

(¡OJO! estos contenidos hay que completarlos con las Tablas y Figuras de las transparencias de clase)

BLOQUE I. INTRODUCCIÓN A LA SEDIMENTOLOGÍA MARINA

Tema 1. CONCEPTOS BASICOS

1.1. Sedimentología marina:

- **Sedimentología** (Reading, 1996) estudio de la composición y génesis de los sedimentos¹ y rocas sedimentarias;
- **Sedimentología marina:** parte de la sedimentología que estudia los sedimentos del medio marino (litoral, plataforma, talud, cuencas oceánicas).
- ¹**sedimento**, material resultante de las acciones de reciclado de los procesos geológicos exógenos o externos

1.2. Nomenclatura estratigráfica

- **Estratigrafía**, estudio de los estratos². Se diferencia de la sedimentología en que esta última no tiene como factor fundamental el tiempo, ocupándose más de cuestiones de secuencialidad y del principio de superposición de los estratos.
- ²**Estrato**, nivel de sedimentos o roca sedimentaria separados por superficies de erosión, no sedimentación, o cambio abrupto de las características de esa sedimentación, llamadas estas superficies, superficies de estratificación.
- **Morfología del estrato (medidas:** techo, muro, espesor, dirección, buzamiento y vergencia **y estructura:** masiva, laminación paralela recta y ondulada, laminación cruzada, granocerciente o decreciente).
- **Tipos de superficies de estratificación:** difusa, neta, plana o con irregularidades (estructuras de corriente, de carga, pistas de organismos, bioturbaciones, nódulos) ondulada
- **Asociación de estratos: series estratigráficas: Tipos:** Uniforme y homogénea (continuidad de los procesos durante períodos largos de tiempo); aleatoria (alta variabilidad en las condiciones de sedimentación); estrato creciente (aumenta la estabilidad del medio sedimentario o los aportes o energía); estrato decreciente (viceversa); periódicas (rítmicas, sucesión monótona de condiciones sedimentarias; cíclicas (aumento o disminución de la energía del medio).
- **Columnas estratigráficas:** representación (resistencia: tamaño de grano, cementaciones; litología, estructuras sedimentarias,...).

- **Guía estratigráfica internacional** (sólo se considerarán algunas definiciones): **unidades litoestratigráficas:** unidades estratigráficas basadas en las características litológicas de los cuerpos rocosos; **tipos** formales:
 - **Formación:** Unidad formal primaria de la clasificación litoestratigráfica. La litología de una sucesión debe de quedar completamente subdividida, siendo este contraste requerido, variable con la complejidad geológica de la región y el detalle requerido para su cartografía. Debe tener entidad en los mapas regionales (1:50.000; 1:100.000).
 - **Miembro:** Unidad de rango inferior que la Formación. Con propiedades litológicas que le diferencian de otras partes de la Formación. Tiene que tener un sentido útil para su definición y puede incluirse en varias Formaciones. Ejemplos morfológicos: *lentejón:* forma lenticular; *lengua:* forma que se extiende más allá del cuerpo principal.
 - **Capa:** Unidad formal más pequeña. Debe distinguirse litológicamente de su entorno inmediato. Nivel visible a simple vista más pequeño de una secuencia sedimentaria, con composición y textura (aspecto) uniforme
 - **Flujo:** cuerpo volcánico concreto distinguible por la textura, composición u otros criterios objetivos. Deben tener una extensión amplia.
 - **Grupo:** conjunto de 2 o más formaciones contiguas o asociadas que tienen en común propiedades litológicas significativas y diagnósticas. Debe de tener un sentido utilitario.
 - **Complejo:** unidad litoestratigráfica compuesta de diversos tipos de cualquier clase de roca, caracterizada por una litología irregularmente variada o por relaciones estructurales muy complicadas
- 1.3. **Variaciones relativas del nivel del mar** (referido habitualmente a la zona costera). Las posibles causas de estas variaciones pueden ser:
- a) eustáticas:** *cambios globales* del volumen de agua de las cuencas oceánicas (fases glaciares e interglaciares), o variación del volumen de la cuenca;
 - b) tectónicas:** levantamiento o hundimiento del continente por fuerzas tectónicas: colisión, subducción,...
 - c) isostáticas:** levantamiento o hundimiento del continente por carga o alivio de carga en la superficie. Estas 2 últimas causas se consideran en general de ámbito local.
- **Curva de cambios del nivel del mar** (ciclos globales): **Curva Exxon** (*Exxon Production Research Company*): propuesta por Haq et al.

(1988), supone un grupo de investigación que recopila y actualiza la información de perfiles sísmicos y sondeos de todo el mundo. Es una escala temporal de los últimos 255 años (Pérmico sup.), que incluye escalas magneto- crono- y bio-estratigráficas, además de una **cronoestratigrafía secuencial** (una curva de cambios relativos por solapamientos costeros, representando los valores medios de los cambios de la agradación costera en diferentes localidades; la escala va de 0: nivel del mar más bajo conocido, hace unos 10 Ma, a 1: el más alto, hace unos 91 Ma; se establece también un rango de orden: megaciclos, superciclos y ciclos) y **la curva eustática** (valores del nivel del mar, en m, referido a la posición actual; con 2 curvas de mayor y menor definición, que se obtiene a partir de la de mayor definición, trazando una envolvente de los máximos, dando para la actualidad un valor de 60-70 m en vez de 0m, y representa el nivel del mar si no hubiese casquetes polares. Esta curva tiene carácter provisional, los errores pueden ser de mucha magnitud y no son niveles definitivos, sino que irán mejorando su precisión con nuevos datos. Otro inconveniente es que puedan quedar solapadas causas locales (tectónicas e isostáticas) no depuradas.

En la actualidad la **escala** temporal de variaciones del nivel del mar-temperatura de los océanos es **la isotópica** ($d^{18-16}O$ y $d^{13-12}C$).

Tema 2. EL CICLO GEOLOGICO EXTERNO

Ilustración del ciclo geodinámico externo. Procesos implicados: erosión, transporte y sedimentación

2.1. Erosión-Meteorización:

Definición: destrucción del material (rocas) expuesto a la Hidrosfera, Atmósfera, Biosfera. **Tipos:** - **física:** fragmentación, origen, cambios térmicos, impactos, desgastes; -**química** destrucción de la estructura mineral, cuya velocidad dependerá de: -las condiciones de temperatura y de cristalización de los minerales (*Escala de Goldich*); -humedad y temperatura ambientales (condiciones de pH y eH); -**biológica** mezcla de física y química, provocada por los seres vivos: movimiento y metabolismo.

Tasas de erosión (véase Figura relacionada).

Formaciones superficiales término que incluye sedimentos y mantos de alteración. Material suelto o cementado, pero reciente (Cuaternario).

2.2. Transporte (véanse Figuras y Tablas relacionadas):

Los grandes agentes del transporte (corrientes fluviales); **tipos de flujo** (laminar-turbulento: n° Reynolds, rápido-lento: n° Froude); **tipos transporte** (carga de fondo, suspensión, disolución)

2.3. Sedimentación (véanse Figuras y Tablas relacionadas):

Causas, tasas, leyes de sedimentación (ley de impacto y Stokes), **gráfico de Hjulström**

Tema 3a. CARAC. TEXTURALES DEL SEDIMENTO: TAMAÑO

3a.1. Definición textura: aspecto de las **partículas** (tamaño, densidad y forma), de las **superficies**, de la **masa** (empaquetamiento, orientación, imbricación, porosidad, permeabilidad, *sorting* o distribución de tamaños) y relaciones espaciales entre partículas (proporciones). De todos estos componentes de la textura, el **tamaño** (variación en 3-4 ordenes de magnitud: de arcillas: 10^{-3} mm a gravas: mm-cm), la **densidad** (2,3 - 2,7 gcm^{-3} para minerales y ~ 1 para la materia orgánica) y la **forma** son las principales y por ese orden.

3a.2. Cuantificación textural del tamaño de las partículas (metodología: Para las partículas **gruesas** (gravas-limos) se utilizan **tamices**, obteniendo así la proporción de partículas de un determinado **diámetro físico** de la partícula (que corresponde con el eje intermedio, b).

Para cuantificar las partículas **finas** de un sedimento (limos-arcillas) se pueden utilizar técnicas variadas: los **tubos de decantación**, la **pipeta de Robinson**; **Láser**, R-X (**Sedigraph**). El principio básico seguido en todos ellos es la ley de Stokes y los tamaños obtenidos se refieren en este caso a un **diámetro hidráulico**. Si la densidad de las partículas analizadas es mayor que las del cuarzo (mineral tomado como referencia, debido a su abundancia), este diámetro saldrá mayor que el físico, y viceversa, y habrá que corregirlo si se tienen que relacionar los resultados de las fracciones gruesas y finas,).

En este tema se va a explicar con más detalle la técnica del tamizaje, que es la que se trabajará en las prácticas. Los pasos de esta técnica son los siguientes:

a) Tamizaje-pesadas: partiendo de un volumen suficiente de muestra (100 g, aunque dependerá de las posibilidades del muestreo), se asegura primero que las partículas estén sueltas, eliminando posibles cementaciones (carbonatos, óxidos, geles de sílice), o agregaciones (materia orgánica) con disolventes adecuados (clorhídrico, agua oxigenada, hexametáfosfato sódico,...). Se pesa el total de la muestra y posteriormente se pasa por una columna de tamices de un tamaño de luz

de malla estándar (escala ϕ : $-\log_2$ diámetro de la partícula, véanse Figuras y Tablas relacionadas). Las diferentes fracciones obtenidas se pesan a su vez, debiendo salir muy similar a la pesada inicial de muestra total.

b) Cálculo: los valores de pesada en g se pasan a porcentajes y a su vez a porcentajes acumulados.

c) Representación gráfica, de los valores de porcentaje de muestra en el eje de ordenadas (Y) referidos a un determinado valor de tamaño de partícula, escala ϕ , en el eje de abscisas (X). En la escala ϕ , los valores de tamaños de partícula $> 1\text{mm}$ presentan valores negativos, y los menores positivos.

Las gráficas pueden ser **histogramas** de frecuencia, acumulada o no, en escala **aritmética** o en escala de **probabilidad** (representan los incrementos de área de la curva de Gauss, escala logarítmica en el eje de ordenadas, hace rectas las curvas gaussianas; cuando no lo son se produce una ruptura de pendiente, y cada tramo marca un comportamiento hidráulico diferente: gruesos: rodadura; intermedios: saltación y finos: suspensión)

d) Medidas de interés:

Mediana: ϕ_{50} representa el tamaño de grano, en escala ϕ , que tiene el 50% de los granos superiores a él.

Media describe el tamaño promedio de la muestra

Sorting mide la desviación en la clasificación de un sedimento. **Grados** de clasificación: *sorting*: bien clasificado: predominio de un tamaño determinado: buen *sorting*.

Asimetría: skewness, indican la posición de la media respecto a la mediana; si la media se desplaza hacia tamaños finos la asimetría es negativa y viceversa. Cuando coincide la media y la mediana se considera simétrica.

Angulosidad: kurtosis, marcan la agudeza de la curva de frecuencia como relación de proximidad entre los valores centrales y externos; normales = 1, platicurtas <1 ; leptocúrtica >1).

Estos parámetros se pueden representar por percentiles o por momentos (Tabla).

3a.3. Interpretación gráfica y relación con los medios sedimentarios

Media es el nivel estadístico de energía media en el ambiente sedimentario siempre que estuvieran disponibles todos los tamaños de grano

Sorting: indica las oscilaciones en la energía cinética en el ambiente sedimentario respecto a su valor medio. Si el sedimento se origina por 2

procesos diferentes, como arrastre y suspensión, marca la diferencia de energía asociada a cada proceso de sedimentación.

Asimetría: skewness, negativa: las variaciones de energía cinética media se desplazaron hacia valores más bajos de lo normal; y viceversa.

Angulosidad: kurtosis >1 indican que las oscilaciones de la energía cinética media se restringen al 50% central durante un tiempo superior al normal, y viceversa.

Tema 3b. CARAC. TEXTURALES DEL SEDIMENTO: MORFOLOGÍA

3b.1. Parámetros morfométricos

Definición: características de la forma de los granos (aplicado para partículas detríticas). Las más usadas:

Esfericidad (a~b~c; relación del grano con una esfera de igual volumen; permite una mejor interpretación del comportamiento hidráulico del grano).

Aplanamiento a~b>c

Alargamiento a>b~c

Redondez (curvatura de la superficie; variantes: anguloso (aristas y caras rectas), subanguloso (incipiente desgaste de aristas); subredondeados (caras poco desarrolladas y aristas redondeadas); bien redondeados (contornos convexos uniformes),

Su parecido con una figura geométrica (conos, cilindros, hexágonos...)

Escalas gráficas más usadas que las ecuaciones geométricas

Factores que determinan la forma: mineralogía, tipo (aire, agua, hielo), duración e intensidad del transporte.

Relación con el tamaño: para definir la forma de una partícula no basta con un eje (esfera) sino que se necesitan 3 (elipsoide), aunque por precedentes históricos y conveniencia se siga usando sólo uno. Afortunadamente, el efecto de la densidad (como ya vimos, análisis mineralógicos y microsonda) y el de la forma se puede controlar con facilidad (tratamiento imagen). Se ha registrado una tendencia a formas redondeadas para partículas grandes ($>0.25\text{mm}$) y discos para finas ($<0.18\text{mm}$). Las formas en disco presentan un diámetro hidráulico menor.

3b.2. Pivotalidad:

Definición: medida relativa de la facilidad del grano para el movimiento

Factores: proporción directa con redondez esfericidad. Posición: eje largo paralelo al flujo

3b.3. Textura superficial: brillante, barnizada (acumulación de óxidos y arcillas), **mate, estrías, impactos, corrosión...** pueden indicar el mecanismo de transporte.

Tema 3c. CARACTERISTICAS TEXTURALES DEL SEDIMENTO: PROPIEDADES DE MASA

3c.1. Fábrica: microestructura del sedimento; ordenamiento interno de la masa. Parámetros que la caracterizan:

Empaquetamiento, ordenación de las partículas en el campo gravitacional. En corrientes el empaquetamiento es apretado, no así en aguas tranquilas y partículas finas, aunque por compactación o sacudidas (oleaje, sismos) puede volverse más apretado. Una de las cuantificaciones más usadas son las de contacto, con escalas visuales (flotantes, tangenciales, largos, completos, saturados, cóncavo-convexos).

Orientación (vista en planta) dependerá del tipo y ambiente de transporte (flujos unidireccionales eje a paralelo a la dirección de flujo; flujos bidireccionales eje a perpendicular a la dirección de flujo).

Imbricación de granos (vista en sección transversal), inclinados en el sentido contrario al del flujo.

3c.2. Porosidad: total (hueco entre partículas) **y efectiva** (porosidad comunicada, que transmite los fluidos, mayor en partículas arenosas), **inter-intra** (granos), **morfologías** (bien clasificados, por disolución y facturación)

Según la eficacia para la transferencia de fluidos, se pueden diferenciar: poros de transmisión (**porosidad efectiva** o comunicante; poros > 50 μm), poros de almacenamiento (entre 50 y 0.5 μm) y porosidad residual (formada por poros <0.5 μm). Los términos **microporosidad** y **macroporosidad** no tienen una base física real y hace referencia a su mayor o menor eficacia en los procesos de transferencia; el límite entre ambas es el diámetro aparente 30-60 μm . La geometría de los huecos (espacios irregulares no rígidos) y sus interconexiones controlan el comportamiento del agua en este medio. Su estudio directo se hace en lámina delgada o con el microscopio electrónico de barrido, utilizándose a menudo el tratamiento de imagen con ordenador.

3c.3. Permeabilidad:

Definición: medida de la facilidad con la que un fluido atraviesa un material poroso, Ponderada mediante la ley de Darcy. Valores de permeabilidad: alta (0-0.1 darcy), media (0.1-0.01), baja (0.01-0.001), muy baja (0.001-0.0001), impermeable (<0.0001)

Relación con la porosidad, el tamaño de grano y el sorting (clasificación o selección de tamaños). El buen *sorting* y el tamaño grande aumentan su valor. La estratificación es también una vía para la mejor permeabilidad.

Tema 4. COMPOSICION DE LOS SEDIMENTOS MARINOS

4.1. Sedimentos terrígenos: son aquellos procedentes de la erosión-transporte y acumulación de material continental, costero o de la propia plataforma. Se denominan también alóctonos, ya que en general provienen del continente o de la costa. Su composición será reflejo del material originario y del grado de erosión y transporte.

4.2. Sedimentos biogénicos: aquellos generados en el medio sedimentario marino (por encima del nivel de compensación de carbonatos), por precipitación (bio)química. Suelen denominarse también sedimentos autóctonos. Su composición más común es la carbonatada (aunque también puede ser silíceo), y en su mayoría proceden de conchas o esqueletos de organismos fijadores de carbonato.

4.3. Otros sedimentos: en este grupo se podrían incluir aquellos de precipitación inorgánica de ciertos minerales (evaporitas, fosfatos, nódulos de Fe y Mn,...) y de acumulación de materia orgánica (carbones y petróleo).

BLOQUE II. PROCESOS Y ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS. FACIES

Tema 5. MOVIMIENTO DE LAS PARTICULAS

5.1 . Capa límite y conceptos relacionados

- **Deformación por cizalla (*shearing*) del fluido:** (desde el punto de vista del fluido que se la sufre): deformación real o potencial que experimenta el fluido como consecuencia de la tendencia de ciertas zonas a deslizarse sobre ciertas zonas a lo largo de planos paralelos. Los fluidos presentan esta propiedad, debido a su viscosidad). **Influencia del tipo de flujo: laminar:** el flujo se produce de forma estratificada, las capas se deslizan una sobre otra de forma paralela y se acomodan a los límites de los fluidos; **turbulento:** se producen altos valores de cizalla, de modo que las trayectorias de la masa del fluido dejan de adaptarse a sus límites, apareciendo remolinos y vórtices. Un flujo pasa de laminar a turbulento por aumento de la velocidad y por aumento de la temperatura (menor viscosidad).
- **Capa límite: definición:** zona del fluido próxima a los bordes (fondo, paredes y atmósfera) que sufre una disminución de la velocidad por efecto de fricción con sus bordes. La viscosidad del fluido crea un esfuerzo de cizalla que se transmite sólo a esa capa, y el resto de la masa queda casi inalterable. **Tipos de flujo: laminar** (puede ser pequeña) **y turbulento** (la pérdida de velocidad es más brusca; en fondos suaves puede aparecer una capa mínima laminar en contacto

con la superficie, y no así en superficies rugosas) **y efecto de separación de flujos (efecto burbuja)**: En la zona de la capa límite próxima al sustrato, la energía cinética es muy baja, y ello provoca una separación de flujos dentro de la capa límite: capa interna y capa externa. Este fenómeno tiene una importancia enorme, produciéndose en las caras de avalancha de las dunas y *ripples* y en general cualquier resalte: escalones, piedras, irregularidades, que produce la acumulación del material por pérdida de v).

5.2. Factores que controlan el movimiento

- **Inicio del movimiento de la partícula**: un grano empieza a moverse cuando la elevación y arrastre producidos por el fluido excede las fuerzas gravitacionales y cohesivas (importantes estas últimas, sobretodo en las partículas finas). **Fuerzas actuantes**: fuerza de arrastre y ascensional; fuerzas cohesivas y gravitacionales. **Variables implicadas**: la velocidad del fluido, las turbulencias, el tamaño de grano su forma y densidad, y el empaquetamiento.
- **Angulo de pivotabilidad y relación con el tamaño de la partícula** (y de las partículas que le soportan): el ángulo se agudiza (y más fácilmente se moverá) cuando mayor es la partícula con respecto a las que le soportan, y viceversa.

5.3. Modos de transporte

- **Diagramas de Hjulström** (relaciona la velocidad de la corriente, el tamaño de grano de las partículas y el tipo de transporte, obteniendo la velocidad crítica de movimiento de las partículas en función de su tamaño) **y de Sundborg** (modifica el diagrama de Hjulström, y tiene presente la influencia de la concentración de las partículas en suspensión y el peso específico de la partícula).
- **Capacidad** (cantidad teórica de material que puede transportar en función de su estado energético) **y carga de una corriente** (carga real que transporta un fluido). Si la carga y la capacidad son equivalentes, la corriente sólo transporta; si la carga es mayor que la capacidad, sedimenta y si es menor erosiona

Tema 6a. ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS: ESTRUCTURAS DEPOSICIONALES

6a.1. Definición de estructura sedimentaria morfología (de tamaño mm - m) desarrollada por la acumulación de material sedimentario (deposicionales), por erosión del fondo por la acción de un fluido (erosionales) o por procesos postdeposicionales, ya sean por retracción o por deformación de la estructura.

6a.2. Tipos de estructuras deposicionales (relacionando la energía de la corriente: velocidad y stress de cizalla, y el tamaño de la partícula, ver Figuras relacionadas):

- **Mini-ripples** ($L < 60\text{cm}$, en flujos lentos tienen crestas paralelas y si es rápido se irregularizan; la v mínima es de 20cm/s para la arena fina y 8cm/s para limos)
- **Mega-ripples: dunas y barras de arena** (L desde 60cm a varios m, equivalen a las dunas; crestas rectas forman 2D y crestas sinuosas (lo más normal): 3D; la transición entre 2 y 3D supone el cambio de transporte en suspensión a tracción).
- **Ondas de arena** (v de corriente $<$ dunas y $>$ *ripples*, $v = 30\text{-}80\text{cm/s}$; crestas rectas, $L = 5\text{-}100\text{m}$, tipos: 2D baja energía, 3D algo menos baja energía, y en transición a dunas, fondos profundos y sedimentos gruesos).
- **Fondos planos** (superficies sin elevaciones ni depresiones $>$ que el tamaño de las partículas; son habituales de grano grueso ya que resisten v más altas). Pueden generarse en v de flujo altas y bajas.
- **Antidunas** ($F > 1$, con pendientes suaves y de forma bastante simétrica, se pueden encontrar en la zona intermareal).

Hidrodinámica: relación flujo y forma: tipos de flujo: a) subcrítico o lento ($F < 1$; poco transporte, se generan *ripples* y megarripples); b) de transición: $F = 1$; c) supercrítico o rápido ($F > 1$, mucho transporte, se forman fondos planos y antidunas).

6a.3. Ripples: la estructura sedimentaria deposicional que incluye a todas las demás, partículas tamaño arena y/o limo.

- **Forma**: L , H , cara de avance, cara de avalancha, crestas (rectas: formas 2D, onduladas: linguoides, lunares, cuspidales, romboides: formas 3D; discontinuas, continuas).
- **Estructura interna**: láminas de forma angular, tg, sigmoidal, con ángulos entre $20\text{-}35^\circ$; es la misma para *ripples* o dunas
- **Funcionamiento**: los granos se mueven por rodadura, saltación o suspensión para formar el *ripple*; patrón de movimiento en la cara de avalancha: (efecto burbuja de la capa límite): diferencia 3 zonas: a) la de no difusión (se conserva la velocidad, pero con un ligero cambio en la dirección), b) de mezcla (se forman macroturbulencias y disminución rápida de la velocidad); c) de retorno (cambio total del sentido del flujo, quedando la v disminuida a un $20\text{-}25\%$ respecto al flujo general, cayendo las partículas: las de mayor tamaño en la zona próxima a la cresta y los finos en el fondo, aunque los tamaños grandes luego, por inestabilidad del ángulo caen al fondo, reestableciéndose así la

estabilidad, este proceso de diferenciación de tamaños, colores y formas, produce el desarrollo de la laminación)

o **tipos:**

de oleaje simétricos el oleaje es cuasi- estacionario, y su actuación en el fondo hace girar las partículas hacia un lado o hacia otro en función del momento de giro de la ola en profundidad; las 2 caras son entonces de avalancha; la estructura interna típica es en forma de chevron, aunque también puede tener una única dirección de laminación, considerándose entonces formas transicionales a los asimétricos; también puede suceder que la estructura interna sea heredada y no tenga nada que ver con la dinámica del *ripple* simétrico

de oleaje asimétricos: el oleaje es traslacional y la velocidad de avance es mayor que la de retroceso, el avance produce movilización y el de retroceso tan apenas, la v de la corriente entre 10-90 cm/s; **índice del ripple:** (L/H: inverso a la relación aspecto; los *ripples* de oleaje asimétricos tienen valores comprendidos entre 5 y 15, a partir de 15 pasan a ser *ripples* de corriente; los *ripples* asimétricos de oleaje pueden confundirse con pequeños *ripples* de corriente, aunque se pueden diferenciar por la forma de sus crestas: bifurcadas y regulares para los de oleaje e irregulares y sin bifurcaciones reales para los de corriente, pero pueden presentar pequeñas lenguas corriente abajo). Los *ripples* de oleaje asimétricos suelen ser de crestas rectas o ligeramente onduladas.

de corriente: debidos a corrientes unidireccionales; tipos (las estructuras internas no varían con la escala: pequeños, grandes, gigantes):

Pequeños: $L < 60\text{cm}$, $L/H > 5$, y según la forma de sus crestas pueden ser: *rectos* (de baja v ; se pueden confundir con los de oleaje, aunque estos últimos menos aplanados), *ondulados* (v intermedia; son muy comunes), *linguoides* (v alta) romboides (crestas reticuladas, se desarrollan en láminas de agua de $< 2\text{cm}$ de profundidad, v relativamente altas $F \sim \text{ó} > 1$).

Grandes: $L: 60\text{cm}-30\text{m}$; incluyen a las ondas de arena y las dunas; tipos: cresta recta, (de $<$ velocidad que los ondulados; $L/H > 20$), cresta ondulada (continua), lunar (discontinua, $>v$), linguoides (son raros y similares a los pequeños) romboides (similares a los pequeños). Tipos: barras o bancos de arena (2D) y dunas (3D).

Gigantes ($>30\text{m}$, necesarias profundidades de agua de varios m, $L/H > 30$)

Antidunas: formas de alta energía de corriente; tipos: a) por depósitos en la cara de avalancha; b) cubriendo toda la antiduna c) se crea un flujo de retroceso debido a la ondulación elevada de la superficie del agua, que se inestabiliza y rompe, hacia atrás, por inercia. Suelen presentar crestas

lineales y de baja relación aspecto ($L: 1\text{cm} - 6\text{m}$). Se pueden formar en corrientes de turbidez.

Tema 6b. ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS. ESTRUCTURAS EROSIONALES

6b.1. Definición huellas y rastros de diverso género que producen una forma en esencia erosiva

6b.2. Algunos ejemplos:

a) marcas de superficie:

-rill marks: redes de microcanales, con perfiles en U, que evacuan el agua después de altos niveles de agua (mareas, crecidas...); se clasifican en función de su aspecto: en forma de dientes, en peine, digitales, cónicos (todos estos en fondos de pendiente media), ramificados (bifurcación siempre aguas-arriba), meandriformes, bifurcados (estos últimos en bajas pendientes).

-marcas del nivel de agua (en zona intermareal, embalses..., por descenso progresivo del nivel de agua)

-de espuma (procedente del oleaje, marcan la línea de costa, o nivel de las aguas)

b) marcas de excavación (*scour*):

-flutes (pliegues) consisten en huecos elongados aguas arriba; se conservan muchas veces los moldes, más que los huecos; su origen es la generación de vórtices (efecto burbuja del flujo) erosionando en retroceso; pueden ser linguoides, triangulares, cónicos o bulbosos; se pueden encontrar en medios marinos someros.

c) marcas de obstáculos:

-colas de arena: zonas de sombra (acumulación) debido a pequeños obstáculos, creándose, a la vez, erosión en la parte frontal y lateral del obstáculo; se crean en áreas de fuerte deflación (erosión-vaciado)

d) marcas de impactos:

-groove (surco): producidos por partículas que ruedan, impactan con brecha (*prod marks*) o con deslizamiento (*bounce: rebote marks*) y se arrastran por el fondo

-chevron marks, marcas dentadas debidas al arrastre y arremolinamiento en la parte trasera de la partícula que produce una adherencia del material (fino)

-gotas de lluvia de morfología circular o elíptica según la trayectoria de las gotas; el spray marino puede dar formas similares

Tema 6c. ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS: ESTRUCTURAS DE DEFORMACIÓN

6c.1. Definición son estructuras generadas con posterioridad al proceso de sedimentación

6c.2. Tipos:

a) de superficie:

-grietas de desecación: originadas por la desecación y compactación de fangos, creando una malla de polígonos, normalmente cóncavos hacia arriba; puede formarse también en superficies sumergidas, por floculación y compactación; también se pueden formar por aumento de la salinidad, en lagoons; todas las grietas formadas bajo agua están peor desarrolladas y definidas.

b) de sección vertical:

-de miga de pan, o estructura de burbujas, común en zonas intermareales, debido a una sedimentación rápida que atrapa burbujas de aire, tamaño: unos mm y ovaladas; en fangos ricos en materia orgánica también se pueden formar burbujas por descomposición de la materia orgánica.

-deslizamiento y desplome (*slump*), movimientos de los sedimentos debido al efecto de la gravedad; están asociadas a una sedimentación rápida y fondos de elevada pendiente; el resultado son deslizamientos, plegamientos y deformaciones plásticas

-de carga, se forman cuando las densidades y las viscosidades cinemáticas de capas consecutivas son muy diferentes (por ejemplo arenas y fango)

c) de bioturbación

-huellas, de movimiento de organismos en superficies lutíticas

-burrows, galerías excavadas por organismos, que pueden incluso recubrir para evitar desprendimientos.

TEMA 7. FACIES (palabra latina referida a la forma exterior, aspecto o apariencia de algo)

7.1. Definición (origen del concepto la minería del carbón y petróleo, de ahí su sentido práctico) masa rocosa con características específicas, formadas en condiciones determinadas, reflejo de procesos y ambientes concretos; se pueden caracterizar por el color, textura, laminación, estructura sedimentaria (ej. microfacies), la composición (ej. litofacies), los fósiles (ej. biofacies), la génesis (ej. facies de trubiditas), el entorno (ej. facies de plataforma), la técnica utilizada para su estudio (ej. facies sísmicas o electrofacies : medidas acústicas, eléctricas y radioactivas)

7.2. Ley de Walther

No todas las facies tienen por que tener un sentido genético o del entorno, aunque para su interpretación ambiental es necesario también saber su contexto. Para ello, se crean las **asociaciones de facies**, las cuales tendrán un sentido genético y de ambiente de formación. Estas asociaciones de facies se consideran como los elementos arquitectónicos del análisis de facies. El ordenamiento de las facies puede ser desde totalmente aleatorio a regular y monótono; aun así se intenta generar modelos predictivos de asociación de facies. La unidad básica se considera la **secuencia de facies** y puede repetirse (ciclo) o no; su identificación puede poner orden al caos y formar la base para el análisis estadístico de una sucesión. Tipos de secuencia: a) *estacionaria*: aporte=acomodación, no suelen ser habituales; b) *granocreciente* o negativa: aporte>acomodación, regresión; c) *granodecreciente* o positiva: aporte < acomodación, transgresión.

A partir de la **ley de Walther de facies** (1984) la secuencia de facies comenzó a tener relevancia, y esta ley dice que: "Varios depósitos con la misma área de facies y a su vez, la suma de rocas de distintas áreas de facies que se formaron una al lado de la otra en el perfil se pueden encontrar unas encima de las otras" Esta ley viene a explicar la evolución en el espacio de ambientes progradantes por ejemplo los deltas sobre el medio costero. Los límites laterales de facies no son paralelos a las isocronas, sino oblicuos. Por otro lado la ley de Walther tiene ciertas limitaciones, como por ejemplo que no deben existir roturas importantes (por ejemplo por erosión) en la sucesión, como en el caso de que un canal de alimentación orade materiales del delta y llegue a depositarse en los sedimentos del frente del delta; o cuando en una secuencia transgresiva el depósito lagoon-barrera se erosiona totalmente por el ambiente de soheface (submareal). Un síntoma de hiatos importantes sería el encontrar contactos entre facies no gradacionales (abruptos o claramente erosivos).

Relación con las variaciones del nivel del mar. La causa de las progradación de facies puede ser autóctica (debido a la propia evolución de las formas) o alocítica (tectónica, isostasia o eustatismo)

7.3. Algunos tipos de facies

- **Facies sísmicas:** Las facies sísmicas se basan en la reflexión (de las ondas sonoras) al atravesar las rocas y sedimentos del subsuelo. Miden la velocidad (v en km s^{-1} , valores de 0.11: arenas a 8.60: dunitas), continuidad, amplitud y frecuencia de las ondas sonoras, cuyos límites forman unidades, cartografiables a 2 y 3 dimensiones. La configuración de reflexión, que registra los patrones de estratificación, procesos

erosivos y deposicionales, canales complejos y deformaciones contemporáneas a la sedimentación. Líneas con reflexión continua marcan continuidad en la sedimentación, y sus cambios pueden reflejar contrastes de facies. Tan importante como la estructura interna es delimitar la forma externa de las unidades, cuyas formas más habituales son: capas, acuñamientos, bancos y formas lenticulares; montículos y abanicos: crecimientos en la vertical (orgánicos o detríticos); relleno de canal, de cuenca o de frente de talud. Las facies sísmicas vienen controladas por las geometrías de las superficies de estratificación, el espesor de los estratos y la litología. Las facies sísmicas se pueden agrupar en **secuencias sísmicas** o unidades sismo-estratigráficas, que representan sistemas deposicionales contemporáneos. Pueden ser de 10-100m de espesor. Sus terminaciones pueden ser discordancia de la parte superior (erosión, truncamiento o solapamiento) e inferior (*downlap* y *onlap*).

- **Diagrafias (electrofacies):** miden la electricidad, radioactividad y acústica de las rocas, para con ello deducir información de su litología, tamaño de grano, densidad, porosidad, presencia de fluidos. Las medidas más comunes son de neutrones, rayos gamma, densidad, sonido, potencial espontáneo (SP), resistividad. Su representación habitual es la de “tela de araña” que consiste en una representación radial de los valores de cada una de las técnicas de diagrafías.

El registro de **neutrones** consiste en la medición de la radioactividad secundaria originada en cada unidad mediante la emisión de neutrones desde un aparato. Responde al contenido en H y presenta valores negativos en rocas porosas (porosidad total) que contienen H en forma de agua, gas o petróleo, carbón y pizarras con alto contenido en materia orgánica. No obstante, la medida de los neutrones se hace mediante la porosidad de neutrones: alta porosidad de neutrones para rocas porosas (carbón > pizarras con alto contenido orgánico> areniscas > calizas > dolomías > sal > anhidrita).

La **densidad** (electrónica de las rocas) se mide mediante la desaceleración de las partículas radioactivas al chocar con los electrones de cada unidad; es función de la litología, porosidad y fluidos que la rellenen. La sal y el carbón registran bajas densidades; anhidrita y roca compacta altas; areniscas porosas, calizas, dolomías y pizarras compactas, densidades intermedias.

Los **rayos gamma** miden la radiación natural (emitida por los isótopos radioactivos: K, U, Th) en general más abundantes en las arcillas, aunque con ciertos matices, ya que la caolinita da bajos contenidos en rayos

gamma; además ciertos componentes de las areniscas (micas, circón, glaucomita, feldespato-K) y las sales K, pueden dar medidas altas. La ventaja de esta medida es que detecta las concentraciones de U, Th.

El potencial espontáneo (SP) se basa en la existencia de corrientes eléctricas naturales en los materiales. Consiste en la medición de la diferencia de potencial entre un electrodo fijo, situado en la superficie y otro que desciende por el pozo, siendo necesario que el pozo esté lleno de lodos o fluidos conductores. Es un reflejo de la permeabilidad de las rocas: calizas, dolomías, areniscas compactas y pizarras: poco permeables.

La acústica de las rocas: mide la velocidad de las ondas P (compresivas) y S (de cizalla) con la que atraviesan los materiales (sólidos y fluidos). Altas velocidades para areniscas, calizas, dolomías; bajas velocidades para el carbón, pizarras y anhidrita; e intermedias para las sales.

La resistividad mide la diferencia de potencial causada al paso de la corriente a través de las rocas; está directamente relacionada con la porosidad y los líquidos que la rellenan. Las pizarras y rocas porosas tienen resistividad baja; petróleo y carbón altas.

BLOQUE IV. MEDIOS SEDIMENTARIOS EN PLATAFORMA Y TALUD

Tema 15a. MEDIOS SEDIMENTARIOS EN PLATAFORMA CONTINENTAL

15a.1. Definición La plataforma es un dominio marino que va desde la costa (límite de actuación del oleaje en el fondo, en buen tiempo, que varía con las mareas, la energía del oleaje y la pendiente de la plataforma) hasta la rotura de pendiente, dando paso al talud continental (profundidades alrededor de 200m y distancias de la costa variables). Pueden ser marginales o pericontinentales y de mares someros (brazos de mar parcialmente confinados; ej. Mar Báltico y Mar del Norte). Los principales **agentes** son las olas de tormentas y las corrientes mareales, oceánicas y de densidad. Las plataformas son en muchos casos lugares de paso para los sedimentos, hacia las fosas oceánicas, y previamente ha tenido que traspasar entornos litorales como estuarios, bahías, lagoons, deltas y llanuras mareales. En la plataforma se puede generar gran cantidad de

sedimento carbonatado. Los grandes espesores de sedimentos de las plataformas dan lugar a fenómenos de subsidencia y de diapirismo de depósitos salinos.

15a.2. Dinámica del agua y el sedimento en las plataformas continentales actuales: esta dinámica es compleja debido a la múltiple influencia de corrientes (oceánicas, mareales, meteorológicas: olas y viento, densidad). Las corrientes mareales, de oleaje y viento inciden sobre las plumas de densidad de agua y sedimentos de los estuarios y deltas. La fuerza de Coriolis impone trayectorias de giro. Las plataformas actuales se pueden considerar relictas, en el hecho de que los sedimentos preHolocenos continentales que constituyen la plataforma han sido invadidos por el mar, y retrabajados por las corrientes. La mayoría de las plataformas pericontinentales son meso y macromareales en sus márgenes internos; incluso la plataforma del mar del Norte es macrotidal sólo en un 50% de su área. Las **corrientes de densidad** son determinantes en la distribución de sedimentos en la plataforma. Flujos hipopícnicos (de menor densidad, de agua dulce o salobre) con sedimento en suspensión (hasta el límite de 20 kg m^{-3}) provenientes de los estuarios o deltas, pueden desarrollar vórtices, a favor de la fuerza de coriolis. Estas plumas son muy sensibles a los upwelling o downwelling causados por los vientos. Durante períodos de descarga alta en el Amazonas se forma una enorme pluma de agua dulce, que se desplaza unos 200 km de la costa y luego gira al NW, paralela al contorno de la plataforma (debido a la fuerte Corriente Brasileña del N). Los flujos hiperpicnicos (de una concentración de sedimentos en suspensión $>30 \text{ kg m}^{-3}$) van por el fondo y salen de estuarios y deltas. Un ejemplo de este tipo de flujos es el del río Amarillo, que discurre en el Mar Amarillo. No obstante, estos flujos son peor conocidos debido a que son corrientes de fondo.

La arquitectura de la plataforma revelada por la sísmica de reflexión presenta un esquema general de: progradación (por bajada del nivel medio del mar), erosión basal (por avance de medios litorales más energéticos, alternando erosión transgresiva y sedimentos procedentes de la costa) y reconstrucción (por estabilidad y subida del nivel medio del mar). Las plataformas se clasifican en dominadas por las mareas y las dominadas por las condiciones atmosféricas (oleaje y viento), aunque en general se produzca una mezcla de procesos.

15a.3. Facies de plataformas actuales factores: el material procedente de la costa (plumas fluviales), el vector y régimen de las corrientes (oleaje-marea), la morfología heredada y tectónica. En realidad no hay un patrón único de distribución de facies con la profundidad; por ejemplo los finos se

pueden acumular en cualquier posición de la plataforma dependiendo del régimen de corrientes y su fuente. Otra cuestión a tener en cuenta son los depósitos acumulados en niveles bajos del mar (épocas glaciares): antiguos valles fluviales y glaciares.

a) Para las plataformas dominadas por las mareas la distribución del sedimento depende de los patrones de transporte mareal. La distribución de la carga de fondo suele ser irregular. Ello suele venir asociado a los centros de las células anfidrómicas (puntos sin velocidad de corriente mareal y por ello posible acumulación de finos) o con aceleraciones locales, debido a estrechamientos en la línea de costa y por ello localización de carga de fondo. Existe una tendencia generalizada a decrecer el tamaño de las partículas de sedimento con la disminución de la velocidad de la corriente mareal (de la costa al interior), de gravas a finos, dependiendo de la disponibilidad de tamaños.

La distribución de **facies** sería la siguiente (de la costa al interior, de la plataforma interna a la externa):

- **surcos y ondulaciones de gravas**
- **cordones de arena** (dimensiones: largo \gg ancho $>$ alto; por ejemplo: $>20\text{km}$ de largo, 20 m de ancho, 10 m de altura) con una profundidad de agua entre 20 y 100 m , sobre sustratos de gravas cubiertos por arena gruesa.
- **grandes ondulaciones de arena: dunas:** dimensiones: $3\text{-}15 \text{ m}$ de alto y $0,6 \text{ km}$ de longitud de onda; cubren grandes áreas ($>100 \text{ km}^2$). Durante las tormentas pierden mucho volumen. La estructura interna de estas dunas no es muy conocida pero se supone que deben consistir en estratificación cruzada de gran tamaño, de un solo sentido, con sets a mayor escala, con estratificación en el sentido contrario; **y crestas o barras:** son las formas más espectaculares de la plataforma; por ejemplo las del mar del Norte presentan unas dimensiones de 40m de alto, 2 km de ancho y 60 km de largo, separadas unos $3\text{-}12 \text{ km}$. Las crestas se encuentran en perfecto equilibrio con el régimen actual mareal, orientadas sus crestas paralelas a la dirección de velocidad máxima mareal. Su estructura interna revelada por perfiles de sísmica muestra las migraciones de las crestas.
- **pequeñas ondulaciones de arena**
- **mantos de arena con ripples**
- **parches de arena**, que terminan en depósitos de finos, con abundante bioturbación.

b) Las plataformas dominadas por las condiciones atmosféricas (tormentas), suelen ser micromareales y tienden a mostrar un decrecimiento del tamaño de las partículas de sedimento hacia el mar. Ejemplo de estas plataformas son las de Oregon y la parte SW del Golfo de Méjico; los finos se sitúan en la plataforma externa y a menudo se mezclan con arenas relictas de períodos más bajos del nivel del mar. Los ripples formados por el oleaje pueden crearse a profundidades por encima de los 200m en la plataforma de Oregon, y por ello son bastante comunes en la plataforma externa, aunque pueden ser destruidos por bioturbación. La plataforma continental E de USA, de una anchura de 75-180 km, está también dominada por las condiciones atmosféricas e investigada a detalle. El transporte del sedimento es controlado por las tormentas tropicales. Las morfologías del fondo consisten en campos de arena formados por crestas de más de 10 m de altura y pendientes muy suaves ($<3^\circ$), separadas por pasillos de gravas. Barras de arena paralelas a la línea de costa, heredadas de períodos de bajo nivel del mar, representan antiguos depósitos de shore face (frente de playa). También existen barras de arena actuales formadas en tormentas, por corrientes paralelas a la costa.

15a.4. Tipos de plataformas en función y la influencia del litoral:

1. **Plataformas de áreas glaciares:** Los glaciares erosionaron, en períodos de nivel del mar bajo (glaciaciones) el substrato y los sedimentos de plataforma, no sólo por el arrastre de hielo, sino también por la acción de las aguas de deshielo. A esto hay que añadir los depósitos glaciares: los tills (y correspondiente morfología: las morrenas) y depósitos glaciomarinos. Sobre estos rasgos y depósitos heredados actúan los procesos marinos, que pueden acumular arena en barras y tapizar el fondo con lutitas, suavizando el relieve.

2. **Plataformas con barras alargadas de arena:** Es frecuente encontrar en la plataforma interna barras de arena grandes y alargadas, como por ejemplo la plataforma atlántica central de USA, amplia y tectónicamente inactiva y dominada por las tormentas, pero en menor intensidad que la costa pacífica de USA. Se interpreta que estas barras corresponden con antiguas islas barreras, sumergidas en la transgresión holocena. Así, el sedimento es heredado, y las texturas y formas del fondo manifiestan un retrabajamiento, ya que el aporte sedimentario actual es bajo. Las antiguas islas barreras a su vez pudieron formarse en distintos entornos, por ejemplo: a) en la parte baja del shoreface; b) a partir de una acumulación de arena en los estuarios; c) a partir de un cabo, por deriva litoral.

3. **Plataforma en relación con grandes deltas:** la acumulación del material puede producir subsidencia y abombamientos en el borde de la

plataforma y el talud, o por el contrario puede ser toda la plataforma la que prograda a causa del enorme aporte sedimentario. También puede ocurrir que la progradación sea debida no a un delta, sino a la acumulación de material de varios sistemas fluviales y redistribuidos por la plataforma, como por ejemplo sucede en la plataforma oriental de la península Ibérica, durante el Neógeno.

4. **Plataforma con arrecife de coral:** los arrecifes y bancos de carbonato constituyen zonas elevadas en la plataforma, colonizadas por organismos de las zonas tropicales, rodeados por abanicos de sedimento carbonatado de origen orgánico. Se sitúan al margen de la plataforma, con morfología alargada e irregular o bien construyen pináculos y bajíos.

5. **Plataforma bordeada por islas o bancos rocosos:** se pueden dar en plataformas amplias o estrechas y un ejemplo de este tipo es la plataforma occidental de la Península de California (Méjico).

6. **Plataformas relacionadas con la tectónica de placas:** situadas en zonas tectónicamente activas, estrechas y de pendiente media más elevada que las de los bordes pasivos, como por ejemplo la de Oregon, en la costa noroccidental de USA, que es una plataforma expuesta a temporales del Pacífico, con control de corrientes oceánicas, siendo las de marea secundarias. La distribución de facies está controlada por la descarga fluvial, las corrientes ascendentes de upwelling y el retrabajado físico y orgánico. Se diferencian 3 facies esenciales: arena (plataforma interna), mixta y lutítica (plataforma externa). En verano las corrientes son débiles y actúan sólo en la plataforma interna, quedando el resto sometido a la bioturbación; en invierno la plataforma queda sometida a fuertes vientos y olas oceánicas capaces de erosionar el fondo y transportar limo y arena en suspensión y carga de fondo. El aporte de sedimento fluvial se estratifica en capas turbias, a favor de 3 termoclinas: una superficial, de carácter estacional, otra media, permanente y una tercera en el fondo.

Se considera que la plataforma está en vías de adaptación a las condiciones energéticas actuales.

15a.5. Criterios de reconocimiento de plataformas fósiles Los criterios más fiables son los basados en las características que dependan de la salinidad y la profundidad de las aguas, es decir, restos fósiles, minerales autógenos y ciertos parámetros geoquímicos. Los datos sedimentológicos, por sí solos, no pueden considerarse como diagnósticos, aunque normalmente, se caracterizan por unidades litoestratigráficas de grandes dimensiones y de morfología más o menos tabular, en los que no es habitual encontrar cuerpos canalizados importantes.

Los **fósiles** más indicativos son los de invertebrados, puesto que suelen estar sometidos a un estrecho margen de salinidad (ej. Los organismos estenohalinos: la mayoría de corales, cefalópodos, braquiópodos, equinodermos, briozoos y algunos foraminíferos calcáreos). Hay otros que sí se adaptan a una rango grande de salinidad (eurihalinos: muchos gasterópodos y bivalvos).

Los **minerales autógenos** que están casi o totalmente restringidos a ambientes marinos son: chamosita y glauconita (silicatos de Fe) y fosfatos. La **glauconita** se forma por precipitación directa o por alteración de filosilicatos detríticos y materia orgánica (pellets fecales), y se acumulan bajo la acción de las corrientes. La **chamosita** suele asociarse a sedimentos clásticos, oolitos ferruginosos y depósitos de siderita, en aguas más cálidas que para la glauconita. Los **fosfatos** requieren velocidades muy bajas de sedimentación y se forman en bajíos y áreas de ascenso de corrientes profundas: upwelling (plataforma externa). La acumulación de material biológico (rico en fósforo) se transforma en fosfato cálcico en un proceso químico lento. Estos depósitos pueden constituir un yacimiento económicamente explotable, por ejemplo: la plataforma Chilena-Peruana, del W de Centroamérica, y de la Baja California; plataforma Sahariana, de Mali, Sudáfrica, plataforma del SW de la India; plataforma de W y SW australiano, y plataforma S de Nueva Zelanda.

Las **relaciones geoquímicas** que pueden usarse son B/Ga y B/Li en illita y lutitas.

TEMA 15b. PLATAFORMAS CARBONATADAS

15b.1. Caracterización: el sedimento predominante es carbonatado (habitualmente cementado) formado en la propia plataforma. El límite de la plataforma con el litoral (de no actuación del oleaje en condiciones de tiempo normal) no se define en muchas plataformas carbonatadas. Los sedimentos carbonatados consiguen acumulaciones apreciables cuando el aporte de material terrígeno es bajo. Los restos de organismos con concha (moluscos, equinodermos,...) pueden encontrarse en cualquier plataforma, pero las construcciones coralinas arrecifales y los carbonatos inorgánicos están confinados a bajas latitudes y a aguas someras (menos de 25 m de profundidad; no obstante se pueden encontrar corales relictos a grandes profundidades). Los corales de aguas frías (ej. *Lophedia*) no construyen arrecifes como tales, pero forman colonias en aguas profundas desde 100-600 m donde la temperatura del agua ronda los 10°C).

Las estructuras sedimentarias son comunes al resto de los sedimentos, aunque tienen algunas peculiares, como son:

- los **hard-grounds**: horizontes de cementación sinsedimentaria justo por debajo de la superficie del sedimento y antes del enterramiento por la siguiente llegada de material, y

- los **paleokarst**: debidos a procesos de disolución por aguas meteóricas de superficies si la superficie emerge, dando una superficie irregular y agujereada). Las partículas de carbonato tienen un origen bioquímico. Algunos de los organismos productores de carbonato son:

Moluscos: bivalvos y gasterópodos: conchas de aragonito (CaCO_3 ortorrómbico) que por ser metaestables pasa fácilmente a calcita (CaCO_3 romboédrico)

Braquiópodos, y equinodermos: calcita

Cnidarios (corales) actuales y mesozoicos: aragonito; paleozoicos: calcita.

15b.2. Componentes mayoritarios de los sedimentos carbonatados:

- **Biogénicos**: fracturado por procesos físicos-químicos-biológicos, puede haber incrustaciones de otros organismos y cementado. Son reflejo de las condiciones de profundidad y energía del medio.

- **Pellets**: de tamaño limo grueso o arena y pueden proceder de heces litificadas de organismos comedores de fango; de fragmentación de algas calcáreas.

- **Granos cubiertos (oolitos)**: por algas, por precipitación química. Se forman en ambientes muy someros y pueden recorrer (por acción mareal y del oleaje) grandes distancias.

- **Agregados**: aglutinamiento de granos por hongos o algas. Corresponden a ambientes de baja energía y someros.

- **Litoclastos**: sedimento carbonatado cementado

- **Fangos carbonatados**: es el que representa mayor porcentaje en los sedimentos y rocas carbonatadas y su origen es poligénico. Las algas calcáreas de aguas someras, y más en concreto las algas verdes (ej. *Penicillus*) son capaces de producir grandes cantidades de aragonito tamaño fino. En aguas profundas los barros calcíticos se producen por fragmentación de foraminíferos plantónicos productores de carbonato.

15b.2. Arrecifes de coral

El arrecife de coral es una comunidad biológica compleja. La palabra coral se usa para designar un grupo de organismos, del filum Cnidaria que segregan rígidos esqueletos calcáreos. Las colonias de coral, mediante su capacidad para depositar CaCO_3 en sus esqueletos dan origen a colonias de diversas formas y tamaños. Algunas formas son ramificadas, otras tienen formas masivas que pueden alcanzar gran tamaño. La estructura arrecifal está constituida por grandes agregaciones de estas colonias, fragmentos desprendidos y acumulaciones

de sedimentos y arenas calcáreas que se origina de los propios corales y de los otros organismos con esqueletos calcáreos que viven asociados a estos. A estas estructuras rocosas se les denomina arrecifes. Los arrecifes de coral se desarrollan en aguas tropicales donde prevalecen muy bajos niveles de nutrientes, pero subsisten debido a la alta productividad se mantienen.

TIPOS DE CORALES: PETREO: estructuras de gran firmeza y apariencia rocosa. BLANDO: flexibles, asemejando cuernos y abanicos

FORMAS DE LOS ARRECIFES:

ATOLONES- Son cinturones de coral de varios km de diámetro que rodean una laguna central. La *parte externa* es submarina, tiene una fuerte pendiente y constituye la base del coral muerto y es la cumbre del coral muerto y vivo. La corona del coral es el rellano que apenas emerge en la bajamar. La *parte interna* tiene menor pendiente que la externa. El lagoon ó laguna central, es un fondo plano o fondo de arena calcárea o de pináculos de coral vivo. Hay mayor sedimentación orgánica que terrígena.

ARRECIFES LINEALES- Crecen en aguas someras y bordean la costa. Tipos:

Arrecifes de barrera: Están separados por un estrecho brazo de mar y son paralelos a la costa. La sedimentación consiste en derrubios del dorso, arenas transportadas por el viento, los cursos del agua y corrientes, limos terrígenos y organógenos.

Arrecifes marginales: Se encuentran adosados a un litoral no coralino, pudiendo existir un arrecife de barrer. En la parte orientada al mar se dan playas de arena coralina y en el lado opuesto, se encuentra el canal de embarque, que es un canal poco profundo que separa al arrecife de su soporte terrestre.

FACTORES DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO:

- Temperaturas cálidas, no inferiores a los 21-22°C. Las regiones con temperaturas menores o con períodos cortos de temperaturas por debajo de los 18°C carecen de comunidades coralinas bien desarrolladas.
- Buena iluminación, debido a los requerimientos de luz de las algas simbióticas. El mayor desarrollo de la estructura coralina ocurre a profundidades < de 20 m. Más allá de esta profundidad se encuentran taludes de coral muerto, revestidos de sedimentos calcáreos que se originan, en gran medida, de la misma actividad biológica en la parte más llana del arrecife.
- Alta salinidad, salinidades similares a las de las aguas oceánicas. (entre 27 y 40‰); se les considera organismos "estenohalinos". Bajas salinidades provocadas por lluvias torrenciales o aportes fluviales inducen a los pólipos

- a expulsar sus zooxantelas.
- Baja tolerancia a sedimentos suspendidos. La turbidez reduce el nivel de iluminación y utilización de la energía solar. Además interfiere con la alimentación de los pólipos y aumenta los gastos energéticos de estos para mantener sus superficies limpias.
- Oleaje o corrientes, transportando el plancton que capturan los pólipos y donde el flujo de agua contribuye a eliminar sedimentos de las superficies de los corales y el fondo.
- Baja tolerancia a emersión prolongada, no puede crecer por encima del nivel medio de la bajamar. Las mareas bajas causan mortandades, sobre todo cuando estas mareas bajas ocurren de día y los corales quedan sometidos a los fuertes rayos solares y la desecación.

PROCESOS EN EL ARRECIFE: **Construcción**: Proceso que da lugar al crecimiento del arrecife y que está causado: *Constructores primarios*: que forman la base rígida (estromatolitos, algas calcáreas y colonias coralinas) *Constructores secundarios*: consolidan la estructura (algas coralinas incrustantes, gasterópodos, briozoos, foraminíferos, etc.). **Destrucción**: Es el proceso equivalente a la erosión. Causas: Físicas: Tormentas, olas, mareas... Biológicas: Organismos que perforan, rascan, rompen y comen fragmentos coralinos. **Sedimentación**: Si los sedimentos que provienen de la erosión no son muy abundantes, rellenan cavidades del arrecife; pero si existe un exceso, entierran a éste. **Cementación**: Proceso por el cual el CaCO₃ proporciona rigidez al arrecife. Existen dos tipos de cementos: Peletoidal: Asociado a la actividad microbiana y estromatolítica. Abunda en arrecifes antiguos y montículos. y Brotoidal: Asociado a la actividad algal.

TASAS DE CRECIMIENTO Bajas: Se dan en aguas oscuras y eutróficas entre 25-100 m. Altas: Aguas superficiales y oligotróficas, a menos de 25 m. En el Mar Caribe los arrecifes tienen una tasa de crecimiento medio entre 9-15 m/año. La Gran Barrera Australiana crece de 7 a 8 m/año.

15b.3. Tipos de plataformas carbonatadas:

- a) **Epeiric (epicontinentales)** no hay ejemplos actuales. Fueron muy habituales en el Paleozoico y Mesozoico. Probablemente representaban la parte interna de extensas plataformas. Sin representantes actuales, la dinámica de estas plataformas es difícil de comprender, pero parece no tener indicios de zonas restringidas sino más bien abiertas al mar. La actividad mareal debió ser el proceso dominante. Corresponden a plataformas someras progradantes

- b) **Aisladas:** de morfología variable, rodeadas por mar abierto en todo su contorno, e inclinaciones de talud de más de 15°. Un ejemplo actual es el Gran Banco de las Bahamas (Caribe): fondos de muy poca pendiente y someros (<10m de agua); en el borde de la plataforma se desarrollan arrecifes (sobre todo en las caras de mayor intensidad de corrientes) y bancos de arena oolítica; en el interior se depositan finos.
- c) **Plataformas continentales (*shelves*):** de aguas someras, unidas al continente y con taludes pronunciados. Los arrecifes abundan en su borde externo, que si son de suficiente magnitud, la plataforma queda protegida a modo de lagoon. Un ejemplo actual con reborde es la plataforma de Florida, donde la ruptura de pendiente se produce a los 8-18 m de profundidad; presenta un cinturón recifal de 1 km de ancho y 200 km de largo.
- d) **Rampas:** con pendientes suaves, <1°. Se pueden diferenciar 3 tramos: 1) rampa interna: la zona de mayor energía del oleaje, con bancos de arena; 2) rampa media: dominada por los procesos de tormenta, con depósitos de tempestitas; 3) rampa externa: desde el límite de actuación en profundidad de las tormentas hasta el fondo marino. Pueden generarse deslizamientos gravitacionales aunque no son muy abundantes. Los arrecifes coralinos se sitúan en la rampa interna o media. Un ejemplo de este tipo de plataformas carbonatadas es el de la rampa costera del Golfo Árabe.

Tema 16-17. PROCESOS SEDIMENTARIOS EN TALUD, GLACIS CONTINENTAL Y CUENCAS OCEÁNICAS

16.1. Talud continental: pendientes 1/40, es una corteza continental fracturada y cubierta de sedimentos, siendo el borde real del continente.

16.2. Elementos morfológicos erosivos y deposicionales: Sistemas turbidíticos Forman depósitos acumulados al pie de 1 **cañón submarino** y representan en volumen las **acumulaciones clásticas** más importantes en los ambientes marinos profundos.

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA: Los fondos oceánicos están cubiertos por depósitos turbidíticos asociados a cañones submarinos: ATLÁNTICO NE: desarrollados en el Golfo de Vizcaya. ATLÁNTICO NO: en el margen continental de Canadá, el del Mississipii en el Golfo de Méjico, Magdalena al sur de la cuenca Colombiana, canal medio-oceánico NAMOC en el mar del Labrador, el de Providencia en las islas de las Bahamas y el de Soto. ATLÁNTICO SE: en el Zaire al SO de África. ATLÁNTICO SO: el del Amazonas, al NE del margen continental del Brasil y el canal medio-oceánico Ecuatorial. PACÍFICO NE: muchos ejemplos.

SISTEMAS TURBIDÍTICOS: constituidos por 5 elementos arquitectónicos principales:

1. **cañón submarino** aporta sedimentos al sistema turbidítico. Estos pueden nacer cerca de la costa, en la plataforma continental o en el talud continental y muere al pie del talud continental y en la cuenca oceánica. Están caracterizados por la ausencia de diques sedimentarios. Presentan un **perfil** en forma de "V" o son de fondo plano. Siguen una trayectoria paralela, perpendicular u oblicua al margen continental. Su **trazado** puede ser rectilíneo, meandriforme o longitudinal. Se extiende desde pocos km (cañones submarinos de los márgenes abruptos), hasta centenares de Km (márgenes progradantes). Los más largos a nivel mundial son el de Bering y el de Agadir.

2. **Canal turbidítico** son todos aquellos **conductos submarinos** (no cañones), desarrollados en los sedimentos del lóbulo, a través de los cuales fluyen agua y sedimentos en los sistemas turbidíticos.

El canal turbidítico representa la continuidad de un cañón submarino, donde circulan corrientes canalizadas de alta energía. Durante los descensos del nivel del mar se dan los mayores aportes sedimentarios hacia cuenca.

3. **Depósitos de desbordamiento:** Se desarrollan en ambos márgenes de los canales y se forman por desbordamiento del material fino que viaja en suspensión. El área ocupada se divide en dos ambientes, proximal y distal con ausencia de importantes relieves en ambos márgenes del canal, reflejando una morfología plana.

4. **Lóbulos:** Se desarrollan al pie del talud. Son de geometría variable, de forma confinada, sin confinar, tubulares y monticulares. Es el elemento más importante del sistema turbidítico desde el punto de vista de la exploración de Hidrocarburos ya que los lóbulos representan los ambientes donde tienen lugar una mayor deposición de sedimentos (detriticos y orgánicos).

5. **Zonas de transición canal-lóbulo:** Tiene características comunes a los depósitos de relleno de canal y a los lóbulos, con morfologías erosivas y deposicionales en forma de depresiones aisladas y surcos. Por lo tanto las corrientes turbidíticas ya no están canalizadas con gradientes altos sino que ahora se extienden lateralmente y fluyen a través de pendientes suaves en áreas donde se depositan los lóbulos.

SEDIMENTOS Y PROCESOS SEDIMENTARIOS:

a) depósitos resedimentarios: flujo en masa, de derrubio, granular, fluidificado y turbulento. Son los que transportan partículas por fuerzas gravitacionales.

- b) Depósito pelágico/hemipelágico: relacionados con la decantación de partículas en suspensión y es un proceso continuo. Es el proceso más importante para la sedimentación de organismos plancónicos calcáreos o silíceos, con una velocidad de caída muy lenta, frente a los pellets y flóculos que lo hacen más rápidamente.
- c) Depósito de corrientes de fondo: actúan independientemente de las variaciones de estabilidad sedimentaria y pueden alcanzar velocidades de 10-20 cm/s.

Los grupos a) y b) están relacionados con épocas de estabilidad-inestabilidad sedimentaria. En épocas de inestabilidad sedimentaria predominan los procesos discontinuos (flujo gravitatorio) y por lo tanto, la sedimentación es episódica y se aporta en mayor % materiales detríticos hacia las zonas profundas. En cambio, en períodos de estabilidad sedimentaria las tasas de sedimentación descienden porque se depositan partículas biogénicas asociadas con suspensiones por sedimentación lenta y continua a través de la columna de agua.

RELEVANCIA ECONÓMICA:

Los sistemas turbidíticos representan las mayores reservas de petróleo en muchos de las cuencas sedimentarias del mundo (80 cuencas).

Los sistemas turbidíticos producen el 22% del petróleo en el Mar del Norte, más del 83% en la cuenca de Campos en el margen continental de Brasil y el 90% de la producción de la cuenca de los Ángeles.

16.3. Deslizamientos submarinos: comunes al pie del talud, y en islas oceánicas (ej. Canarias). Debidos a la sedimentación en zonas con cierta pendiente. La morfología erosiva produce una cicatriz de deslizamiento y en su base se acumula el depósito deslizado, con mayor o menor grado de deformación. En las islas oceánicas, suele estar asociado a la desestabilización de material del edificio volcánico, favorecido por fracturas y movimientos sísmicos, que inician el movimiento.

16.4. Depósitos pelágicos: el término se refiere a los sedimentos generados en mar abierto. Está mayoritariamente formado por material biogénico (>75%). El material biogénico incluye restos calcáreos, silicios y orgánicos del plancton, que se conoce como nieve marina. Los **factores** que controlan el flujo de material pelágico son: **Disolución** (a una determinada profundidad-lysoclina-CCD- se disuelven las partículas de carbonato por subsaturación. También se produce una subsaturación de la sílice, pero las partículas con cubierta orgánica pueden llegar a acumularse. **Productividad** la mayoría de los restos orgánicos sufren una oxidación bacteriana en la columna de agua, siendo máxima a una profundidad de 300-1500m, formándose una zona rica en nutrientes y

pobre en oxígeno, que puede favorecer la formación de fosfatos, y los upwellings. **Enmascaramiento** por predominio de uno de los factores; ej. predominio del material silíceo en cinturones de alta productividad, material carbonatado en las dorsales y plataformas, por encima del CCD, por debajo del CCD en las zonas de barrera predominio de las arcillas rojas procedentes del polvo atmosférico y terrígenos.

La clasificación de los sedimentos pelágicos (pelíticas) se hace en función de sus posibles componentes (véase Figura relacionada): no biogénicos (terrígenos) y biogénicos (carbonatados y silicios).

Cuando la velocidad de sedimentación es muy baja se forman los *hardgrounds* (suelos endurecidos), debido a un proceso de cementación. A veces se pueden cubrir de costras fosfatadas o ferromagnesianas. Dentro de las **pelagitas no biogénicas** se incluyen los nódulos de Fe y Mn, fosfatos y las arcillas rojas (aunque en realidad son más bien verdosas, por presencia de Fe^{+2}). Los depósitos de **carbonatos biogénicos**, sufren un proceso de diagénesis con mayores transformaciones que las pelíticas no biogénicas. Progresivamente van transformándose en chalk (a 200m de profundidad de enterramiento) y luego en calizas (a 600m de profundidad de enterramiento). En este proceso se destruyen los microfósiles y el cemento pasa de micrítico a esparítico. Los fósiles silíceos, formados por ópalo, se transforman en el enterramientos a cuarzo (cristobalita microcristalina). Por disolución y removilización se forma chert.

16.5. Depósitos hemipelágicos sedimentos generados en los márgenes continentales, formados por material biogénico (habitualmente >75%) y detrítico (arcillas y limos). Los factores de formación son los mismos que para los depósitos pelágicos (disolución, productividad y enmascaramiento). La **fuentes** del material terrígeno (véase Figura relacionada) puede ser: fluvial, de la plataforma, de glaciares, de la atmósfera (polvo) y volcánico. Este material es transportado por el fluido y sedimentado (decantación o abandono de carga). Las **hemipelagitas** tapizan el talud continental y las cuencas semicerradas. La tasa de acumulación es muy variable, y ronda los 5-15 cm/año. Las hemipelagitas son sedimentos finos con componentes terrígenos y biogénicos, muy bioturbados por lo general, y asociados a fosfatos en medios deficientes en oxígeno y a glaucomita en aguas más someras. Los fenómenos de compactación y diagénesis son similares que los de las pelíticas.