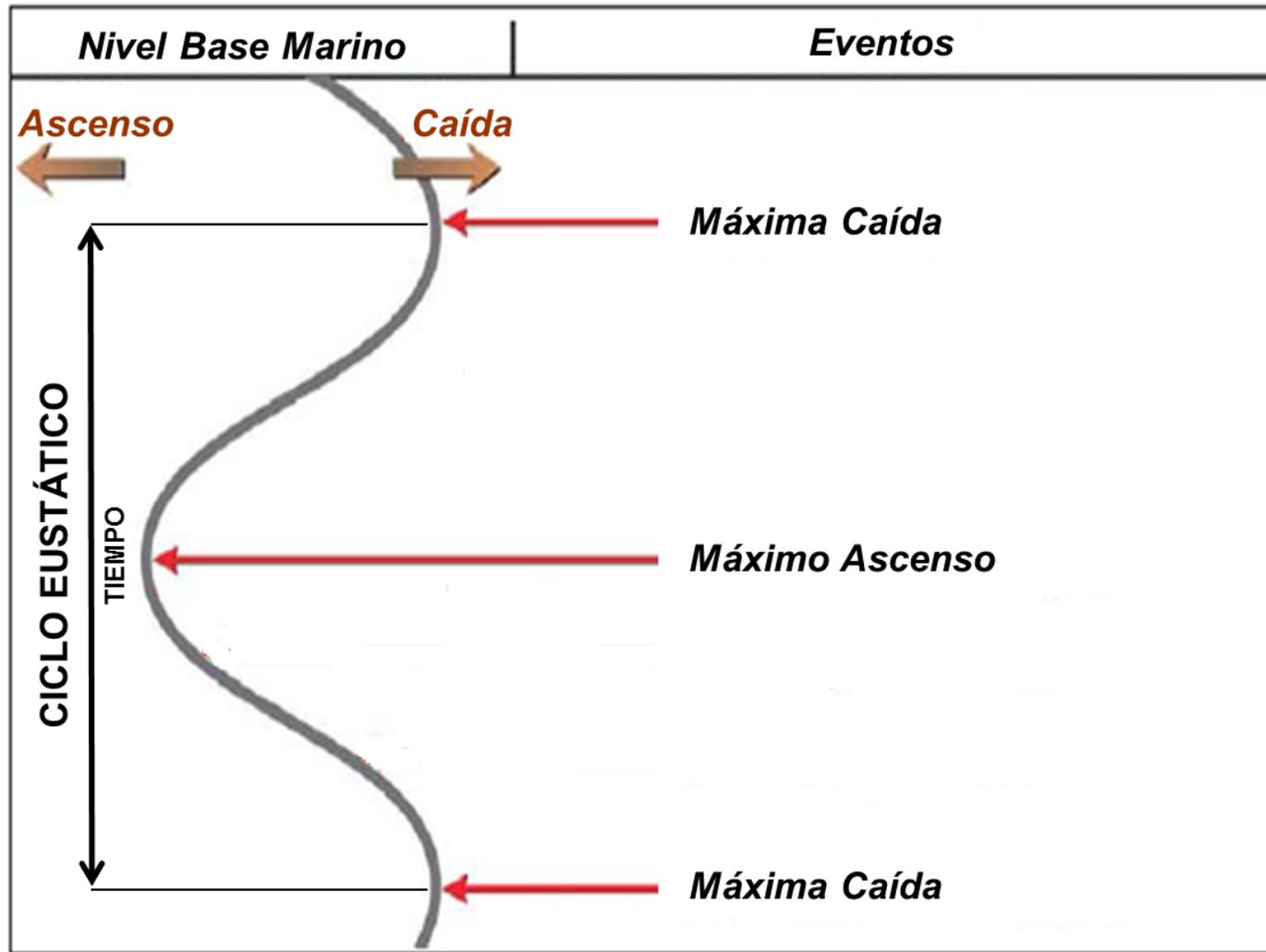


Fig. 1.18. Curva de cambios del nivel base marino ilustrando un ciclo eustático definido como el tiempo transcurrido entre un ascenso y una caída del nivel base marino. Durante el ascenso se producen regresiones normales y transgresiones, mientras que durante la caída se produce una regresión forzada. (Modificado de Embry, 2009)



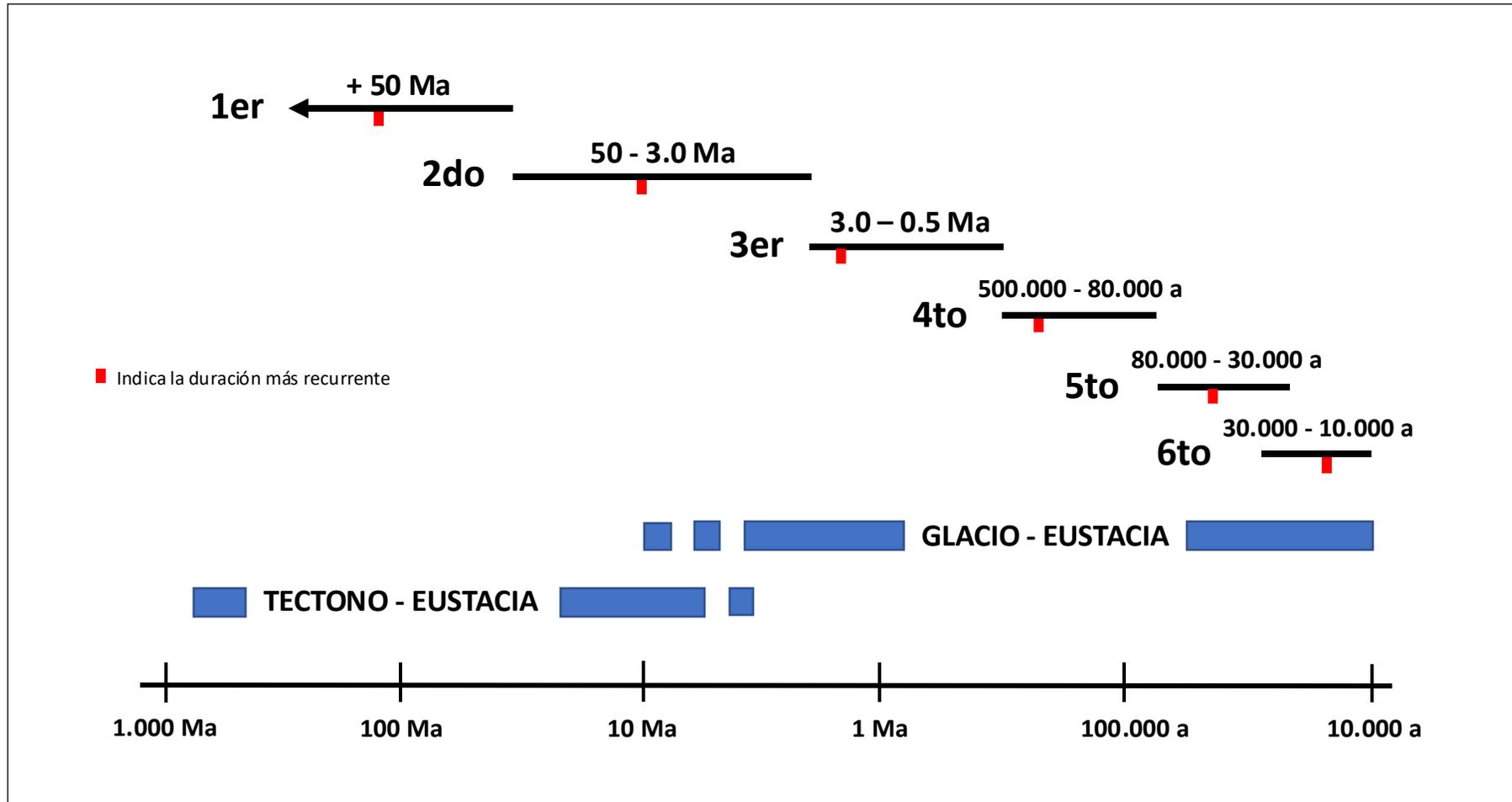


Fig. 1.19. Jerarquía de los Ciclos Eustáticos. Los ciclos de primero a tercer orden se denominan: megaciclos, superciclos y ciclos; mientras que los ciclos menores de cuarto a sexto orden se denominan paraciclos eustáticos. La sucesión sedimentaria acumulada durante un ciclo eustático corresponde a un Ciclo Estratigráfico, el cual se designa con el mismo grado jerárquico del respectivo ciclo: megasecuencia (1er), supersecuencia (2do), secuencia (3er) y parasecuencias (4to, 5to y 6to). Modificado de Mitchum y Sangree (1998)

## CAUSAS DE LOS CICLOS EUSTÁTICOS

- A escala global pueden ser producidos por: a) un cambio en el volumen de agua de los océanos, b) por el cambio en la forma de las cuencas oceánicas o c) por una combinación de ambos.
- Un cambio en el volumen de agua puede ser debido principalmente a glaciaciones y desglaciaciones o por suministro de agua desde fuentes magmáticas.
- Un cambio en la forma de las cuencas oceánicas puede ser producido por mecanismos geotectónicos o por el relleno sedimentario de las cuencas.
- Los mecanismos geotectónicos parecen ser los responsables de los ciclos de 1º y 2º orden: expansión del piso oceánico, subducción y orogénesis.
- La glaciación y la desglaciación causan la mayoría de los ciclos de 3º orden y algunos de 2º orden, especialmente aquellos del Neogeno Tardío.
- Exceptuando las glaciaciones, los cambios volumétricos en las cordilleras centro oceánicas es potencialmente la más rápida y volumétricamente la más significativa manera para cambiar el nivel del mar. La tendencia decreciente de los ciclos de 1º orden a partir del Cretácico pueden ser explicados por esta teoría.
- Hay cierta correspondencia entre tiempos de movimientos orogénicos y vulcanismo con tiempos de nivel alto del mar en ciclos de 2º orden.
- Los ciclos de 4º, 5º y 6º orden son causados por eventos climáticos orbitales, como los ciclos de Milankovitch (Imbrie *et al.*, 1984).



## CICLOS EUSTÁTICOS

### MEGACICLO

- Es un ciclo de primer orden que incluye un conjunto de superciclos. Se conocen tres (3) ciclos de primer orden relacionados con la ruptura de megacontinentes (ej: Pangea), con una duración de 250, 500 y 1500 m.a., entre el Precámbrico y el Fanerozoico (Fig. 1.20)
- Una megasecuencia es un paquete de sedimentos depositados durante un megaciclo eustático.
- En general, un conjunto de cinco a siete ciclos de segundo orden.
- Al comparar la curva de los ciclos eustáticos de primer orden con la distribución de la dispersión de los megacontinentes, se constata que los ascensos del nivel del mar coinciden con las épocas de ruptura y separación continental, mientras que los descensos en la curva, coinciden con las colisiones de los microcontinentes (Fig. 1.20). Por lo tanto, los mínimos eustáticos de primer orden corresponden a épocas de generación de microcontinentes (Cramez y Audemard, 1990)

### SUPERCICLO

- Es un ciclo eustático de segundo orden que incluye un conjunto de ciclos de tercer orden. Por lo general, cinco a siete ciclos de tercer orden conforman un ciclo de segundo orden, cuya duración varía entre 3 y 50 m.a. cada uno.
- En el superciclo, el aumento acumulativo del nivel del mar es seguido por un descenso acumulativo del nivel del mar (Fig. 1.20 y 1.21)
- Una supersecuencia es un paquete de sedimentos depositados durante un superciclo, con espesores en el orden de 300 a 1.000 m y con una duración frecuente entre 10 a 40 m.a.



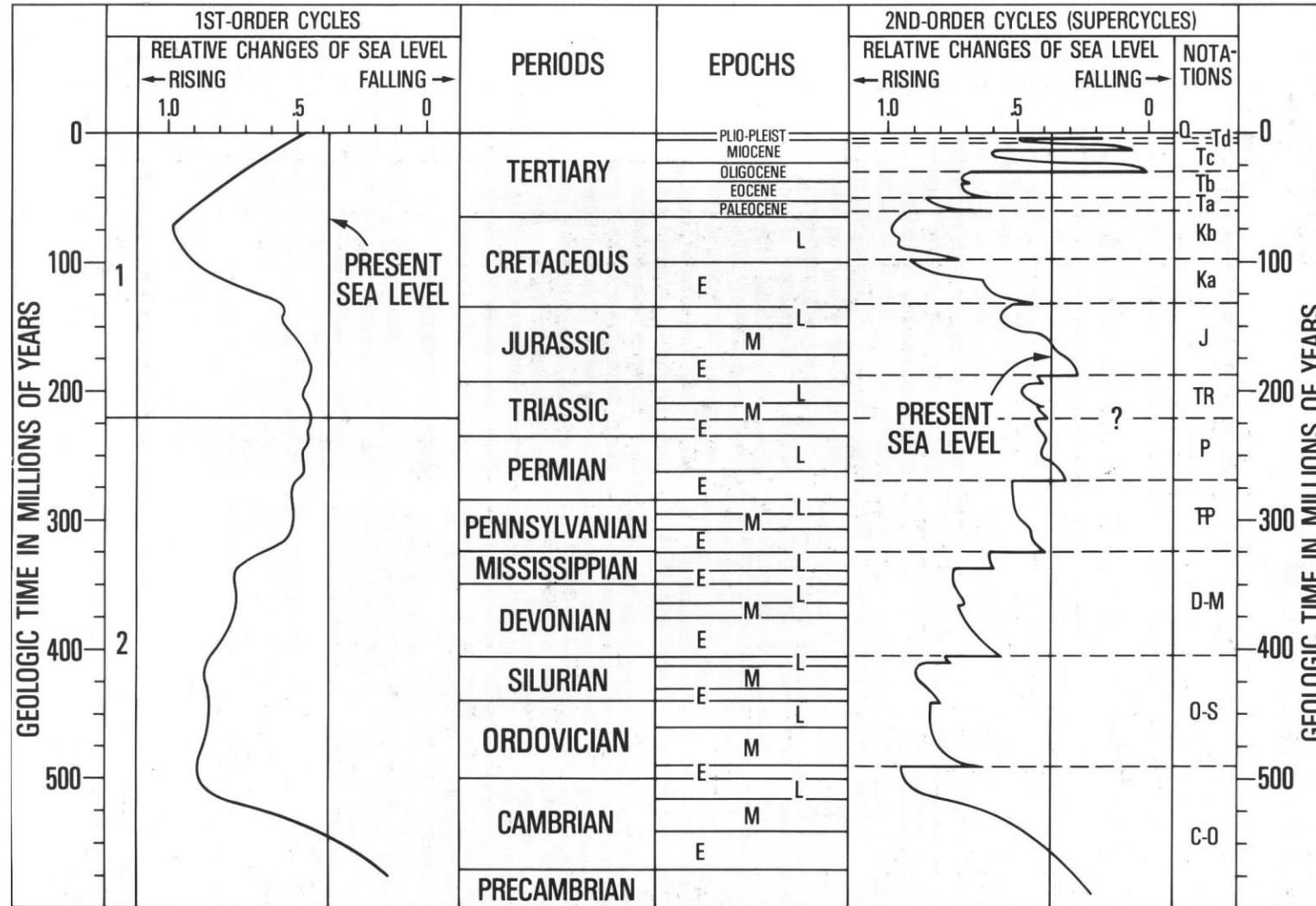


Fig. 1.20. Ciclos globales de primero y segundo orden de cambios relativos del nivel del mar durante el Fanerozoico (Tomado de Vail et al., 1977)



## CICLOS EUSTÁTICOS

### CICLO

- Corresponde al ciclo eustático de tercer orden, con una duración aproximada de 0,5 a 3 m.a.
- Tienen espesores aproximados en el orden de 20 a 500 m.
- Sus parasecuencias componentes o paraciclos eustáticos, tienen espesores entre 3 y 50 m y un tiempo de duración menor a 1 m.a. (Vail *et al.*, 1990) (Fig. 1.21, 1.22)

### PARACICLO

- Es un ciclo de cuarto, quinto o sexto orden.
- Corresponde al intervalo de tiempo geológico durante el cual un ascenso relativo del nivel del mar es seguido por otro ascenso, sin que se produzca una caída del nivel relativo del mar entre ambos, a menos que limite con un paraciclo perteneciente a un nuevo ciclo.
- Aparentemente están relacionados con los ciclos climáticos orbitales de Milankovitch e Imbrie *et al* (1984). En estos ciclos se considera la variación de la cantidad de energía solar recibida por la superficie de la tierra y sus efectos sobre el clima, principalmente en lo concerniente a glaciaciones y deshielos.



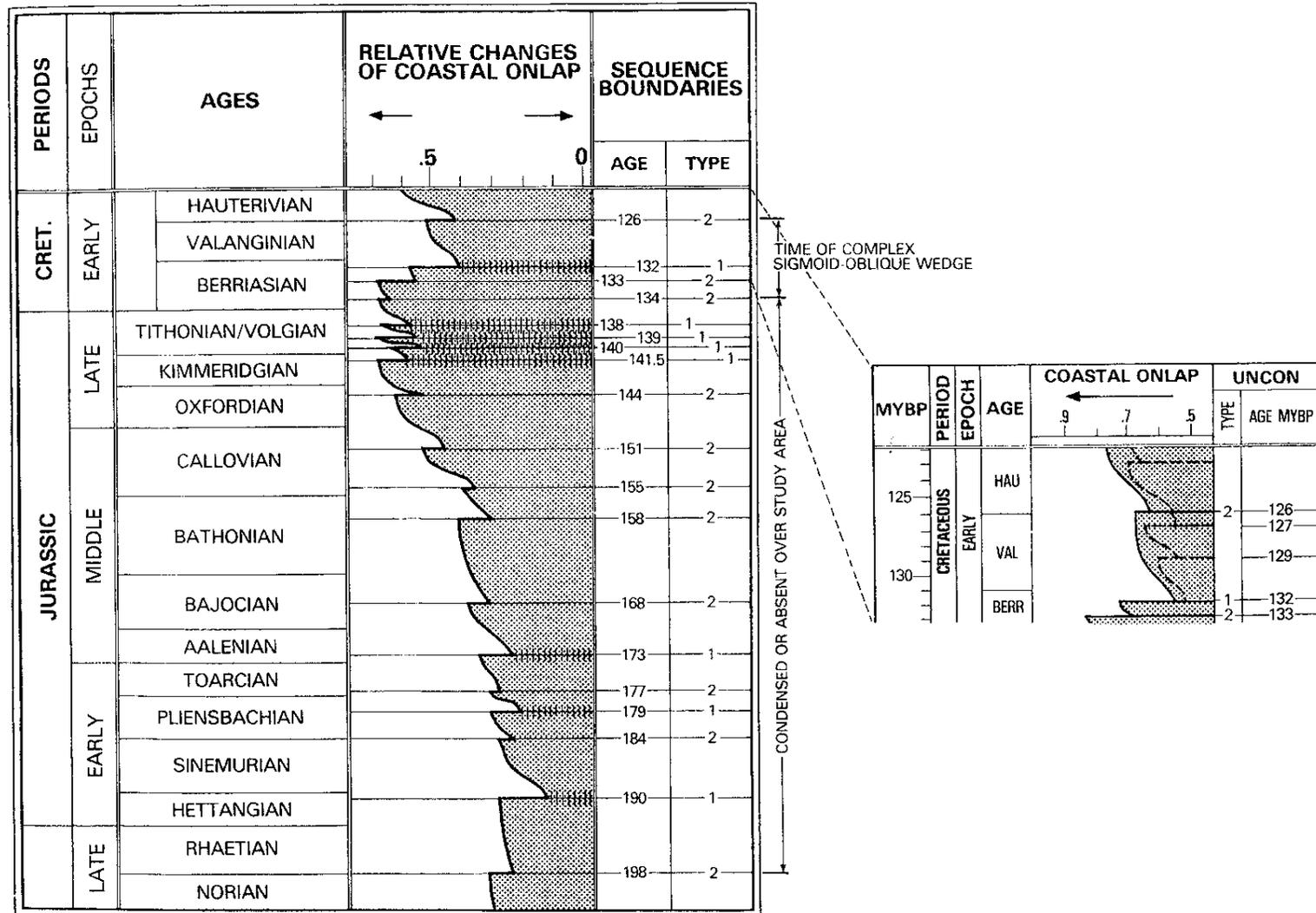
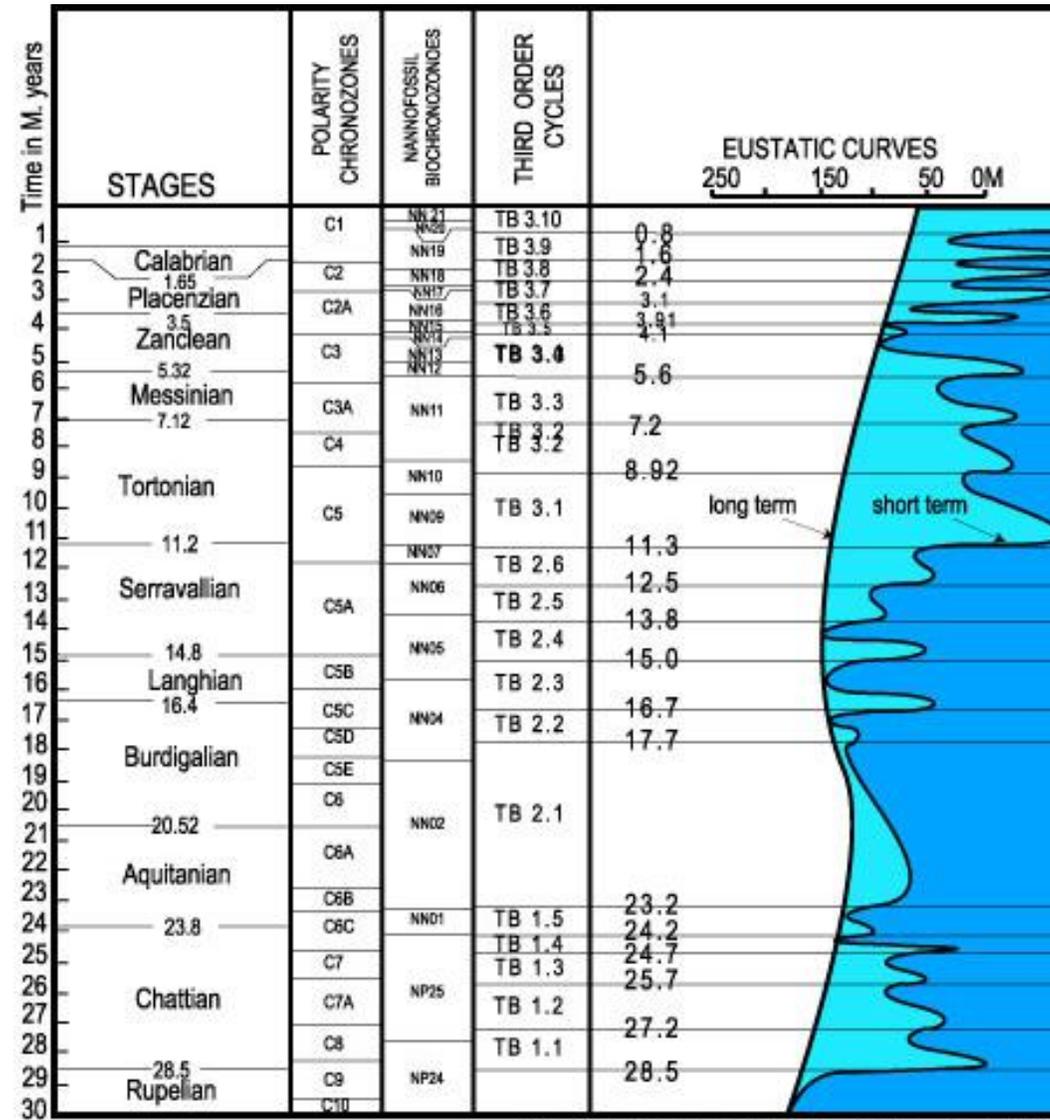


Fig. 1.21. Ciclos globales de segundo y tercer orden de cambios relativos del nivel del mar durante el Jurásico. (Tomado de Vail *et al.*, 1987)





(Based on Haq et. al. 1987 and Berggren et. al. 1995)

Fig. 1.22. Nueva curva del nivel del mar mostrando las cronozonas de polaridad magnética y las biocronozonas de nannofósiles y los límites de secuencias de 3º orden. (<http://strata.geol.sc.edu>)



## CICLOS DE CUARTO, QUINTO Y SEXTO ORDEN

- Se les denominan técnicamente “paraciclos”.
- Duran entre 0.5 y 0.01 m.a. Los de 4to orden: 500.000 a 80.000 años. Los de 5to orden. 80.000 a 30.000 años y los de 6to orden: 30.000 a 10.000 años.
- Han sido atribuidos a los procesos glacio-eustáticos conducidos por cambios climáticos cíclicos.
- Los llamados **Ciclos Orbitales de Milankovitch o Astrociclos**, son aceptados como la causa de la alta frecuencia periódica de los ciclos climáticos. Los ciclos sedimentarios reflejan estas oscilaciones climáticas a través de cambios en las propiedades sedimentarias, comunidades de fósiles y características químicas (Fig. 1.23)
- Una parasecuencia es un paquete de sedimentos depositados durante un paraciclo.



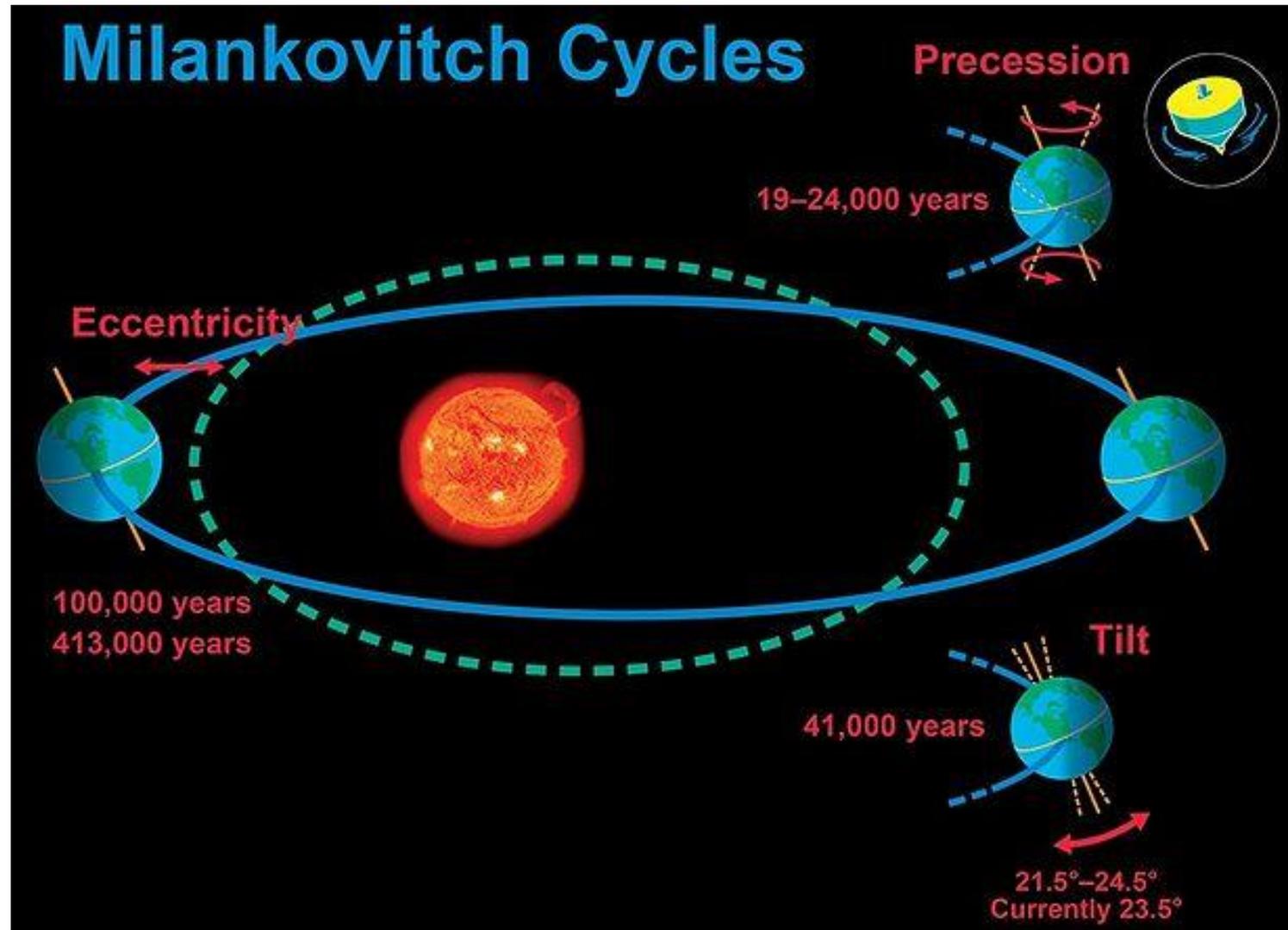


Fig. 1.23. Ciclos orbitales de Milankovitch: Excentricidad, Oblicuidad y Precesión  
(Tomado de <https://geologicalmanblog.wordpress.com>, en [www.universetoday.com](http://www.universetoday.com))



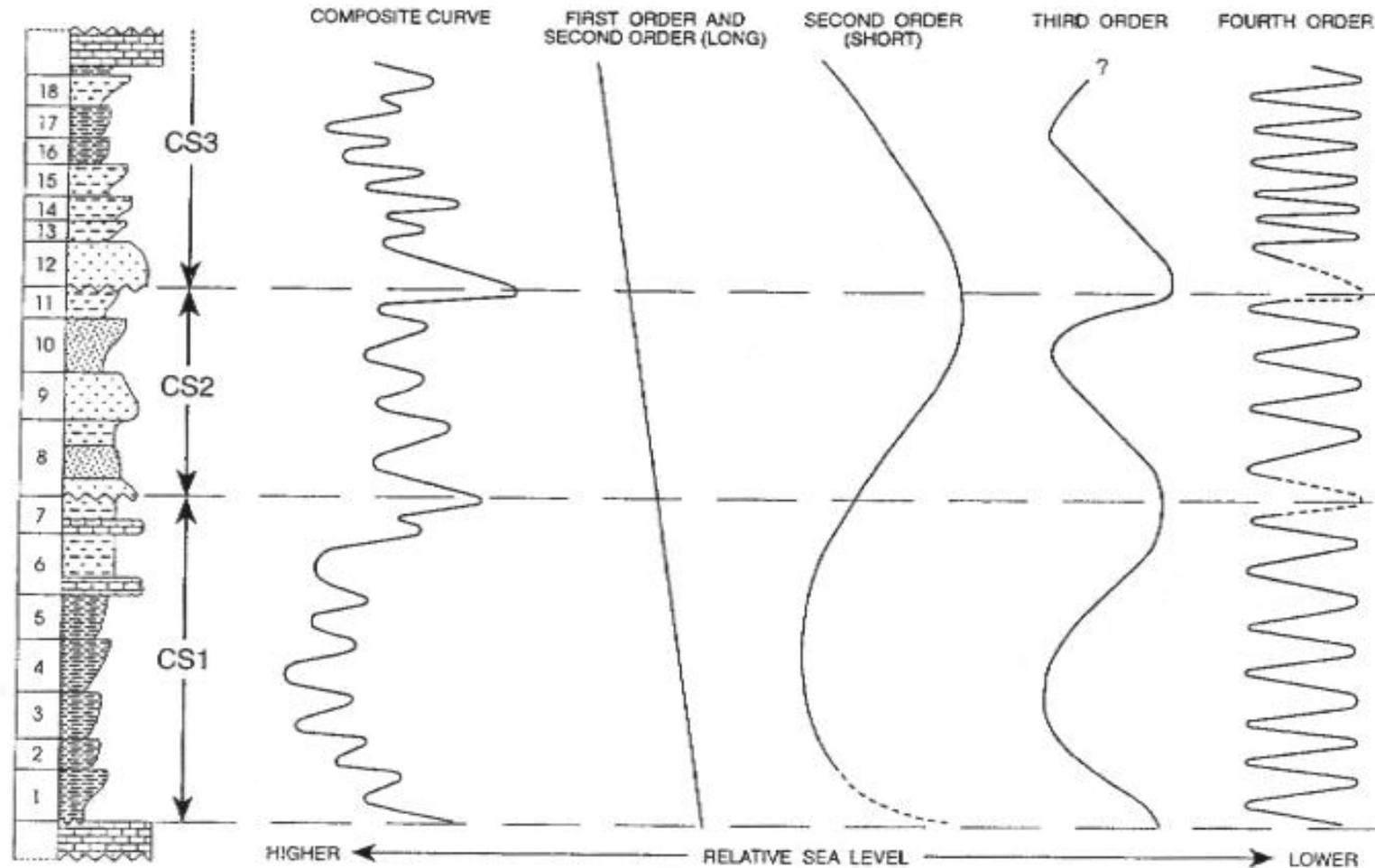
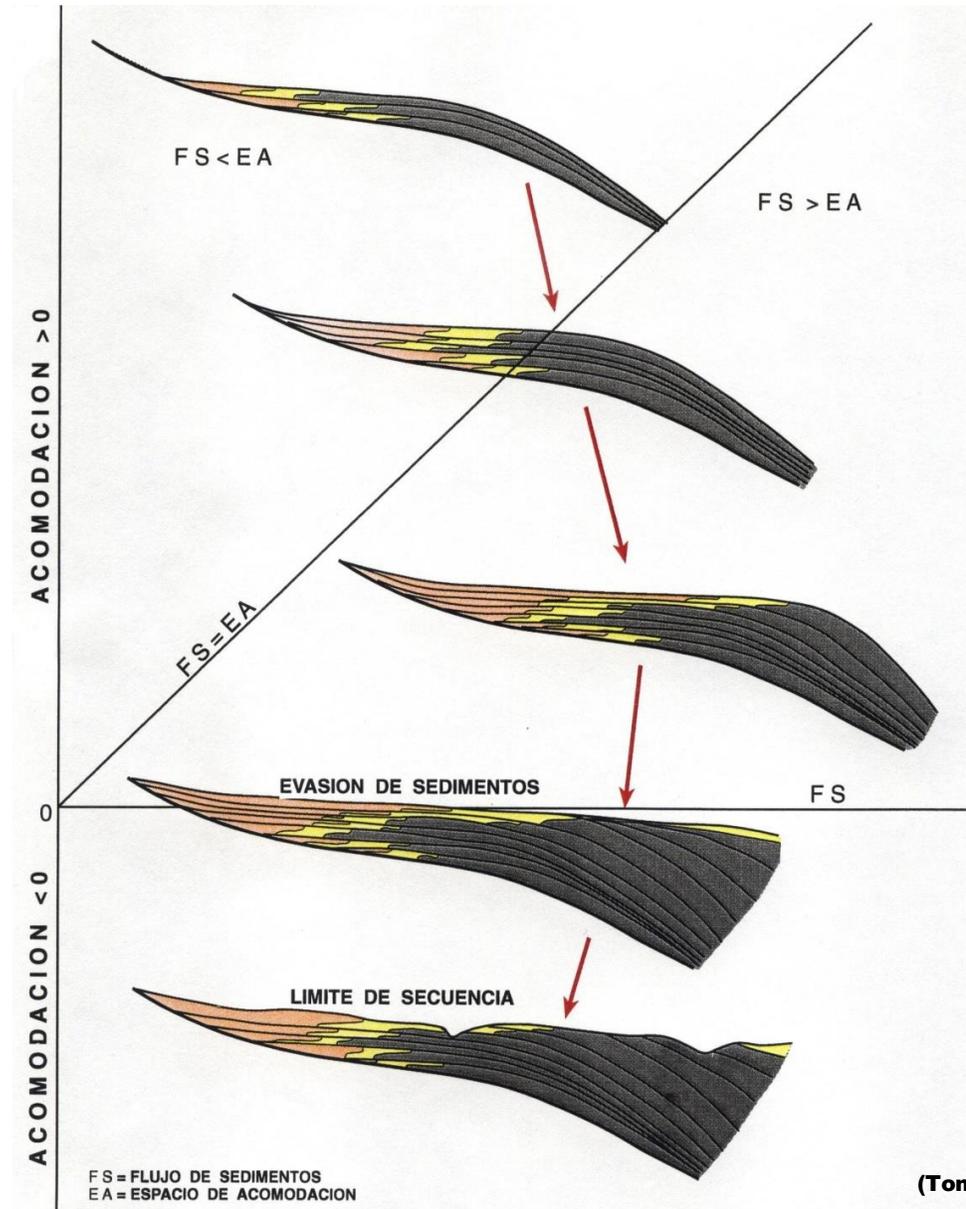


Fig. 1.24. Superposición de ciclos eustáticos y secuencias estratigráficas. Note que los detalles en los cambios eustáticos y su relación con las secuencias depositacionales, son directamente proporcionales con el aumento de la frecuencia de los ciclos (los ciclos de menor duración son de mayor frecuencia). Tomado de Posamentier and Allen, 1999.



Fig. 1.25. Relación entre flujo de sedimentos y espacio de acomodación, según Shanley y McCabe (1994). Cuando  $FS < EA$  ocurre retrogradación; cuando  $FS = EA$  se produce agradación; y cuando  $FS > EA$  ocurre progradación. Cuando  $EA = 0$  y  $FS = 0$ , ocurre evasión de sedimentos, no hay espacio para acomodar los mismos y entonces se produce erosión y se genera un potencial límite de secuencia (discordancia)



(Tomado de Lugo, 1997)



## Discontinuidades Estratigráficas

- Son interrupciones en el proceso depositacional que implican una ausencia de registro material (tangible) y por consiguiente de tiempo geológico (intangibles pero cuantificables).
- Los planos de estratificación son las discontinuidades más elementales de la naturaleza.
- Son detectables fácilmente por rasgos geométricos (angularidad) entre sucesiones de estratos, por evidencias de erosión y/o niveles de mineralizaciones entre dichas sucesiones.
- El intervalo de tiempo en el cual no ha habido depositación se denomina *hiatus* o *hiato*. Si la ausencia de sedimentos es debido a erosión y parte de los materiales de la sucesión más antigua han sido erosionados, el intervalo de tiempo ausente se denomina *laguna*. El espesor de sedimentos erosionado en términos de tiempo geológico se denomina *vacío erosional* (Fig. 1.26).
- Por razones prácticas el término *hiatus* es el más usado para expresar ausencia de tiempo geológico / sedimentación.
- De acuerdo a su geometría, se pueden dividir en: paralelas o angulares. Las discontinuidades paralelas son: la *diastema*, la *paraconformidad* y la *disconformidad*. Las discontinuidades angulares son las *discordancias* (Fig.1.27).





## PRINCIPALES DISCONTINUIDADES ESTRATIGRÁFICAS

### NO EROSIVAS

**Paraconformidad:** es la discontinuidad estratigráfica en la que se mantiene el paralelismo entre los materiales inferiores y superiores, y la superficie es como un plano de estratificación, sin que sea necesaria la existencia de señales de erosión. Se interpreta como una interrupción de la sedimentación durante un tiempo más o menos largo. Lo más frecuente es encontrar las paraconformidades en sedimentos marinos, pues es donde se conjugan más fácilmente las condiciones necesarias para generar este tipo de discontinuidad (Fig. 1.27). La **Diastema** es un caso de paraconformidad cuya duración de tiempo es muy corta y difícil de determinar. El mejor ejemplo de una diastema son las superficies de estratificación y los **hardgrounds** o suelos endurecidos (Fig. 1.28)

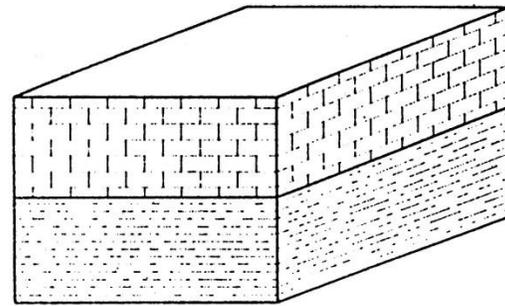
### EROSIVAS

**Disconformidad:** Es la discontinuidad estratigráfica en la que los materiales inferiores y superiores a la discontinuidad mantienen un paralelismo, pero la superficie de interrupción es una superficie de erosión. La disconformidad lleva consigo una interrupción de la sedimentación y un proceso erosivo, sin que por ello la zona haya sufrido ningún movimiento que altere la inclinación original de los estratos anteriores a la discontinuidad (Fig. 1.27).

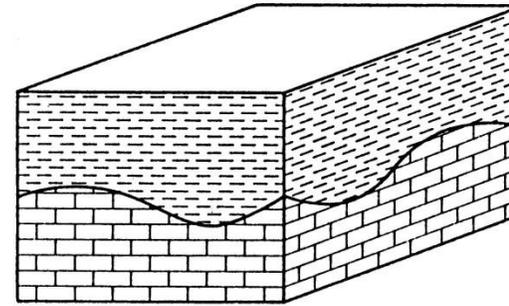
**Discordancia (unconformity):** es la discontinuidad estratigráfica en la que los estratos inferiores y superiores a la discontinuidad mantienen angularidad y la superficie de interrupción es una superficie de erosión. La angularidad entre ambas secuencias sugiere la influencia de tectonismo y deformación que levanta e inclina la secuencia, lo que favorece la acción y efectos de la erosión. Dependiendo si la erosión ha peneplanado los materiales inferiores, la discordancia se denomina **finierosiva** (Fig. 1.27 A). Si la superficie de erosión delinea relieve preexistente, esta se denomina **discordancia con paleorelieve** (Fig. 1.27 B).

**Inconformidad (nonconformity):** cuando un conjunto de estratos sedimentarios descansa sobre materiales ígneos o metamórficos (basamento común de las cuencas sedimentarias. Fig. 1.27).

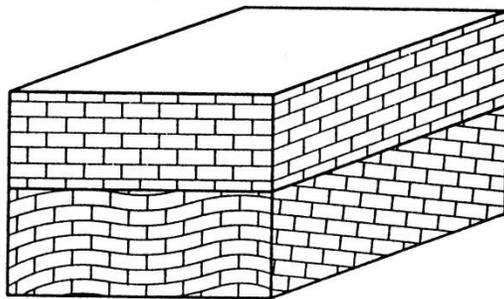




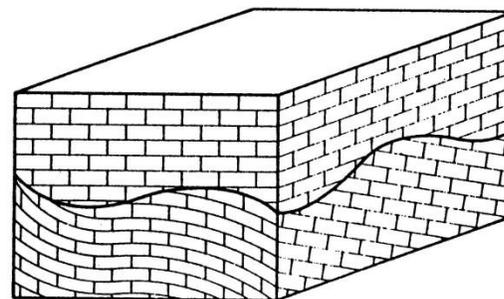
**Paraconformidad**



**Disconformidad**

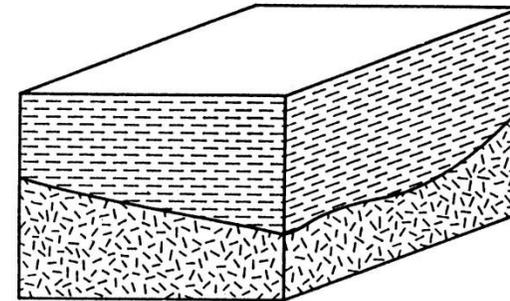


**A**



**B**

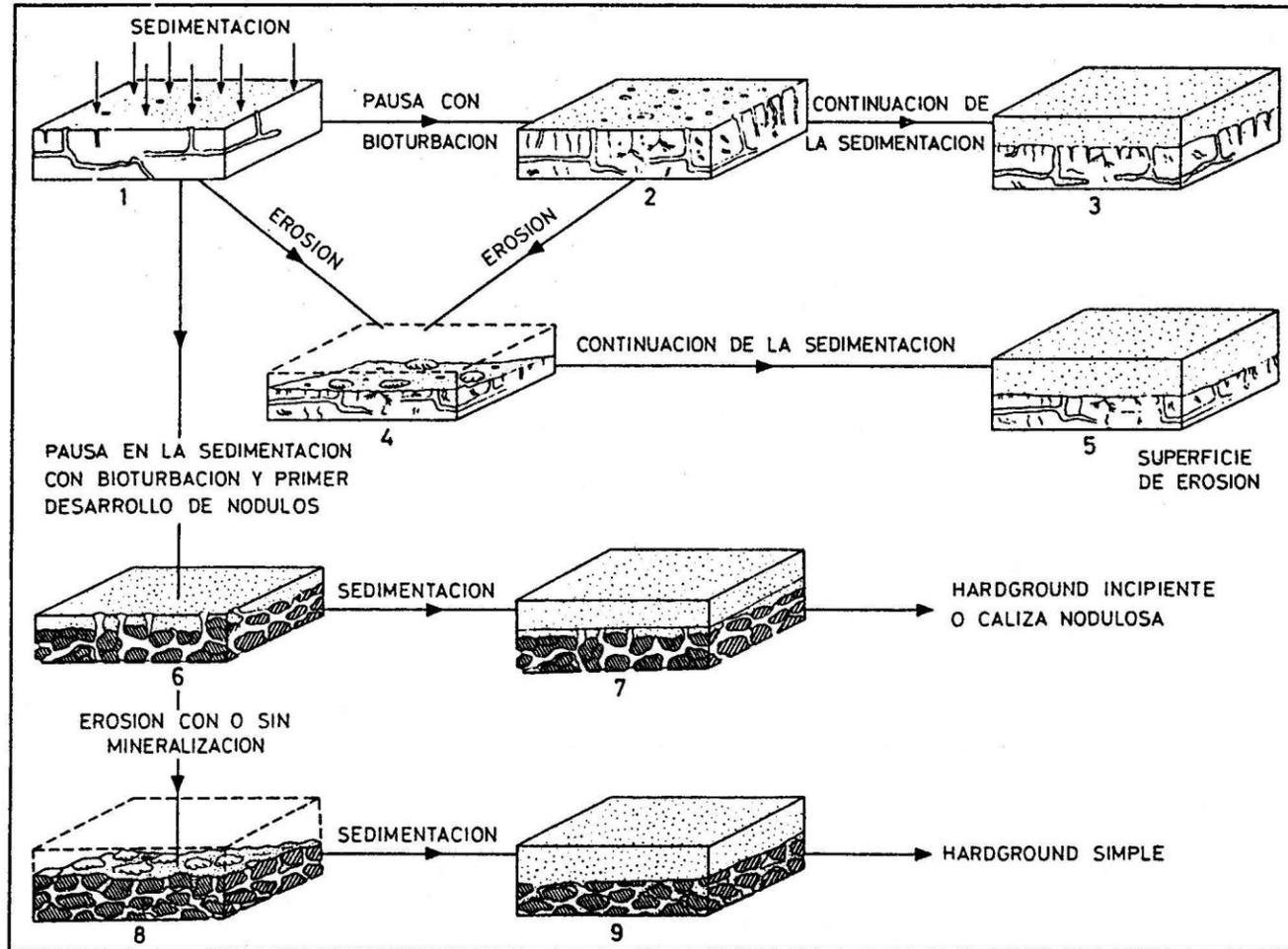
**A. Discordancia B. Discordancia con paleorrelieve**



**Inconformidad**

Fig. 1.27. Tipos de discontinuidades estratigráficas. Entre las discordancias: A. es finierosiva y B. con paleorrelieve. (Tomado de Corrales *et al.*, 1977)





Los **hardgrounds** o suelos endurecidos son superficies de capas carbonatadas cementadas sinsedimentariamente que han quedado expuestas en el lecho marino mientras la sedimentación cesa activamente por un prolongado intervalo de tiempo. También el término puede aplicarse a lechos o superficies subacuas mineralizadas como consecuencia de recciones químicas entre la interfase agua-sedimento clástico y/o carbonatado. Los estratígrafos y los sedimentólogos a menudo usan hardgrounds o suelos endurecidos como horizontes marcadores y como indicadores de hiatos sedimentarios y eventos de inundación.

Fig. 1.28. Diagrama resumen donde se muestra la relación entre superficies de no sedimentación, facies nodulosas incipientes y verdaderos "hardgrounds". (Tomado de Corrales et al., 1977)

