



13 ROCAS METAMORFICAS

Serranía de la Macarena, Colombia. Andrés Hurtado

Metamorfismo es el cambio de una clase coherente de roca, en otra, por debajo de la zona de intemperismo y por encima de la zona de fusión. Esos cambios dan el estado sólido como consecuencia de intensos cambios de presión, temperatura y ambiente químico; los cambios están asociados a las fuerzas que pliegan, fallan capas, inyectan magma y elevan o deprimen masas de roca.

Se restringe el metamorfismo a cambios de textura y composición de la roca porque existe recristalización (aumento de tamaño de granos minerales), metasomatismo (cambio de un mineral en otro) y neocristalización (formación de nuevos minerales).

El nuevo arreglo atómico de la roca resultante es más compacto, ya que en la profundidad el material fluye debido a la presión. Igualmente, las rocas de grano fino son más susceptibles de sufrir las transformaciones señaladas porque los minerales ofrecen más área a los agentes químicos. También las rocas formadas con minerales típicos de altas presiones y temperaturas se resisten a sufrir nuevos cambios a diferencia de otras, como las arcillas, que son más susceptibles por ser formadas prácticamente en la superficie.

El cuadro siguiente, muestra de una manera aproximada las rocas metamórficas con sus correspondientes rocas de base e intermedias. El orden en que se presenta cada serie de rocas alude al grado de metamorfismo en una escala creciente.

Cuadro 17. Rocas metamórficas

ROCA BASE	ESTADO DE TRANSICIÓN	ROCA METAMÓRFICA
Shale (lutita)	Metasedimentos	pizarra, filita, esquistos, pargneis
Arenisca	Metasedimentos	cuarcita, hornfels
Caliza	Caliza cristalina	Mármol
Basalto	Metavulcanita	esquisto, anfibolita
Granito	Intrusivo gnésico	Ortogneis
Carbones	Metasedimentos grafitosos	esquistos grafitosos

13.1 AGENTES DEL METAMORFISMO

Los agentes del metamorfismo son tres: presión, temperatura y fluidos químicamente activos. La presión puede ser de confinamiento o de origen tectónico; la temperatura puede darse por gradiente geotérmico o por vecindad a cámaras magmáticas y los fluidos químicamente activos pueden estar asociados a procesos magmáticos. Al menos dos de los tres agentes señalados, por regla general, siempre están presentes.

13.1.1 Presión. El aumento de presión se debe al peso de las rocas suprayacentes o al desplazamiento de grandes masas rocosas unas con respecto a otros. En este caso, la presión fractura las rocas y la fricción es tan grande que éstas se funden parcialmente para producir la milonita, una roca dura tipo pedernal, en la cual los minerales se desintegran y recristalizan. Si la columna de rocas situada sobre un punto de la corteza es la presión litostática, la presión real a la que está sometida una roca depende también de la presión a la que se encuentran los fluidos contenidos en sus poros (presión de fluidos). En las zonas de la corteza donde existe distensión la presión disminuye, mientras que si existe compresión, aumenta. Se demandan presiones entre 2800 y 4200 atmósferas (kgf/cm^2) para que la roca fluya plásticamente; es decir, profundidades entre 9 y 12 km. El

flujo plástico supone un movimiento intergranular con formación de planos de deslizamiento de la roca, pérdida de fluidos, reorientación de los granos minerales, aumento o crecimiento cristalino y cambios en la textura de las rocas.

13.1.2 Temperatura. Es el agente más importante; el gradiente geotérmico es de 33° C por km. de profundidad, aunque en algunas zonas como las fosas oceánicas, el valor es mucho menor y en las dorsales superior. Otra fuente es el calor asociado a cámaras magmáticas, aunque la aureola térmica es de pocos km. y de decenas de metros en el caso de diques y filones, porque la roca es mala conductora del calor. Los magmas superan los 1000° C y una intrusión grande puede elevar el calor de las rocas hasta 700° C para que el enfriamiento tarde más de 1 millón de años. La roca adyacente a la intrusión ígnea se divide en zonas según su grado de alteración.

Las arcillas compactadas, por ejemplo, pueden transformarse en pizarras hacia la parte externa; cerca de la intrusión habrá nuevos minerales como la andalucita y más cerca se formará una roca dura como la corneana.

La pizarra que se forma por metamorfismo de esas arcillas duras, bajo presiones bajas, tiene integrantes minerales más pequeños que los de su roca madre, a menudo inapreciables a simple vista. Erróneamente se supone que la exfoliación de la pizarra corresponde a las líneas de asentamiento de la arcilla primitiva: lo que refleja la exfoliación es la dirección de la presión a que fue sometida la arcilla durante su metamorfismo.

La temperatura en un área puede aumentar también localmente por procesos orogénicos.

La roca metamórfica más familiar es el mármol, producido por el metamorfismo de las calizas ricas en carbonato cálcico (calcita); cuando una intrusión ígnea cercana somete la calcita a alta temperatura, empieza por desprender CO₂ y se

recombina después con este gas formando entonces cristales de calcita nuevos y transformándose en mármol. Los nuevos cristales tienen forma y tamaño de granos regulares y no una colección aleatoria de fragmentos como en la caliza original, lo que le confiere a la nueva roca solidez y textura uniforme.

13.1.3 Fluidos químicamente activos. Se explican por las soluciones hidrotermales de magma en enfriamiento; dichos residuos percolan la roca encajante para reaccionar con los minerales de la misma. Del intercambio iónico se da la recristalización, la neocrystalización y el metasomatismo, lo cual supone que la solución hidrotermal líquida o gaseosa (fluida) encuentre una roca porosa y permeable.

El metasomatismo, similar al metamorfismo térmico, a veces se asocia a veces con él. Al enfriarse una masa ígnea, desprende líquidos y gases calientes que pueden infiltrarse por las grietas y poros de la roca circundante. Los líquidos calientes pueden alterar esa roca mediante una combinación de calor y precipitación de los minerales disueltos. Muchos de los yacimientos de minerales metálicos más productivos proceden de filones originados por la metasomatosis.

13.2 TIPOS DE METAMORFISMO

13.2.1 Clasificación general. Por regla general se puede hablar de metamorfismo regional y de metamorfismo de contacto, que difiere no sólo por las condiciones alcanzadas en presión y temperatura, sino también por los procesos que lo originan.

- **Metarmofismo regional.** Se produce como consecuencia de procesos orogénicos, durante la formación de cordilleras de plegamiento a causa de la subducción o de la colisión continental. En este metamorfimo se incrementa la temperatura y la presión a la que se ven sometidas las rocas. Puesto que los minerales se desarrollan bajo presiones dirigidas en condiciones orogénicas, se ven

obligados a crecer paralelamente entre sí y perpendiculares a estas presiones. Se origina así una foliación intensa en la roca (esquistosidad) simultánea con el metamorfismo, por lo que a estas rocas se les denomina en general esquistos.

- **Metamorfismo de contacto.** Se produce a causa de intrusiones ígneas que alcanzan zonas relativamente frías y superficiales de la corteza, las que se calientan conforme el magma se enfría. Es por tanto un metamorfismo de alta temperatura y baja presión que origina aureolas concéntricas en torno a la roca ígnea, cuya extensión depende del volumen de magma incluido. Son rocas típicas de este metamorfismo las corneanas y esquistos moteados, que se caracterizan por minerales que crecen al azar al no estar sometidos a presiones dirigidas.

13.2.2 Clasificación detallada. Con mayor detalle, el metamorfismo, para otros autores, puede ser de cuatro tipos: de contacto, dinamometamorfismo, regional o general y ultrametamorfismo.

- **De contacto.** Se da sobre la roca encajante y dentro de la aureola de una cámara magmática, a pocos km... La temperatura es de 300 a 800°C y la presión varía entre 100 y 3000 atmósferas. Las rocas características son la piedra córnea, las pizarras nodulosas y las pizarras manchadas; los minerales tipo silicatos de Ca y Mg, y los materiales arrastrados y depositados de óxidos y sulfuros.

- **Dinamometamorfismo.** Metamorfismo cinético-mecánico o de dislocación, producto de gran presión lateral asociada a fuerzas tectónicas. La roca sufre transformaciones fundamentalmente mecánicas; como prototipo, la pizarra cristalina.

- **Metamorfismo regional o general.** Es el producto del hundimiento de la corteza a zonas profundas donde la presión y la temperatura explican todos los cambios esenciales en

los minerales y en la estructura de la roca. Los escalones de metamorfismo regional, con sus productos, son:

- Epizona (piso alto). Cuarzita, granito pizarroso, granito milonitizado, filita y pizarras. La presión y temperatura son bajas.
- Mesozona (piso medio). Cuarzita, pizarras micáceas, mármol, anfibolita, eclogita. La presión y temperatura son moderadas (entre 700 y 900°C).
- Catazona (piso profundo). Ortogneis, paragneis, granulita, grafito, gneis de hornblenda. Las temperaturas están entre 1500 y 1600°C y hay fuerte presión.
- **Ultrametamorfismo**. Es el metamorfismo extremo por fuerte aumento de presión y temperatura. Los pisos son: anátesis, 17 a 75 km. de profundidad, con profundos cambios físicos en la roca; metátesis, los minerales claros se movilizan separándose de los oscuros para formar una roca bandeada; metablástesis, hay neocrystalización y recristalización, y granitización, transformación en roca granítica.

13.2.3 Metamorfismo progradante y retrometamorfismo.

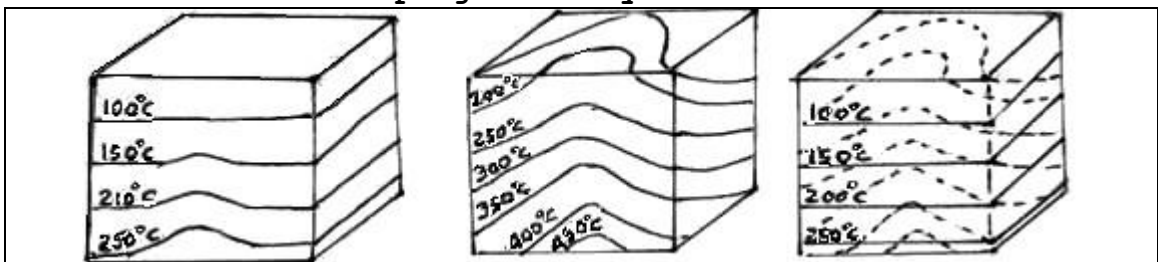


Figura 83. Metamorfismo progradante. Estados antes, durante y después del proceso.

- **Metamorfismo progradante**. Conforme en una región se produce el aumento progresivo de temperatura y/o presión, las áreas vecinas van siendo sucesivamente afectadas de tal manera que la zona de metamorfismo se expande formando un domo a partir del punto inicial (metamorfismo progradante).

En la fig. 83, cuando el metamorfismo cesa, la roca no se reestructura de nuevo. En continuo van las isotermas y en punteado las isógradas que marcan condiciones idénticas de metamorfismo después de caer la temperatura.

De esta manera, todas las rocas habrán sufrido un progresivo aumento de las condiciones hasta alcanzar un máximo llamado clímax metamórfico que es más intenso en el centro del domo que en la periferia, donde empieza cada vez a hacerse menos evidente. Así se dará lugar a una zonación metamórfica.

- **Retrometamorfismo.** Al ascender de nuevo las condiciones físicas, los minerales permanecen en estado metaestable por no tener energía suficiente para reorganizarse. Tan sólo si durante el descenso general sufren un pequeño aumento de temperatura, los minerales se reestructuran parcialmente (retrometamorfismo), sin que se lleguen a borrar la mineralogía o la textura que alcanzaron durante el clímax.

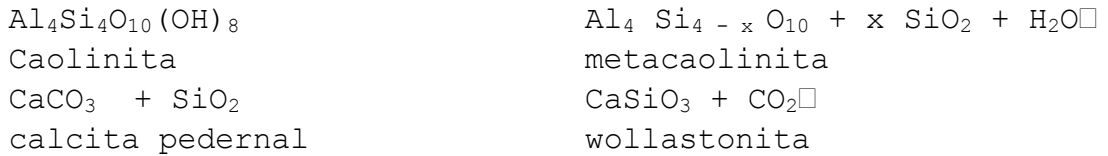
13.3 MINERALES DEL METAMORFISMO

Las condiciones de presión y temperatura que alcanza una roca y su composición química, determinan el tipo de minerales que se originan. Por tanto, las asociaciones minerales que existen en una roca metamórfica indican las condiciones físicas alcanzadas. Estos ambientes se dividen en zonas según las diferentes paragénesis (asociaciones) minerales presentes. Cada zona queda limitada por la aparición, desaparición o sustitución de uno o varios de ellos.

Los minerales del metamorfismo de bajo grado son: serpentina, talco, clorita y epidota; los de metamorfismo de grado medio son: kyanita, andalucita, estaurolita, biotita y hornblenda, y los de alto grado son: silimanita, forsterita, wollastonita y garnierita.

En el **metamorfismo regional**, con el incremento progresivo de la temperatura, se dan fenómenos de deshidratación y de

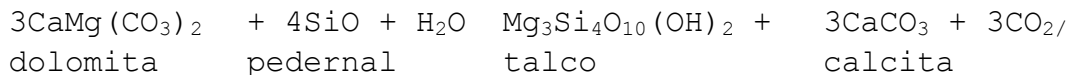
descarbonatación (sí la roca es rica en carbonato). Tales procesos se ilustran así:



Pero la wollastonita también se puede formar en el **metamorfismo de contacto** a las más altas temperaturas, así:



Para ilustrar la paragénesis de la roca, la reacción por la cual una caliza dolomítica con pedernal a condiciones metamórficas de bajo grado, forma talco, es la siguiente:



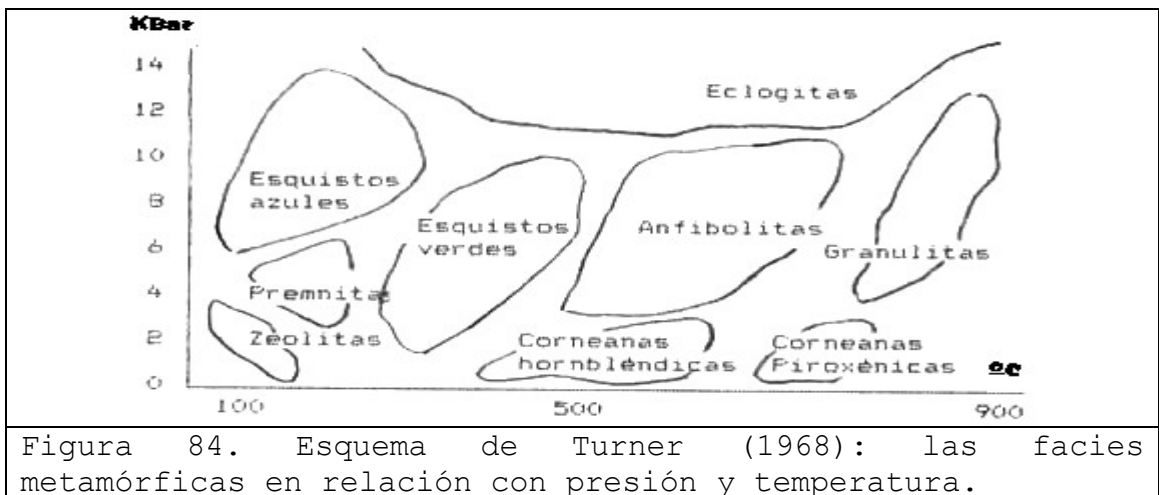
La actinolita es un anfíbol que se presenta en cristales alargados o fibrosos. La andalucita es un silicato frecuente en contactos de granitos con pizarras arcillosas. El asbesto de fibras duras y rígidas es una serpentina de múltiples usos. La clorita es un filosilicato que se diferencia de las micas por inelástico. El granate es un nesosilicato cúbico y duro. La kianita, silicato triclinico, con la andalucita y la sillimanita, constituyen un sistema polimorfo. La serpentina, es un filosilicato como la clorita, puede ser fibrosa u hojosa. El talco, es un filosilicato monoclinico de origen secundario gracias a la alteración de los ferromagnesianos.

13.4 FACIES DEL METAMORFISMO

Se denomina facies al conjunto de características mineralógicas, litológicas y fosilíferas que refleja el medio en el cual se formó la roca. Cada roca metamórfica se

asocia a la facies en la cual se forma, sin importar su composición. La litofacies alude al conjunto de caracteres petrográficos de una facies y la biofacies al cúmulo de caracteres paleontológicos de aquella.

Las diferentes facies metamórficas caracterizan distintos tipos de metamorfismo. Así por ejemplo, la de los **esquistos azules** se origina por metamorfismo de baja temperatura en zonas de subducción; la de los **esquistos verdes, anfibolitas y granulitas**, por metamorfismo regional de grado creciente, y la de las **corneanas**, por metamorfismo de contacto.



Para el metamorfismo regional, del de grado alto al de grado bajo, las facies son:

De **anfibolita** con ambientes entre 450 a 180°C; de **anfibolita de epidota** con ambientes entre 250 a 450°C, y de **esquisto verde** con ambientes entre 150 a 250°C.

Pero una facies metamórfica no se define en función de un sólo mineral índice, sino por una asociación de conjuntos minerales.

La facies **zeolítica**, que representa el grado más bajo de metamorfismo, incluye zeolitas, clorita, moscovita y cuarzo. La de esquisto verde, la de más bajo grado en metamorfismo

regional, puede incluir clorita, epidota, moscovita, albita y cuarzo. La facies de **anfibolita**, que prevalece en condiciones de metamorfismo medio a alto, comprende hornblenda, plagioclasa y almandita, es una facies que tiene lugar donde prevalecen las condiciones metamórficas de la estauroлита y la silimanita.

La facies de **esquistos azul**, representada por temperaturas bajas y alta presión, incluye lawsonita, jadeita, albita, glaucófana, moscovita y granate. La facies de **granulita**, que refleja las condiciones de máxima temperatura del metamorfismo regional, tiene como minerales característicos constituyentes, la plagioclasa, la hiperestena, el granate y el dióxido. La facies **eclogita**, representante de condiciones más profundas de metamorfismo, tiene como mineral índice granates ricos en piropero y onfacita y conjuntos corrientes en diatremas de kimberlita.

13.5 TEXTURA

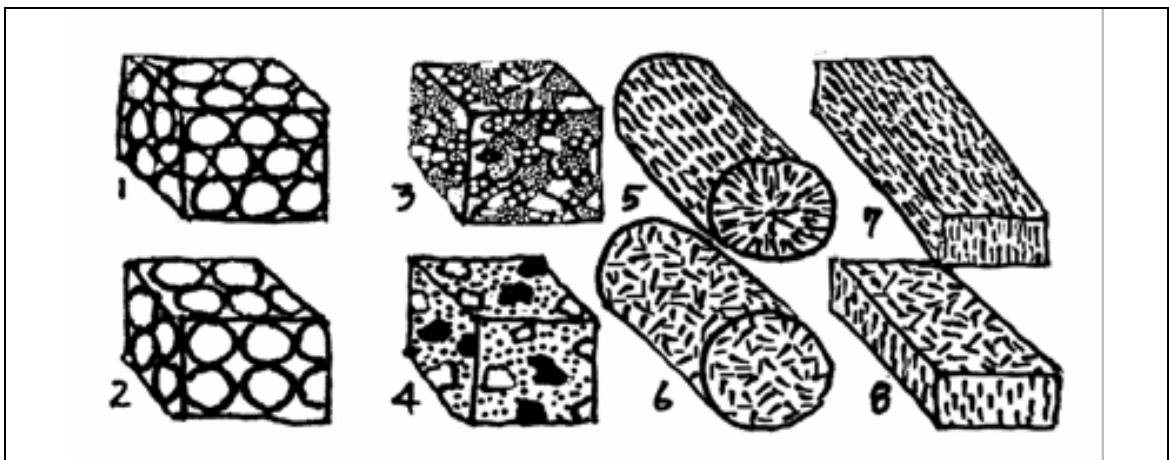


Figura 85. Acerca de las fábricas texturales. 1 Granular densa homogénea e isotrópica. 2 Granular no densa e isotrópica. 3 Granular clasto-soportada heterogénea e isotrópica. 4 Granular matriz-soportada e Isotrópica. 5 Laminar orientada y alotrópica (ortotrópica). 6 Fibrosa no orientada e isotrópica. 7. Fibrosa orientada y alotrópica (ortotrópica). 8. Laminar alotrópica. Curso de M. de Rocas. Alvaro Correa Arroyave. U. Nal de C.

Pero la textura alude, no sólo al tamaño, forma y orientación de los minerales, sino también a su arreglo. Existen texturas orientadas y no orientadas, densas y no densas; las no orientadas, cuando son densas, resultan entrelazadas.

Cuadro 18. Textura y fábrica del material rocoso.

O R I G E N	TEXTURA		FABRICA MINERAL					
			NO ORIENTADA			ORIENTADA		
	CLASE	GRANO	ENTRABA DA	CEMENT ADA	CONSO LIDADA	FOLIADA	CEMENTA DA	CONSO LIDAD A
I G N E O	Cristal ina	Fino	Basalto					
		Grueso	Granito					
	Piroclá stica	Fino		Toba				
		Grueso		Aglome rado				
M E T A M O R F	Cristal ina	Fino	Hornfel s			Pizarra		
		Grueso	Mármol			Gneis		
	Cataclá stica	Fino	Milonit a			Filonit a		
		Grueso	Brecha			Protomi lonita		
S E	Grano- cristal ina	Fino	Lidita					

O R I G E N D I M E N R A R	TEXTURA		FABRICA MINERAL					
			NO ORIENTADA			ORIENTADA		
	CLASE	GRANO	ENTRABA DA	CEMENT ADA	CONSO LIDADA	FOLIADA	CEMENTA DA	CONSO LIDAD A
		Grueso						
	Cláctic a	Fino		Limoli ta calcár ea	Arcillo lita		Lutita Calcáre a	Lutit a arcil losa
		Grueso		Conglo merado calcár eo	Conglom erado arenoso		Lutita Cuarzos a	Lutit a areno sa

J. Montero, A. González, G. Angel. Caracterización del material rocoso, I Congreso Suramericano de Mecánica de rocas, 1982.

Las rocas tienen comportamiento isotrópico cuando las texturas son no orientadas - éste es el caso de las entrabadas - y comportamiento anisotrópico o alotrópico cuando tienen una o varias orientaciones, respectivamente.

13.6 TIPOS DE ROCAS METAMORFICAS

13.6.1 Pizarra y filita. Ambas asociadas a margas y lutitas; en la primera el grano es más fino y la foliación microscópica, en la segunda el grano es más grueso a causa del mayor metamorfismo y la foliación se hace visible en hojas grandes y delgadas. La fábrica mineral en ambas es entrabada y anisotrópica. La pizarra tiene color de gris a negro y puede también ser verdoso, amarillento, castaño y

rojizo. La pizarrosidad característica puede ser o no paralela a los planos de las capas de las margas originales. Se encuentran cristaloblastos muy finos con fractura acicular y superficies sedosas reflectivas.

En el extremo meridional de la falla Santa Marta-Bucaramanga (La Floresta) hay filitas pizarrosas grafíticas oscuras con metalimolitas calcáreas. Además hay filitas limosas con meta-arenisca gris verdosa. Entre Manizales y Armenia, hay filitas cuarzosas con esquistos verdes grafíticos y cuarzo-gnéisicos, además de diabasas y calizas cristalinas (Grupo Cajamarca). Hay filitas cloríticas de tonalidades grises y verdes, con anfibolitas y esquistos talcosos en la región Taganga entre el Rodadero y Punta Florín. En la región de la culebra hay pizarras que afloran en la carretera entre Bogotá y Cáqueza.

13.6.2 Esquisto. Puede provenir de rocas sedimentarias o ígneas como el basalto; posee metamorfismo de mayor grado que pizarras y filitas; según el material sea laminado o fibroso, variará su comportamiento; tiene mayor clivaje que los anteriores y menor que los gneises; pueden ser micaesquistos biotítico o moscovítico -los más importantes- y esquistos cuarzoso y calcáreo. Los más importantes, asociados a rocas ígneas ferromagnesianas, son los esquistos talcosos, clorítico, de hornblenda y anfibolita. Los esquistos por regla general tienen una fábrica mineral entrabada y anisotrópica, con textura cristalina.

En la Serranía de Jarara, al sur de la falla Cuisa, se encuentran esquistos de composición variable (estauroлита, biotita y moscovita). Hay sedimentitas pelíticas, samíticas y calcáreas metamorfoseadas a facies de esquisto verde-anfibolita baja en Santander del Norte. A lo largo de la falla Guaicáramo, y por el Este, hay esquistos cloríticos y sericíticos intercalados con filitas, pizarras y cuarcitas. En el graben del Cauca hay esquistos verdes y azules de magnitud variable y esquistos pelíticos y básicos. En la región de Génova y Barragán, esquistos lawsoníticos y

glaucofánicos. En la región Lisboa-Palestina (Caldas) hay esquistos cuarzosos, grafíticos, de color negro, con segregación de cuarzo lechoso y metamorfismo de la facies de esquistos verde, además de esquistos anfibolíticos de textura fina y anfibolitas granatíferas.

13.6.3 Anfibolita y serpentinita. Ambas asociadas a rocas básicas y ultrabásicas; la primera rica en hornblenda y plagioclasa con cierta foliación debido a la hornblenda y la segunda rica en silicatos de Magnesio, muestra tacto suave y jabonoso y es compacta. La serpentinita es el mineral derivado del metamorfismo a altas temperaturas de rocas ígneas como las dunitas y las peridotitas. La anfibolita no posee mica y muestra cristaloblastos orientados y aciculares, la serpentinita muestra cristaloblastos más finos y superficies estriadas y pulidas. Ambas rocas exhiben una textura cristalina en una fábrica mineral entrecruzada y anisotrópica.

Anfibolitas escasas con hornblenda verde y microclina con textura enrejada, aparecen en la región central de la Serranía de la Macarena, e intercalaciones de anfibolita cloritizada en su región meridional. También hay anfibolitas con hornblenda y plagioclasa cálcica, fino-granulares oscuras y con foliación, al parecer de edad paleozoica, en la carretera Medellín-El Retiro. Hay masas protuberantes de serpentinitas de color gris verdoso a oliva pálido, estructuras de malla, ocasionalmente con granulaciones de magnetita, en el Cabo de la Vela próximo a la falla Cuisa. Hay metabasaltos del cretáceo inferior en fajas alargadas y orientadas, en la región de Yarumal.

13.6.4 Gneises. Rocas de metamorfismo de alto grado formadas a partir de rocas ígneas o sedimentarias, por lo que existen muchas variedades (gneis de plagioclasa-biotita, hornblendífero o de piroxe-granate, etc.). Si proviene de roca ígnea como granito o sienita, se denomina granítico o sienítico: el grano es grueso y el clivaje de roca; puede ser ortogneis, si se asocia a plutones, o paragneis si la roca base es sedimentaria o arcillosa. Aquí las bandas de

cuarzo y feldespatos alternarán con minerales oscuros, fibrosos o laminares. Además de los cristaloblastos que conforman las bandas, la roca con una textura cristalina muestra mica diseminada y una fábrica mineral entrabada anisotrópica.

Ejemplos de gneises existen desde el Guainía hasta el Amazonas, donde se encuentran gneises migmatíticos con biotita y silicatos de aluminio, gneises graníticos con anatexitas al norte y gneises moscovíticos y biotíticos con dos micas, metapelíticos y metasamíticos, al sur. En la Sierra Nevada hay gneis bandeado de hornblenda y plagioclasa con minerales accesorios euhedrales y zircón, redondeados. Hay gneises biotíticos en el río Ambeima, del Tolima. Hay gneises hornbléndicos y granodioríticos en el río Maní, de la región de San Lucas.

13.6.5 Mármol. Proviene de calizas y dolomías (los más escasos) por lo que el mineral dominante es calcita o dolomita; macroscópicamente no muestra foliación porque los granos tienen el mismo color y así la alineación no es visible, pero a la lupa muestra la exfoliación de la calcita, salvo si sus granos llegan a ser muy pequeños. El mármol puro, es blanco nieve; el negro, lo es por materia bituminosa; el verde, por hornblenda, clorita o talco; el rojo, por óxido de hierro. Esta roca se explica por metamorfismo regional o de contacto. Su textura es cristalina y la fábrica mineral es entrabada isotrópica.

Hay mármoles asociados a rocas ultramáficas metamorfizadas en la región Gaira al norte de la falla de Oca y oeste de la falla Santa Marta. Hay mármoles en el terreno Garzón, entre las fallas Romeral y del Borde Llanero. También mármol gris oscuro en el terreno La Floresta, en el extremo sur de la falla Santa Marta-Bucaramanga. Entre La Ceja y Medellín y entre Medellín y Puerto Berrío, hay cuarcitas y mármoles. Hay esquistos con interposiciones de mármol y anfibolita en la baja Guajira.

13.6.6 Cuarcita y hornfels. Metamorfismo de cualquier grado en areniscas cuarzosas y en arcillas calcáreas o areniscas, respectivamente. La cuarcita presenta textura clástica, cementada, no foliada; si la del mármol es densa, la de la cuarcita es granular. La cuarcita a diferencia de la arenisca no es porosa y no rompe alrededor de los granos minerales, sino a través de ellos, pues éstos se encuentran entrabados. Pura es blanca. Si la dureza del mármol es menor que la de la navaja, la de la cuarcita es mayor y raya el acero.

La hornfels, también llamada cornubianita, proviene del metamorfismo de contacto (termometamorfismo) y presenta textura entrabada que se diferencia de la del mármol por ser de grano fino. Hay cuarcitas grisáceas en la Serranía de Carpintero de la alta Guajira. Hay cuarcitas y mármoles alternando con gneises, esquistos y filitas que han sido inyectados por el batolito antioqueño al núcleo de la Cordillera Central. En el camino Envigado-El Retiro hay cuarcitas y gneises asociados a metasedimentos marinos.