

DIAGÉNESIS: PROCESOS, ETAPAS Y AMBIENTES

1. INTRODUCCIÓN

Definición. Todas las modificaciones, transformaciones, cambios naturales que tienen lugar en los sedimentos y rocas sedimentarias desde el depósito hasta el metamorfismo o la exhumación (Walther, 1893; Purdy, 1968). Los cambios están generados por procesos físicos, químicos y biológicos, tienen lugar a presiones y temperaturas próximas al depósito (hasta 150°C, 10 Km = 3 Kb) y sus límites están poco definidos (halmirólisis, anquimetamorfismo).

Factores. Las transformaciones están controladas por distintos tipos de factores:

- *Ambientales* (externos) donde hay factores físicos: presión y temperatura, relacionados con la profundidad de soterramiento y el gradiente geotérmico, factores químicos: naturaleza y movimiento del agua intersticial, donde interviene la composición (sales, pH, Eh) y la dinámica (flujo) de los fluidos, y factores biológicos: la materia orgánica y los distintos organismos vivos asociados, sobre todo microorganismos (algas, hongos, bacterias).
- *Litológicos* (internos) donde intervienen: mineralogía (estabilidad mineral), textura (tamaño de grano), porosidad (abundancia y tamaño de poro), en este sentido los procesos diagenéticos son selectivos, dependen de las características petrográficas de partida.
- *Tiempo*: son procesos de cinética lenta, requieren un tiempo más o menos prolongado.

La diagénesis supone normalmente la consolidación del material y conlleva por tanto un incremento de dureza y coherencia: *proceso de litificación*; atiende fundamentalmente al proceso dinámico de maduración de un sedimento en su paso a roca; implica siempre un cambio en las características petrográficas: las características petrográficas que presentan las rocas son el resultado del depósito más diagénesis.

Importancia. En las rocas carbonatadas la diagénesis destaca por la importancia de las transformaciones que tiene lugar (cambios químicos, mineralógicos, texturales y de porosidad) y por su desarrollo temprano o precoz. Así, tras la sedimentación, la diagénesis es casi inmediata, la cementación puede comenzar sin soterramiento previo y distintos procesos diagenéticos puede repetirse en las diferentes etapas de la diagénesis.

Su estudio. El análisis de la diagénesis puede enfocarse desde distintos puntos de vista: los procesos, las etapas y los ambientes.

a) *Procesos*: mecanismos que actúan, tipos de transformaciones que pueden experimentar las rocas. Se distinguen los siguientes: micritización, compactación, disolución, cementación, neomorfismo y reemplazamiento.

b) *Etapas*: estadios evolutivos, períodos, fases temporales. Se establecen distintas divisiones y nombres según diferentes autores:

- Strakhov (1960) considera las siguientes etapas:

- . Sedimentogénesis: incluye erosión, transporte y sedimentación.
- . *Diagénesis* (I: oxidante, II: reductora): incluye neofonnación de minerales y se produce un nuevo equilibrio por procesos químicos y acción de microorganismos.
- . *Catagénesis* (III: cementación, IV: deshidratación y recristalización).
- . *Epigénesis*: tiene lugar por ascenso a niveles superficiales (descenso de P y T).
- . Metamorfismo: tiene lugar por descenso a niveles profundos (ascenso de P y T).

- Frairbridge (1967) establece etapas basadas en el contenido en fluidos:

. *Sindiagénesis*: actúan aguas de la misma naturaleza que las del depósito (incluye la sedimentación); distingue un estadio inicial (oxidante) y un primer soterramiento (reductor) bajo la actividad bacteriana con un alcance de 1-100 m y de 1-10⁴ años.

. *Anadiagénesis*: actúan aguas intersticiales de distinta naturaleza que las iniciales; constituye la fase de compactación y litificación con expulsión de las aguas intersticiales.

. *Epidiagénesis*: actúan aguas meteóricas, muy diferentes de las anteriores, subsaturadas, oxidantes; corresponde a la fase de emersión y neomineralización.

- Choquette y Pray (1970) establece etapas basadas en la porosidad, criterio que considera más objetivo ya que es observable en las rocas, sobre todo en las carbonatadas. Distingue diferentes estadios: predeposicional, deposicional y postdeposicional ó diagenético, subdividido éste en:

. *Eogénesis*: fin del depósito y primer soterramiento bajo la influencia de factores superficiales (aguas agresivas): se genera porosidad; etapa de duración corta y limitada, llega hasta 100 m profundidad independientemente del grado de litificación del sedimento.

. *Mesogénesis*: soterramiento a mayor profundidad fuera del alcance de aguas superficiales: se destruye porosidad; etapa de duración larga e ilimitada (desde el soterramiento inicial a la erosión inminente), los procesos que sufre la roca dependen de su estado inicial, el nivel de soterramiento, los fluidos presentes y la actividad tectónica.

. *Telogénesis*: cuando rocas largamente soterradas emergen y se ven afectadas por nuevos procesos superficiales (aguas muy agresivas): se genera porosidad; su límite superior es la superficie de erosión (submarina o subaérea) y el inferior es gradacional (hasta adonde llega el nivel freático y por tanto los procesos de alteración).

c) *Ambientes*: sitios que se distinguen por su localización geográfica y sus características ambientales. Su división es fundamentalmente ecológica-hidrológica, relacionada con las características de los fluidos de poro (su composición, flujo, temperatura y presión): "el agua es el combustible de la diagénesis". Los principales ambientes diagenéticos son:

- *Marino normal*: el fluido de poro es agua marina más o menos modificada, sobresaturada en carbonatos, por lo que genera cementos: "la cementación es mayor que la disolución". Afecta siempre a sedimentos (donde los carbonatos son metaestables) y se distingue entre: *aguas poco profundas* (intermareal, submareal, arrecifal) y *aguas profundas* (fondo marino) por debajo de la profundidad de compensación del aragonito.

- *Meteórico (continental)*: el fluido de poro es agua dulce superficial, meteórica, rica en CO₂, no saturada, que produce importantes modificaciones texturales y genera poros: "la cementación es menor que la disolución". Puede presentarse sobre carbonatos metaestables, en etapas tempranas (eogénesis) donde se distingue entre: *aéreo* (superficial), en relación con procesos edáficos; *vadoso*, caracterizado por la presencia temporal de agua; *freático*, caracterizado por presentar agua permanentemente; y sobre carbonatos estables, propio de etapas diagenéticas tardías (telogénesis) donde se tiene el tipo: *cárstico* (fisural, de cavernas).

- *Soterramiento (subterráneo profundo)*: el fluido presente en los poro es agua de composición más compleja, salmueras con aguas de mezcla propias de alta temperatura y presión, sobresaturadas, que genera cementos y se produce disolución por presión: "la cementación y la disolución son similares".

En resumen, el ambiente diagenético imprime carácter a la roca. Cada ambiente desarrolla unos procesos y presenta unos productos: "los cementos" que permiten interpretar su historia diagenética. Las técnicas de estudio son: MOP (tinciones selectivas), MEB con análisis EDX, geoquímica de elementos trazas (Mg, Sr, Fe, Mn) e isótopos (¹³C y ¹⁸O), catodoluminiscencia...

2. PROCESOS DIAGENÉTICOS

Se consideran los distintos mecanismos que actúan de forma individual o conjunta sobre los componentes de las rocas sedimentarias durante dilatados períodos de tiempo y van lentamente transformándolas. Clásicamente se distinguen los siguientes: micritización, compactación, disolución, cementación, neomorfismo, reemplazamiento.

Desde el punto de vista de su actuación sobre la textura original, primaria o deposicional de la roca, pueden clasificarse en *procesos constructivos*: cuando conservan, afianzan y consolidan dicha textura, y *procesos destructivos*: cuando la destruyen y transforman.

2.1. Degradación biológica y micritización

La *degradación biológica* engloba procesos sinsedimentarios que también pueden ser incluidos en la diagénesis: *bioturbación* (“burrows”) o alteración de sedimentos blandos por organismos excavadores (anélidos, artrópodos, moluscos...), *perforación* (“boring”) o alteración de sustratos duros por organismos perforadores (algas, hongos, esponjas, moluscos...) y destrucción de esqueletos por organismos raspadores (peces, equinodermos, gasterópodos...) y depredadores (estrellas de mar, moluscos...).

La *micritización* es el proceso por el que granos de distinta naturaleza (cualquier componente aloquímico) se transforman en granos de micrita, es decir en un *peloide*: término descriptivo para granos de micrita de origen desconocido. Cuando el proceso es parcial se observan granos con orlas externas de micrita y un núcleo más o menos extenso sin transformar.

Etapa y ambiente. Mayoritariamente son procesos sinsedimentarios o propios de la eogénesis que tienen lugar en medio marino, en ambientes superficiales calmados de baja energía. También puede presentarse durante la telogénesis en medio continental subaéreo.

Proceso. Normalmente son procesos degradantes y supone pérdida de la estructura de los granos. Los mecanismos implicados son los siguientes:

- *Perforación y relleno* (“boring & filling”): perforación de granos por microorganismos y relleno de micrita. Proceso destructivo, sinsedimentario, típico del medio marino. Puede afectar a cualquier tipo de grano (moluscos, oolitos, foraminíferos...). El tipo de perforación depende del organismo perforante (algas, hongos, esponjas...). El proceso guarda relación con la energía del medio: a mayor energía disminuye la micritización. Dependiendo del ambiente, el relleno puede ser de cemento. Cuando la micritización es parcial se distingue muy bien el avance irregular de la micrita hacia el centro del grano.
- *Reorganización criptocristalina*: desorganización de la estructura cristalina y paso a peloide. Tiene lugar en componentes formados por calcita alta en Mg cuando se transforman en calcita baja en Mg, como ocurre en las algas rojas y algunos foraminíferos (alveolinas, porcelánidos).

También pueden darse procesos constructivos:

- *Envueltas micríticas*: formación de micrita por filamentos fúngicos que rodean un grano y precipitan calcita hacia su exterior. Este proceso debe por tanto incluirse entre los cementos (cemento orgánico de calcita alta en Mg). Es un proceso constructivo, agradable, propio de ambientes marinos o continentales. Se distinguen por el espesor uniforme de las capas, la presencia de laminaciones de opacos y su desarrollo hacia el exterior del grano.

2.2. Compactación

Reajuste mecánico del material que comporta una variación en su empaquetamiento, consecuencia del aumento de presión litostática e hidrostática. Supone siempre una reducción del espesor de las capas y por tanto del volumen de roca, un aumento del empaquetamiento de sus componentes, una disminución de la porosidad y un descenso en el movimiento de fluidos.

Tipos. Se pueden diferenciar dos tipos que normalmente se suceden en el tiempo al aumentar el grado de soterramiento:

- *Compactación mecánica*: con desaguado y aumento del empaquetamiento de los granos, es poco importante en las calizas por la existencia de cementaciones precoces.
- *Compactación química*: con disolución por presión, normalmente es mucho más importante (este proceso debe incluirse también entre los procesos de disolución).

Etapas y ambiente: Fundamentalmente tiene lugar durante la mesogénesis, en ambientes de soterramiento más o menos profundos y afecta de manera diferente a las distintas litologías.

Factores que controlan la compactación:

- El *grado y duración del soterramiento*, donde intervienen: presión (suma de la litostática, la hidrostática y la tectónica), temperatura (gradiente geotérmico) y tiempo.
- Las *características petrográficas de los materiales*: mineralogía (arcillas), granulometría, porosidad, empaquetamiento inicial, cementación precoz.

Efectos sobre las rocas, dependen de la litología y también del soterramiento:

- En *arenas*: deformación plástica, reorientación (rotación) o rotura de granos, según sea el grado de cementación y la presión de confinamiento; en soterramientos superiores a 600 m se produce disolución por presión en el contacto grano-grano con cementación asociada, los granos aparecen interpenetrados y los contactos con microestilolitos. Ambos procesos tienen lugar más rápida y fácilmente que en las rocas detríticas.
- En *barros y lodos*: la deformación en este caso es mayor aunque debido a la cementación precoz es menor que en las rocas detríticas equivalentes, la rotura de granos se ve amortiguada (se pueden ver conchas bien conservadas), ahora tiene lugar la disolución generalizada de la roca con desarrollo de grandes estilolitos o de múltiples suturas (cicatrices con películas de arcillas), dependiendo del grado de pureza de la caliza.

2.3. Disolución

Reajuste químico del material, con pérdida de fases sólidas. Proceso destructivo, muy importante en los carbonatos. Puede ir acompañado de aumento de porosidad en la roca: "porosidad secundaria". Se puede diferenciar una *disolución congruente*, isoquímica, sin modificación de la composición de la roca, y una *disolución incongruente*, lixiviación, o disolución selectiva de componentes (minerales o químicos), con cambio de la composición química global respecto a la roca inicial.

Etapas y ambiente. Tiene lugar en todas las etapas y ambientes diagénéticos y en consecuencia es frecuente que las rocas presenten poros de distintas generaciones. La disolución actúa sobre todos los tipos rocosos afectando de forma diferente a la porosidad.

Factores que controlan la disolución:

- *Hidrológicos* (relativos al ambiente): características del agua, donde hay que tener en cuenta su composición (CO₂, pH, sales) sobre la que influye la temperatura y la presión, los aportes de la lluvia, y también su grado de renovación (flujo). En este sentido, las aguas dulces: ricas en CO₂, ligeramente ácidas (pH: 6-5) y frías son más agresivas. En el medio marino pueden distinguirse: ambientes constructivos (tropicales), inertes (mediterráneo y cantábrico) y destructivos (ártico).
- *Petrográficos* (relativos al sustrato), donde influyen composición, textura y porosidad:
 - . Mineralogía: cabe destacar la selectividad de la disolución en relación con la estabilidad mineral, así se sitúan de más a menos soluble: calcita muy alta en Mg (más de 10 %) > aragonito > calcita alta en Mg (del 10 al 4 %) > calcita baja en Mg (menos de 4 %) > dolomita; además pueden influir otros componentes: la materia orgánica disminuye la solubilidad, los elementos traza (cationes de sustitución) la incrementan.
 - . Componentes petrográficos: puede darse selectividad entre granos y cementos, así normalmente los granos son más solubles que los cementos, dando lugar a poros móldicos; cuando los granos presentan envueltas micríticas se conservan mejor, ya que las envueltas micríticas son protectoras al presentar películas orgánicas que retardan la disolución.
 - . Textura: existe selectividad para el tamaño de grano, así los tamaños menores son más solubles que los mayores (al disminuir el tamaño aumenta la superficie específica), y para la microestructura de los granos, los niveles fibrosos son más soluble que los prismáticos.
 - . Porosidad: las rocas más porosas también suelen ser más permeables, la circulación de agua en su seno es mayor y en consecuencia son más fáciles de disolver.

Efectos sobre las rocas, dependen de la etapa, del ambiente diagenético y de la litología:

- En la eogénesis intervienen aguas distintas a las del depósito, con diferentes sales en disolución, generándose poros móldicos (porosidad controlada por la textura).
- Durante la mesogénesis, dada la elevada presión existente, se producen procesos de disolución por presión que generan estilolitos y no se crean poros.
- En la telogénesis actúan aguas meteóricas que son aguas dulces, de baja salinidad, agresivas y la disolución producida genera poros vacuolares (no controlados por la textura).

Tipos: En *ambiente continental vadoso*, cuando la disolución afecta a rocas granulares, puede mostrar características específicas distinguiéndose entre: disolución gravitacional (afecta a la parte superior de los granos), de control microestructural (afecta a ciertas partes, por ejemplo fibras) y selectiva (afectar solo a ciertos componentes). En *ambiente marino* se distingue otros tipos de disolución: intergranular, de maceración. A veces se observan distintos grados de alteración en los granos previamente a su disolución: zona sana, zona alterada (desordenada) y zona disuelta (espacio vacío que puede cementarse posteriormente).

2.4. Cementación

Reajuste químico con formación de fases sólidas y disminución siempre de la porosidad. Se generan *cementos*: material precipitado en los espacios vacíos, ya sean poros primarios (como los poros intergranulares) o secundarios (como los poros móldicos), a partir del material disuelto en otras zonas. Proceso constructivo muy importante en las rocas carbonatadas: los cementos, tanto su composición como su textura, presentan gran interés para reconstruir la historia diagenética. El cemento en sí mismo, como material de neoformación que es, puede considerarse primario, pero contemplado en el seno de la roca necesita un sustrato sobre el que precipitar, por tanto siempre es postdeposicional y en ese sentido se considera secundario.

Etapa y ambiente: La cementación se produce en todas las etapas y ambientes diagenéticos, coexistiendo con frecuencia varias generaciones de cementos. Durante la eogénesis (aguas superficiales): cementos precoces, parciales; en la mesogénesis (aguas intersticiales, connatas): cementos tardíos, completos; en la telogénesis (aguas meteóricas): cementos locales, parciales. La cementación puede tener lugar en ambientes continentales, marinos y profundos, presentado los cementos distintas características, lo que permite conocer su ambiente de formación.

Factores que controlan las características (mineralogía y textura) de los cementos:

- *Hidrológicos:* las características de las aguas, su composición (sobre todo el contenido en Mg y Na) y su circulación, sobre estos factores influye el clima: la precipitación (donde más llueve los cementos son de mayor tamaño), la temperatura (incrementa la velocidad de precipitación) y la actividad de microorganismos (con frecuencia mal conocida).
- *Petrográficos:* la mineralogía y estructura interna (por ejemplo los granos monocristalinos presentan cementos en continuidad óptica, pero si hay envueltas micríticas queda inhibido ese tipo de cemento), morfología y tamaño de grano (en granos de 0,25 mm el cemento alcanza mayor tamaño), porosidad (influye en la permeabilidad y en la circulación de fluidos).

Características petrográficas de los cementos:

- *Mineralogía:* pueden ser de *aragonito*, *calcita alta en Mg*, *calcita baja en Mg* y *dolomita*.
- *Tamaño de grano:* está relacionado con la velocidad de nucleación de las fases minerales. Pueden ser de *micrita* (criptocristalino), cuando la nucleación es muy rápida, múltiple, de *esparita* (cristalino), si la nucleación es muy lenta, en ausencia de Mg y de materia orgánica en el medio, o de *microsparita* (microcristalino o finamente cristalino) en posición intermedia.
- *Morfología:* está relacionada con el contenido en Mg de las aguas. El cemento puede ser: *equidimensional* ("equant") constituido por calcita baja en Mg, *orientado* ("bladed"), *romboédrico* de calcita alta en Mg, *fibroso* de aragonito o calcita alta en Mg, donde la nucleación es muy rápida, y *monocristalino* cuando está controlado por el sustrato.

Tipos de cementos, relaciones entre petrografía y ambiente diagenético:

- *Continental* (de aguas dulces), constituido por calcita alta en Mg:
 - . *Aéreo o edáfico:* de micrita. Tipo: *orgánico*, en torno a de mucílagos orgánicos,
 - . *Vadoso:* de esparita fina, presenta los cristales con terminación biselada. Tipos: *contacto*, los cristales son pequeños; *menisco*, algo más evolucionado, cristales de mayor tamaño; *gravitacional (microestalactítico)*, cristales fibrosos mostrando capas de crecimiento; *whisker (cepillo)*, cristales fibrosos muy alargados generando un enrejado fino y suelto.
 - . *Freático:* de esparita más o menos grosera, con cristales limpios y continuos alrededor de los granos. Tipos: *espático*, granular, tardío, con cristales más o menos equidimensionales y ordenados respecto al sustrato, se pueden distinguir cementos en orla, en bloque y en drusa; *sintaxial*, en continuidad óptica con los granos, controlado por ellos (como en los equinodermos); *poiquilítico*, formado grandes cristales que engloban varios granos.
- *Marino* (de aguas marinas), formado por aragonito y calcita baja en Mg:
 - . *De aguas superficiales.* Tipos: *fibroso*, de aragonito, acicular, forma orlas más o menos regulares (vadoso, freático) de aspecto botroidal a esferulítico, también como relleno de cavidades en los fósiles; *romboédrico*, de calcita alta en Mg, orientado, con disposición en empalizada, dispuesto en franjas regulares, en el relleno de cavidades en los arrecifes.
 - . *De aguas profundas.* Tipo: *micrítico*, de calcita alta en Mg, propio de lodos y fangos.
- *Soterramiento profundo:* formado por calcita baja en Mg y dolomita, es tardío. Tipos: *espático*, cristales grandes y anhedrales; *poiquilítico*, grandes cristales englobando granos.

2.5. Recristalización o neomorfismo

Proceso isoquímico de transformación mineral que conlleva un cambio textural, normalmente tiene lugar un crecimiento del tamaño de los cristales de calcita, con formación de *esparita neomórfica* o *seudoesparita*. Los cambios tienen lugar en estado sólido (al menos a gran escala), las transformaciones se producen en espacios ocupados por fases sólidas. Los mecanismos son poco conocidos, Folk utiliza el término neomorfismo para engloba todos esos procesos en los que se ignora lo que pasa.

Etapas y ambiente: Este proceso tienen lugar en todas las etapas, aunque es más importante en la mesogénesis, también en todos los ambientes si bien, consecuentemente, se ve favorecida por el soterramiento, y afecta a todas las litologías, aunque varía su importancia de unos tipos a otros.

Factores que controlan la recristalización:

- *Ambientales:* presión, temperatura, aguas intersticiales (composición y circulación: importa su capacidad de disolver y de transportar Mg), materia orgánica en descomposición, tiempo.
- *Petrográficos:* acusada selectividad composicional (la pureza mineral del carbonato favorece el proceso) y textural (rocas de tamaño de grano fino también son favorables).

Tipos de procesos neomórficos:

- *Inversión:* paso de *aragonito a calcita*, es una transformación polimórfica que conlleva un cambio estructural; paso de *calcita alta en Mg a calcita baja en Mg*, es una reorganización de la estructura cristalina. El primero corresponde al paso del lodo de aragonito (hábito fibroso) a la micrita de calcita (poliédrica y en mosaico). El segundo proceso tiene lugar más fácilmente en aguas dulces, ya que en agua marina la velocidad de cambio es muy baja: altos contenidos en Mg inhiben el cambio por adsorción de una película de Mg en superficie de los cristales, impidiendo la inversión.
- *Recristalización (s.e):* paso de *micrita a microesparita* y después a *esparita (seudoesparita)*, es un proceso agradante que conlleva cambio en el tamaño y la forma de los cristales (aumento de tamaño, formas más equidimensionales) y orientación de impurezas. El proceso, puede presentarse de forma generalizada, homogénea, afectando a todos los granos: *recristalización coalescente*, o afectar más a algunas zonas: *recristalización porfiroide*. Con frecuencia es un proceso selectivo: está controlado por la mineralogía y la textura previa de la roca, dando lugar recristalizaciones heterogéneas, parciales, con tendencia a formar núcleos, zonas o parches cristalinos, otras veces la esparita presenta disposición intersticial, generando *texturas grumelares o grumosas*. El lavado del Mg por las aguas dulces meteóricas favorece la recristalización, contrariamente el material arcilloso y la materia orgánica la inhiben o hacen que disminuya el tamaño de los cristales, en consecuencia el grado de pureza de la caliza tiene gran influencia en la recristalización.
- *Recristalización degradante:* paso de *esparita a micrita*, conlleva una disminución del tamaño de grano. Suele estar relacionada con procesos tectónicos en los que hay presiones dirigidas. Puede afectar a grandes cristales como los fragmentos de crinoideos.

2.6. Reemplazamiento o sustitución

Proceso aloquímico de transformación mineral que afectan a la composición química y en consecuencia a la composición mineral de la roca. Comporta la introducción de material de una fuente externa a la roca y está acompañado de notables cambios texturales, con aumento del grado de cristalinidad de la roca normalmente. Son procesos similares a los de metasomatismo, propios de ambientes metamórficos.

Tipos de reemplazamiento:

- *Dolomitización*: paso de *calcita a dolomita*, conlleva un cambio químico con aporte de Mg junto a un cambio textural con aumento del tamaño de grano y del grado de idiomorfismo de los cristales, y también un aumento significativo de la porosidad. Proceso de disolución y precipitación a escala atómica y molecular. Su desarrollo es muy variable en tiempo (precoz a tardía) y puede ser parcial, cuando muestra cristales o grupos de cristales de dolomita aislados en la caliza, o general cuando afectando a toda la roca que pasa a ser una dolomía.
- *Silificación*: paso de *calcita a chert, ópalo o microcuarzo*, el cambio químico es total y se ve favorecido en ambiente ácido, baja temperatura y agua saturada en SiO₂ (aguas de mezcla).
- *Piritización, fosfatización*: el cambio químico en cada caso también es total. Suelen ser procesos muy locales (se presenta en nódulos), selectivos (afectando solo a ciertos componentes) y pueden verse como accidentes en las rocas carbonatadas.
- *Desdolomitización*: paso de dolomita a calcita, conlleva de nuevo un cambio químico en la roca a la vez que textural. Puede tener lugar de forma parcial o generalizada, volviendo la roca a ser una caliza más o menos cristalina con pseudomorfos de cristales de dolomita.

3. ETAPAS DIAGENÉTICAS**3.1. Eogénesis**

Puede comenzar muy pronto, en el ambiente deposicional, por la susceptibilidad de las calizas a los cambios químicos y texturales. Los procesos pueden tener lugar antes o después de la litificación y están controlados por la porosidad inicial o primaria de la roca. Los procesos que tiene lugar dependen de las características del ambiente deposicional:

Interfase agua-sedimento, en donde predominan agentes físicos y biológicos; en ese entorno tienen lugar los siguientes procesos:

- *Removilización*: mezcla de sedimentos y desecación por procesos físicos.
- *Bioturbación*: por excavación y perforación debida a la acción directa de organismos.
- *Aporte a la fragmentación, micritización y disolución*: por acción de microorganismos (bacterias, algas), la acción ahora es más indirecta.
- *Descomposición de la materia orgánica*: pérdida posterior por disolución.

Interior del sedimento, con predominio de agentes químicos y fisicoquímicos: los procesos que se presentan pueden ser distintos dependiendo las aguas circulantes:

- En aguas marinas (en trasgresiones), los procesos son poco importantes:
 - *Cementación ligera por calcita alta en Mg y aragonito*: formación de orlas de cemento fibroso.
- En aguas dulces, aguas agresivas (en regresiones), los procesos son más importantes:
 - *Disolución del aragonito*: creación de poros móldicos.
 - *Neomorfismo: paso de aragonito y calcita alta en Mg a calcita baja en Mg*: importante pérdida de porosidad.
 - *Cementación ligera por calcita baja en Mg*: por aguas que no están contacto con la atmósfera y se van volviendo alcalinas, con formación orlas de cemento granular.
- En aguas de mezcla:
 - *Dolomitización precoz*: aumento de la porosidad por poros intercrystalinos.

3.2. Mesogénesis

Procesos generados en relación con el soterramiento que puede ser más o menos profundo. Dependen de diferentes parámetros ambientales: presión (litostática + hidrostática + tectónica), temperatura (gradiente geotérmico), fluidos intersticiales (quimismo y flujo) y tiempo (precisa tiempos largos). Los principales procesos que tienen lugar son:

- *Compactación mecánica*: conlleva compresión y desaguado, tiene lugar sobre sedimentos plásticos o frágiles, su importancia depende del grado de litificación del material (de la existencia de cementación precoz).
- *Disolución por presión*: produce penetración de los granos y formación de estilolitos en el seno de la roca, y lleva asociada la liberación de calcita para generar los cementos.
- *Cementación general tardía*: con formación de cementos de grano grueso (espáticos en bloque, espáticos en drusa, poiquilíticos) formados por calcita más o menos rica en Fe, Mn, Pb y Zn, con importante pérdida de porosidad.
- *Recristalización*: paso de micrita a esparita neomórfica (seudoesparita), normalmente se produce pérdida de Mg en la calcita y también importante pérdida de porosidad.
- *Dolomitización secundaria*: proceso tardío asociado a aguas ascendentes, con frecuencia en relación con fallas. Los cristales de dolomita son más o menos grandes, sucios, ricos en Fe y tiene lugar un importante aumento de porosidad por formación de poros intercrystalinos.

3.3. Telogénesis

Procesos de alteración tardíos sobre calizas bien consolidadas. Ahora el parámetro ambiental más significativo es el agua meteórica, más o menos agresiva según sean su composición, temperatura y movimiento. Normalmente tiene lugar en medio continental subaéreo. Los principales procesos que tiene lugar son:

- *Fracturación*: generada por descompresión de la roca en su ascenso a la superficie y se produce el desarrollo de una red de diaclasas.
- *Disolución*: por aguas dulces muy agresivas en ambientes vadoso o freático, con creación de una nueva red de espacios vacíos de tipo cárstico (poros vacuolares, fisuras y conductos).
- *Reemplazamiento*: sobre todo se produce dolomitización y desdolomitización en ambientes con mezcla de aguas, con cambios en el equilibrio químico y desarrollo de nuevos minerales.
- *Micritización y microesparitización*: tiene lugar en ambientes aéreos, en relación con procesos de alteración por microorganismos.

4. AMBIENTES DIAGENÉTICOS

4.1. Marino normal

Se localiza debajo del fondo marino, cerca de la superficie de depósito, y tiene lugar en la etapa diagénica inicial: eogénesis. El fluido de poro es agua marina más o menos modificada, sobresaturada en carbonatos, y el proceso predominante es la generación de cementos: “la cementación es mayor que la disolución”. En este ambiente lo que hay son sedimentos más o menos recientes, donde los carbonatos son metaestables, lo que favorece la saturación de los fluidos y por tanto la subsecuente cementación.

Se distinguen dos subambientes: aguas poco profundas y aguas profundas, donde tienen lugar distintos procesos:

- En *aguas poco profundas* (zonas intermareal, submareal y arrecifal) se ven afectados sedimentos recientes y los principales procesos implicados son: micritización (alteración de granos, perforaciones...), disolución (en latitudes altas) y cementación precoz.
- En *aguas más profundas* (fondo marino más o menos somero), por debajo de la profundidad de compensación del aragonito, lo que se produce es: disolución del aragonito, pérdida de Mg en la calcita alta en Mg y es posible que haya cementación por calcita micrítica. A mayor profundidad, por debajo de la profundidad de compensación de la calcita, la disolución supera a la precipitación y enseguida dejan de depositarse carbonatos.

4.2. Meteórico

Se presenta en el continente, en zonas próxima a la superficie de la roca, en las etapas iniciales o finales de diagénesis. El fluido de poro es agua dulce superficial, meteórica, rica en CO₂, no saturada, que produce importantes modificaciones texturales y genera abundantes poros: “la disolución es mayor que la cementación”.

El comportamiento de la roca frente a la circulación de los fluidos (agua de lluvia más o menos modificada y a veces aguas de mezcla) es distinto si actúan sobre carbonatos metaestables o sobre carbonatos estables, los procesos desarrollados son diferentes:

- Sobre *carbonatos metaestables* (en etapas tempranas o eogénesis) pueden darse distintos ambientes: *ambiente aéreo* (superficial) en relación con procesos edáficos, *ambiente vadoso* donde la presencia de agua es temporal o *ambiente freático* caracterizado por presentar agua permanentemente. Los procesos desarrollados más importantes son la disolución (que es predominante en la zona vadosa), la cementación (predominante en la zona freática) y los procesos de neomorfismo que tienden a la estabilización mineral. En *aguas de mezcla* se puede producir dolomitización.
- Sobre *carbonatos estables* (en etapas tardías o telogénesis) lo característico es el *ambiente cárstico*, donde predomina la disolución de la roca, con desarrollo de fisuras, conductos y cavernas, y de forma local y subordinada la precipitación (espeleotemas).

4.3. Soterramiento

Corresponde a la zona profunda donde no llegan los procesos superficiales, a la etapa de diagénesis profunda o mesogénesis. El fluido de poro es agua más salina (rica en Na y también en Ca y Mg), aguas connatas, sobresaturadas, de baja movilidad (variación local de los fluidos de poro) que se mantienen largo tiempo bajo diferentes parámetros ambientales de presión (litostática + hidrostática + tectónica) y temperatura. Predominan la disolución por presión y se generan cementos: “la cementación es mayor que la disolución”.

Los procesos que tiene lugar son: la compactación, tanto mecánica (desaguado) como química (disolución por presión); la cementación de calcita baja en Mg (con cristales de gran tamaño a partir de la disolución de otros más pequeños), con formación de cementos de segunda generación (en drusa, bloque, sin inclusiones, con contactos planares) y relleno general de cavidades; la recristalización más o menos acusada y localmente la dolomitización tardía.