



Serranía de la Macarena., Fotos Manobi Colombia-autentica.

# MANUAL DE GEOLOGIA PARA INGENIEROS

## Cap 13

### ROCAS METAMORFICAS

**GONZALO DUQUE ESCOBAR**

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 neocrystalización (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, esquisto, paragneis
Arenisca	Metasedimentos	cuarcita, hornfels
Caliza	Caliza cristalina	Mármol

ROCA BASE	ESTADO DE TRANSICIÓN	ROCA METAMÓRFICA
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<sup>2</sup>) 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 CO<sub>2</sub> 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 neocristalización 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 metamorfismo 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 homblendita. 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.

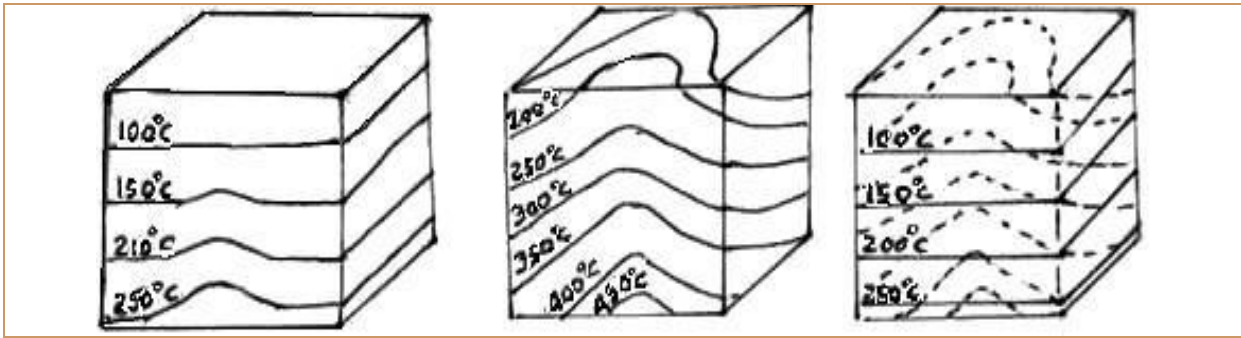


Figura 83. Metamorfismo progradante. Estados antes, durante y después del proceso.

- **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, estauroлита, biotita y hornblenda, y los de alto grado son: sillimanita, 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:

$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$	$Al_4 Si_{4-x} O_{10} + x SiO_2 + H_2O$
Caolinita	metacaolinita
$CaCO_3 + SiO_2$	$CaSiO_3 + CO_2$
calcita pedernal	wollastonita

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

$CaCO_3 + SiO_2$	$CaSiO_3 + CO_2$
calcita cuarzo	wollastonita/

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:

$3CaMg(CO_3)_2$	$+ 4SiO + H_2O$	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 +$	$3CaCO_3 + 3CO_2$
dolomita	pedernal	talco	calcita

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 kyanita, 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.

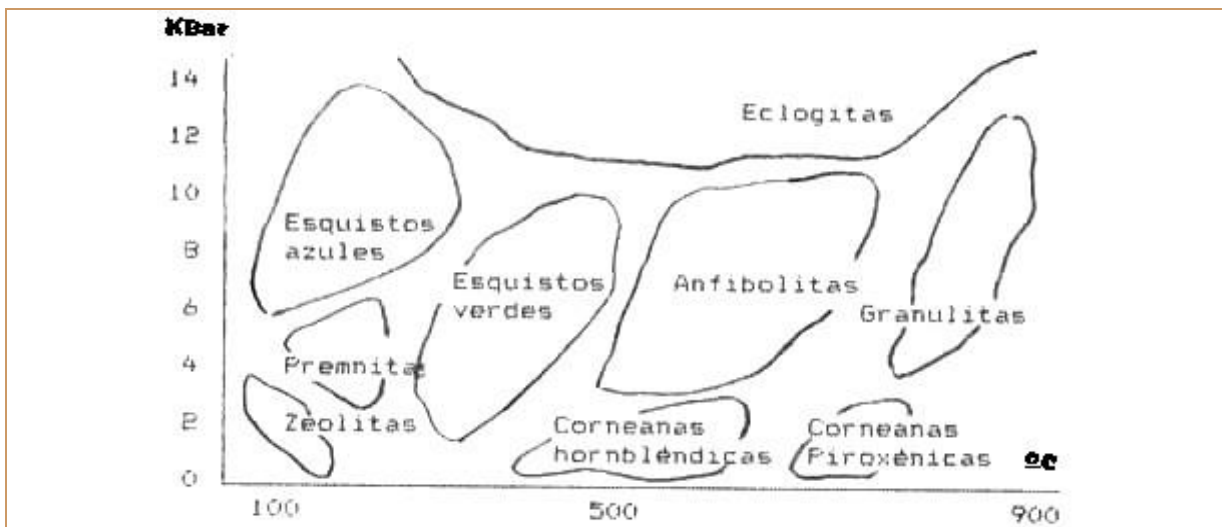


Figura 84. Esquema de Turner (1968): las facies metamórficas en relación con presión y temperatura.

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 estaurólita 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. Álvaro 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	CEMEN TADA	CONSO LIDADA	FOLIADA	CEMENTAD A	CONSOLID ADA
I G N E O	Cristalina	Fino	Basalto					
		Gruoso	Granito					
	Piroclástica	Fino		Toba				
		Gruoso		Aglomerado				
M E T A M O R F	Cristalina	Fino	Hornfels			Pizarra		
		Gruoso	Mármol			Gneis		
	Cataclástica	Fino	Milonita			Filonita		
		Gruoso	Brecha			Protomilonita		
S E D I	Grano-cristalina	Fino	Lidita					
		Gruoso	Caliza oolítica					
M E N B R A R	Clástica	Fino		Limolita calcárea	Arcillolita		Lutita Calcárea	Lutita arcillosa
		Gruoso		Conglomerado calcáreo	Conglomerado arenoso		Lutita Cuarzosa	Lutita arenosa

J. Montero, A. J. González, G. Ángel. 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 entabadas - 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 entabada 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 gráficas oscuras con metalimolitas calcáreas. Además hay filitas limosas con meta-arenisca gris verdosa. Entre Manizales y Armenia, hay filitas cuarzosas con esquistos verdes gráficos 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 entabada y anisotrópica, con textura cristalina.

En la Serranía de Jarara, al sur de la falla Cuisa, se encuentran esquistos de composición variable (estaurolita, 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, gráficos, de color negro, con segregación de cuarzo lechoso y metamorfismo de la facies de esquisto 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 entrelazada 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 entrelazada 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 hornblendícos 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 entrelazada isotrópica.

Hay mármoles asociados a rocas ultramáficas metamorfozadas 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.

### 13.7. DISTRIBUCIÓN Y FACIES DE LAS ROCAS METAMÓRFICAS EN COLOMBIA

En su trabajo titulado “Distribución, Facies y Edad de las Rocas Metamórficas en Colombia”, INGEOMINAS (2001) el Investigador colombiano Mario Maya Sánchez, quien recoge y complementa la valiosa información existente en la materia, señala que en el territorio nacional los efectos del metamorfismo han sido registrados, al menos cuatro veces en el Precámbrico (**Pe**), tres más en el Paleozoico (**Pz**), una vez en el Mesozoico (**Mz**), y un último evento en el Paleógeno (**Pg**).

Para la variable temporal: esta sería la notación:

Pe = Precámbrico;  
 Pe4 = Mesoproterozoico;  
 Pe1 = Paleoproterozoico;  
 Pz = Paleozoico;  
 Pz1 = Paleozoico temprano;  
 Pz2, = Paleozoico medio;  
 Pz3= Carbonífero superior;  
 TR= Triásico  
 K = Cretácico;  
 KT= Cretácico temprano;  
 Kt = Cretácico Tardío;  
 Pg = Paleógeno (Terciario temprano);

Luego desarrolla una clasificación en “**unidades metamórficas**” para mostrar la distribución actual de dichas rocas, obteniendo seis áreas geográficas limitadas por grandes fallas, denotando la facies del metamorfismo, con los siguientes símbolos:

- C/PP: Facies Ceolita1 y Prehnita – Pumpellyta.
- AN: Facies Anfibolita.

- G: Facies Granulita.

Las seis áreas geográficas identificadas por el Investigador Maya, son:

- 1) Al oriente de la Falla Guaicáramo,
- 2) Entre las fallas Guaicáramo y Otú-Pericos,
- 3) Entre la Falla Otú-Pericos y la Falla Cauca-Almaguer (Romerol),
- 4) Al occidente de la Falla Romeral,
- 5) Entre las fallas Oca y Santa Marta - Bucaramanga
- 6) Al norte de la Falla de Oca.

Veamos las unidades, con la respectiva notación según la Facies metamórfica y Tiempo geológico asignado, información que se consigna en el mapa anexo.

Área al oriente de la Falla Guaicáramo

- **Región de la Guainía:** Unidades ANb(Pe1,Pe2,Pe4) ; PP/EV(Pe4)
- **Macizo de Garzón:** Unidades G/AN(Pe4)1 ; G/ANm(Pe4)1
- **Serranía de la Macarena y región suroriental del Nudo de los Pastos:** Unidad G/AN(Pe4)2

Entre las fallas Guaicáramo y Otú-Pericos,

- **Macizos de Santander y la Floresta:** Unidades ANb(Pe4,Pz1) ; AN/EV(Pe-Pz1) ; AN/EVbm(Pe-Pz1) ; EV(Pz1)1
- **Macizo de Quetame:** Unidad EV(Pz1)2
- **Borde Oriental de la Cordillera Central:** Unidades AN/G(Pe4) ; EV(Pz1)3 ;

Entre la Falla Otú-Pericos y la Falla Cauca-Almaguer (Romerol),

- **Cordillera Central:** Unidades G/ANm(Pe-Pz) ; ANm(Pe-Pz2) ; AN(Pe-K) ; ANb(Pz2,Pz3) ; EVb(Pz2,Pz3) ; EVm(Pz2-KT) ; AN/EV(Pz2) ; AN/EV(Pz-TR) ; AN/EVm(Pz-KT) ; AN(Pz-TR) ; E/EaA(KT) ; C/PP(KT)

Al occidente de la Falla Romeral,

- **Suroccidente de la Cordillera Central, Cordillera Occidental:** Unidades C/PP/EV(Kt-Pg)1 ; C/PP/EV(Kt-Pg)2
- **Serranía del Baudó:** Unidad C/PP(Kt-Pg)

Entre las fallas Oca y Santa Marta - Bucaramanga

- **Cinturón de la Sierra Nevada:** Unidades G/ANm(Pe4)2 ; AN(Pz)
- **Cinturón de Sevilla:** Unidades AN(Pz3) ; AN(P)
- **Cinturón de Santa Marta:** Unidades AN(Kt,Pg) ; EVb(Kt,Pg)

Al norte de la Falla de Oca.

- **Sector al oriente de la Falla Simarua:** Unidades ANm(Pz,Pg) ; PP(Kt)
- **Sector al occidente de la Falla Simarua:** Unidad EVb(Kt-Pg)

A continuación, el mapa de INGEOMINAS con las seis áreas propuestas por Maya Sánchez.

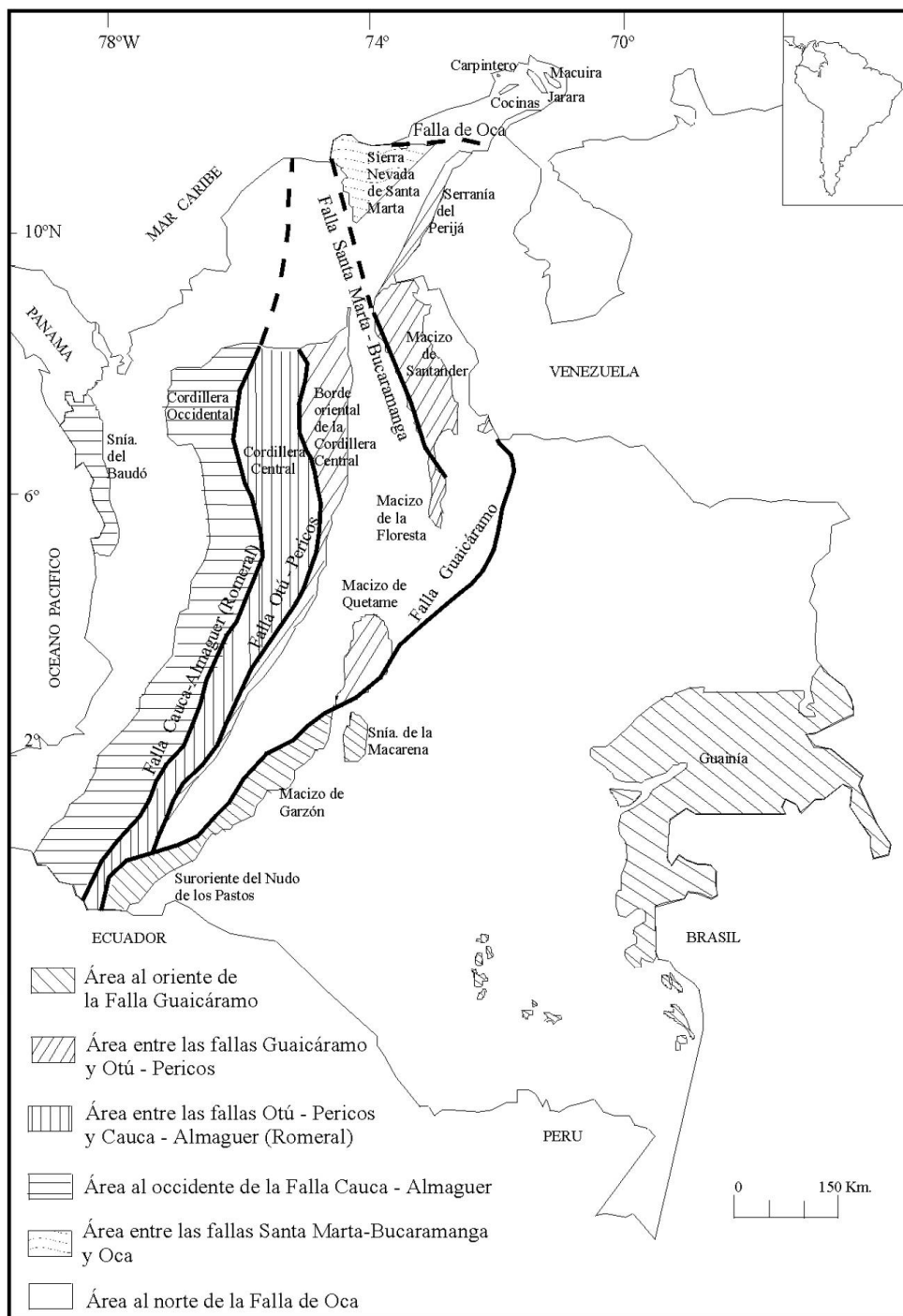


Imagen 35. Distribución de las áreas geográficas con rocas metamórficas en Colombia. Autor: Mario Maya Sánchez. INGEOMINAS (2001). Ver detalles del Mapa Metamórfico de Colombia, de Maya, en: <https://es.scribd.com/doc/164787592/Mapa-Metamorfico-de-Colombia-INGEOMINAS-2001>

### 13.8- COLOMBIA, PAÍS DE HUMEDALES AMENAZADOS



Imagen 36: Ciénaga Grande de Santa Marta y Poblado del litoral del delta del río Mira en: imeditores.com (Deltas y Estuarios de Colombia. Banco de Occidente); Charca de Guarinocito por Darío Correa, en: flickr.com

Según el Instituto Alexander von Humboldt IAVH en su libro “Colombia Anfibia, país de humedales”, en 20 millones de hectáreas equivalentes a cerca del 17% de nuestra superficie continental, tenemos 31.702 humedales, de los cuales el 48% están en nuestras Orinoquia y Amazonia. Pero estos ecosistemas dinámicos de cuyos elementos fundamentales, el agua y la biota, al estar amenazados por acciones antrópicas y por el cambio climático, han permitido declarar una alerta para protegerlos, ya que cerca del 93% requiere figuras de conservación por ser frágiles cuerpos de agua estratégicos para insectos, batracios y peces, como para aves, reptiles y mamíferos, donde se hace insostenible la creciente presión de uso sobre el patrimonio hídrico; esto como resultado de la expansión urbana, del crecimiento demográfico, de la demanda de agua, de la desecación antrópica y de la contaminación, entre otros: a modo de ejemplo, la propuesta de urbanizar las tierras de la reserva “Thomas van der Hammen”, o la agonía de manglares y la masiva mortandad de peces en la Ciénaga Grande, consecuencia de obras viales del Estado.

La Convención de Ramsar (Irán) sobre los humedales de importancia internacional, aprobó el 2 de febrero de 1971 un visionario y estratégico tratado intergubernamental que sirve de marco para la conservación y uso racional de dichos ecosistemas, logrando vincular a casi el 90% de los Estados miembros de las Naciones Unidas, entre ellos Colombia que ingresa en 1998, suscribiendo progresivamente y desde entonces seis humedales de importancia con una superficie de 708.683 hectáreas, y que son: el Sistema Delta estuario del río Magdalena, albufera con 400.000 ha, que es el complejo lagunar más grande de Colombia; el Delta del río Baudó con 8.888 ha y ubicado en el Pacífico colombiano; el Complejo de Humedales Laguna del Otún con 6.579 ha, ubicado en el PNNN; el Sistema Lacustre de Chingaza, con 4.058 ha localizadas en Cundinamarca; la Laguna de La Cocha con 39.000 ha, un santuario ubicado a 2.660 msnm en Nariño; y el Complejo de Humedales de la Estrella Fluvial Inírida con 250.159 ha, de Guainía.

Se propone el IAVH consensuar un sistema con cerca de 55 clases diferentes de humedales en Colombia, cantidad que se explica por el relieve cordillerano de nuestro trópico andino con su clima bimodal, la altillanura y la selva amazónica con sus peculiares incidencias atmosféricas, y el régimen climático del Pacífico o las condiciones biogeográficas del Archipiélago, por lo que más allá de los seis emblemáticos ecosistemas húmedos denominados Sitios Ramsar, también habrá que integrar los demás humedales del país a los procesos de Ordenamiento Territorial y Planes de Manejo Ambiental, entre otros instrumentos de planificación donde se define el modelo de ocupación del suelo urbano y rural, no solo reconociéndolos como parte fundamental de los complejos ecosistemas biogeográficos y como espacios estratégicos del territorio, lo

que supone emprender un inventario detallado y su caracterización, sino diseñando las acciones para su recuperación y manejo orientadas a resolver los conflictos socioambientales que los afectan y a garantizar su estabilidad ecológica, para asegurar la oferta de bienes y servicios ambientales asociados.

Al observar el mapa preliminar de humedales de Colombia del IAVH, aunque por la escala no se visibilizan turberas y otros humedales de páramo y bosques andinos que regulan los caudales de las regiones más pobladas de Colombia y que contribuyen a las dinámicas del clima, sobresalen por su extensión varios reservorios, como marismas y manglares en la costa del Pacífico desde el sur de Tribugá hasta el río Mira, y en especial sobre el delta del Patía donde aparece Tumaco; o ciénagas y madre viejas en corrientes de meandros, como las comprendidas entre el río Meta y el piedemonte de la Cordillera Oriental; o las rondas del río Guaviare y en parte del Vichada e Inírida; además de las vaguadas del Putumayo, Caquetá y Vaupés; y el valle del Atrato aguas abajo de Vigía del Fuerte, y en parte del San Juan; o en regiones como el Magdalena Medio y Bajo y el Bajo Cauca, donde a pesar de ecocidios agroindustriales, mineros, etc., sobresalen, además de la Ciénaga Grande de Santa Marta, La Mojana, la Depresión Momposina y el área del Sinú-San Jorge.

[Ref.: La Patria. Manizales, 2016.08.15]

## 7.7- PARAMOS VITALES PARA LA ECORREGIÓN CAFETERA

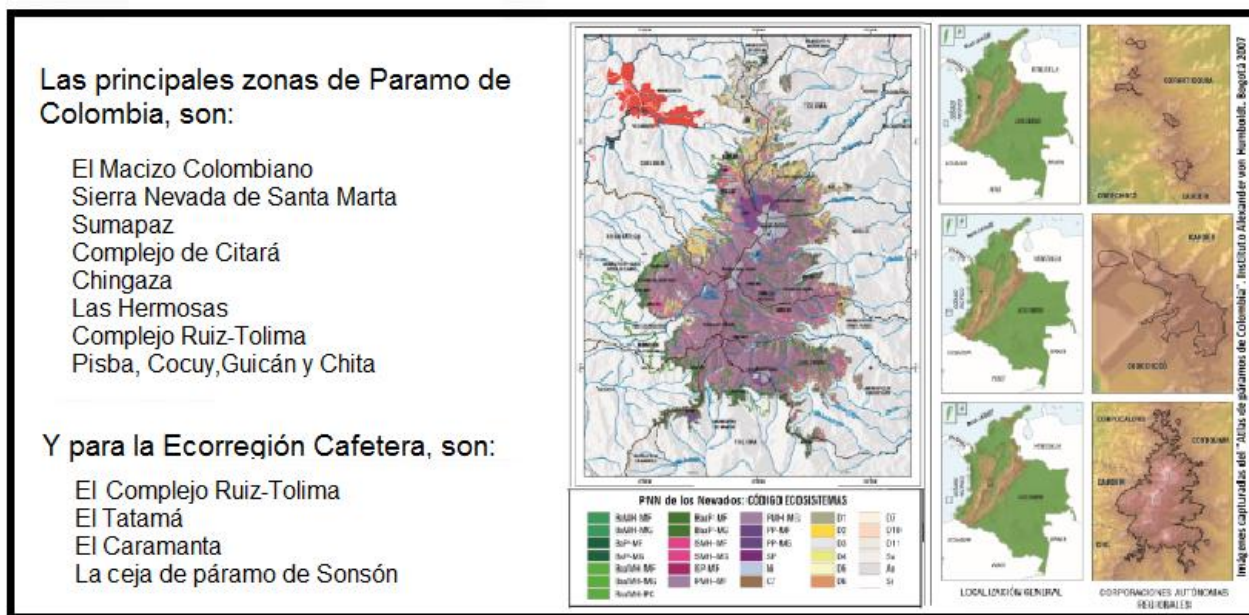


Imagen 37: Páramos en la Ecorregión Cafetera: IDEAM, e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Colombia es altamente vulnerable a los efectos del cambio climático, cuyos impactos socioambientales y económicos también afectarán a la Ecorregión Cafetera, no solo por la migración en altitud de las zonas de vida alterando la aptitud de los suelos y con ello la estructura de la tenencia de la tierra, sino también por cambios en el balance hídrico y régimen de precipitaciones, y en la frágil estabilidad de comunidades



vegetales nativas frente a las variaciones del clima por la fragmentación de los ecosistemas, entre ellos los de montaña que están en peligro y los páramos donde por fortuna la Corte Constitucional ha blindado el subsuelo de los apetitos mineros que acechan.

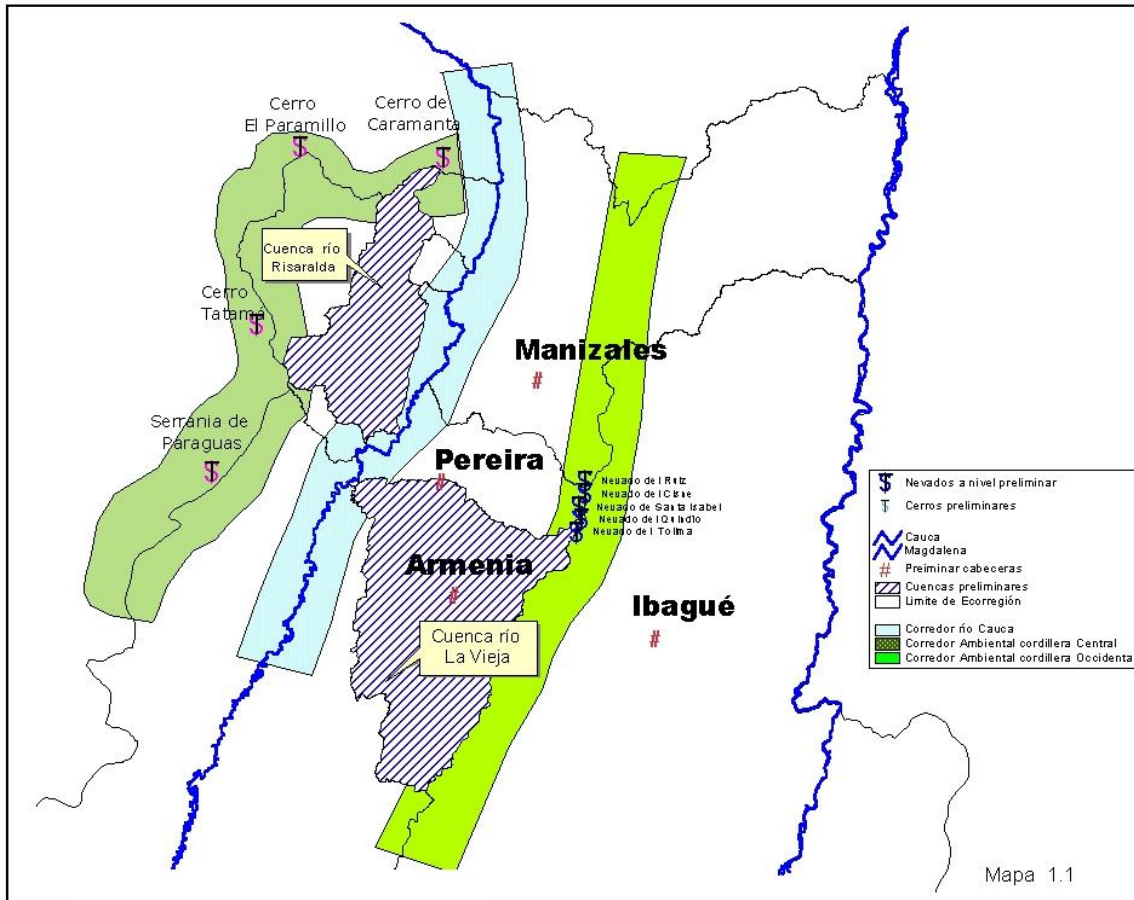


Imagen 38: Estructura Fisiográfica de la Ecorregión Cafetera. Ideam

Esta Ecorregión Cafetera con su verde, escarpado y deforestado paisaje tropical enclavado entre las cordilleras y profundos valles de los Andes más septentrionales de América, donde sobresalen los páramos establecidos en ambientes fluviales, glaciares y gravitacionales que se entrecruzan, ubicados tanto sobre la Cordillera Central en vecindad de las cumbres nevadas del Complejo volcánico Ruiz-Tolima y la Mesa de Herveo a más de 5.000 msnm, como en el continuo de farallones de la Cordillera Occidental ubicado al sur de los Complejos Paramillo y Frontino-Urrao, con sus notables alturas como el Cerro Caramanta del Complejo Citará y el Tatamá del Macizo Tatamá que son sus mayores alturas en jurisdicción del Eje Cafetero.

En los Andes sudamericanos, estos y otros páramos se extienden como islas, en ocasiones en medio de paisajes volcánicos, tal cual se observa desde la Depresión de Huancabamba al norte del Perú, hasta la Cordillera de Mérida en Venezuela o la Sierra Nevada de Santa Marta, pasando por las tres cordilleras de Colombia. Si el páramo es un ecosistema tropical de montaña con vegetación achaparrada tipo matorral, que se desarrolla por encima del área del bosque montano y por abajo del sistema nival, aunque también existen en Centro América, Sudamérica, Asia, Oceanía y África, en términos absolutos la mayor extensión paramuna

del mundo está en Colombia, aunque solo algunos han escapado a diferentes procesos de alteración y afectación antrópica.

Así como hemos visto la migración de los cafetales conforme el clima ha venido cambiando, avanzando 170 m en altitud por cada grado centígrado de incremento en la temperatura, también en el PNNN ya se advierte el calentamiento global con la pérdida de los glaciares: si entre 1979 y 2010 la superficie de los hielos perpetuos en el Complejo Volcánico Ruiz-Tolima ha pasado de 32 o 29 a 12 o 10 kilómetros cuadrados, mucho antes, cuando se funda Manizales (1849), como consecuencia del último pico de una pequeña glaciación ocurrida entre 1550 y 1850, según Antonio Flórez (2002) e Ideam-Unal (1997) los hielos del PNNN sumaban cerca de 93 kilómetros cuadrados, 10% de los cuales cubrían el Cisne y el Quindío.

El Tatamá con 4.250 msnm y su ecosistema de páramo y bosques alto-andinos muy húmedos delimitados por los 3.450 m de altitud, y el Caramanta con su cumbre a 3.900 msnm que ubicado al sur de los farallones del Citará igualmente comprende el páramo, no solo marcan el paisaje del norte de Caldas y de Manizales por el poniente, sino que también nutren el drenaje de los ríos San Juan, Atrato, Risaralda y Cauca de esta ecorregión, al albergar varias cuencas de las dos vertientes de la Cordillera Occidental, tanto por el norte de la ecorregión con los ríos Arquía, San Juan Antioqueño, como al sur con los ríos San Rafael, Tatamá, Negro y Mapa.

Pero además de ser el de Tatamá un Parque Natural Nacional por fortuna casi-inaccesible y casi virgen y desconocido, y el de Caramanta una zona de interés declarada Reserva Forestal Protectora Regional en Antioquia para proteger sus páramos con su particular biota y fauna biodiversa, e importantes especies endémicas, también ambos escenarios al lado del PNNN como singulares medios de regulación hidrológica, suministro de oxígeno y captura de carbono atmosférico, además de ser espacios vitales para varias comunidades vecinas, de territorios colectivos afrodescendientes, resguardos indígenas Embera y poblados de mestizos, son medios estratégicos y fundamentales para la sustentabilidad urbana y rural de la Ecorregión Cafetera, donde vivimos cerca de 2,7 millones de habitantes que ignoramos estas y otras complejas relaciones y dinámicas culturales y ecosistémicas

[Ref.: La Patria. Manizales, 2016/03/28.]

---

## Lecturas complementarias

### **Esfuerzos en el Suelo.**

Estructura del suelo y esfuerzos, Pruebas comunes de esfuerzo-deformación, esfuerzos geostáticos, Esfuerzos producidos por cargas aplicadas al suelo, Diagrama de influencia; Bulbos de esfuerzo; Consolidación y asentamientos. Ver en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1864/11/cap10.pdf>

### **Eje Cafetero y Transporte Intermodal**

El Eje Cafetero, gracias a su ubicación en el centro-occidente de Colombia presenta una posición estratégica para implementar el sistema intermodal de carga que requiere la Región Andina, para la competitividad del país: la clave de este sistema, estaría en articular el sistema ferroviario y la hidrovía del Magdalena mediante el Ferrocarril Cafetero entre La Dorada y el Km 41, y en extender el Corredor férreo el Cauca, hasta el Altiplano, y desde Buenaventura hasta Urabá, apalancando el desarrollo ferroviario en la locomotora del carbón andino.

Ver en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/53020/1/ejecafeteroytransporteintermodal.pdf>

### **Impacto por la multimodal en el Magdalena Centro.**

Prospección de los impactos por la navegación del río Magdalena sobre un territorio tan complejo y dinámico, como el Magdalena Centro. El Altiplano y el Eje Cafetero, que son los centros de gravedad de las principales subregiones andinas de Colombia, serán los escenarios más beneficiados con la hidrovía, cuya capacidad se estima en 500 millones de toneladas por año. Ver en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/42001/1/gonzaloduqueescobar.201439.pdf>

### **Vías lentas en el corazón del Paisaje Cultural Cafetero.**

El Plan de Acción Inmediata para la Cuenca del San Francisco, es una estrategia de los actores sociales comprometidos con la construcción sostenible de su territorio, donde la estrategia parte de implementar el "bioturismo" y hacer de la carretera de Marsella la primera "vía lenta" de Colombia. La vía lenta propuesta por los marselleses en el marco del Paisaje Cultural Cafetero, fortalece la oferta local de bienes culturales y servicios ambientales de las comunidades rurales de Marsella. Ver en: <http://bdigital.unal.edu.co/5465/1/gonzaloduqueescobar.201180.pdf>

### **Planteamiento y solución a un problema topográfico: problema "ALEPH".**

Como darle coordenadas a un punto inaccesible, a partir de los ángulos de inclinación observados con teodolito desde tres placas topográficas -definidas en R3- no intervisibles. Ver en: [http://www.bdigital.unal.edu.co/1672/1/aleph\\_gde.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/1672/1/aleph_gde.pdf)

## **ENLACES U.N. – SMP**



### **VISIÓN PROSPECTIVA DEL AEROPUERTO DEL CAFÉ**

<http://www.bdigital.unal.edu.co/53402/1/visionprospectivadelaerpuertodelcafe.pdf>

### **INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE PARA LA CONECTIVIDAD INTERNA Y EXTERNA DE CALDAS**

<https://godues.wordpress.com/2016/04/11/infraestructura-del-transporte-estrategica-para-la-conectividad-interna-y-externa-de-caldas/>

### **"MANIZALES Y CALDAS SOBRE LAS RUTAS DEL PROGRESO" – DOSIER \***

<http://www.bdigital.unal.edu.co/51247/1/manizalesycaldassobrelasrutasdelprogreso.dossier.pdf>

### **EJE CAFETERO: TRANSPORTE Y DESARROLLO REGIONAL**

<http://www.bdigital.unal.edu.co/9244/1/gonzaloduqueescobar.20139.pdf>

### **FERROCARRILES: INTEGRACIÓN Y PROGRESO PARA COLOMBIA**

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1601/1/ferrocarrilesintegracionyprogresoparacolombia.pdf>

### **URABÁ FRENTE A LOS MARES DE COLOMBIA**

<http://www.bdigital.unal.edu.co/51859/1/urabafrentealosmaresdecolombia.pdf>

### **UN PLAN MAESTRO DE TRANSPORTE "MULTI" PERO NO INTERMODAL**

<http://www.bdigital.unal.edu.co/53096/1/unplanmaestromultiynointermodal.pdf>

### **SISTEMA FERROVIARIO PARA LA REGIÓN ANDINA DE COLOMBIA**

<http://www.bdigital.unal.edu.co/49795/1/sistemaferroviarioparalaregi%C3%B3nandinadecolombia.pdf>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
(1867-2017)



## MANUAL DE GEOLOGIA PARA INGENIEROS

Gonzalo Duque-Escobar

MANIZALES, 2016

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>

### Presentación

### Contenido

[Cap01](#) Ciclo geológico  
[Cap02](#) Materia y Energía  
[Cap03](#) El sistema Solar  
[Cap04](#) La Tierra sólida y fluida  
[Cap05](#) Los minerales  
[Cap06](#) Vulcanismo  
[Cap07](#) Rocas ígneas  
[Cap08](#) Intemperismo ó meteorización  
[Cap09](#) Rocas sedimentarias  
[Cap10](#) Tiempo geológico

[Cap11](#) Geología estructural  
[Cap12](#) Macizo rocoso  
[Cap13](#) Rocas Metamórficas  
[Cap14](#) Montañas y teorías orogénicas  
[Cap15](#) Sismos  
[Cap16](#) Movimientos masales  
[Cap17](#) Aguas superficiales  
[Cap18](#) Aguas subterráneas  
[Cap19](#) Glaciares y desiertos  
[Cap20](#) Geomorfología  
[Lecturas complementarias](#)  
[Bibliografía](#)

### Anexo 1: Agua y Clima

<http://www.bdigital.unal.edu.co/54046/>

### Anexo 2: Calentamiento global en Colombia

<http://www.bdigital.unal.edu.co/3673/>

### Anexo 3: Desafíos del Complejo Volcánico Ruiz – Tolima

<http://www.bdigital.unal.edu.co/9484/>

### Anexo 4: Economía para el constructor

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1698/>

### Anexo 5: Gestión del riesgo

<http://www.bdigital.unal.edu.co/47341/>

### Anexo 6: Geotecnia para el trópico andino

<http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/>

### Anexo 7: La Luna

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1663/>

### Anexo 8: ¿Para dónde va el Magdalena?

<http://www.bdigital.unal.edu.co/51046/>

### Anexo 9: Túnel Manizales

<http://www.bdigital.unal.edu.co/2046/>

### Anexo 10: UMBRA: La Ecorregión Cafetera en los mundos de Samoga

<http://www.bdigital.unal.edu.co/50853/>

### Anexo 11: Mecánica de los suelos

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1864/>

[El Autor:](#) Gonzalo Duque-Escobar

**HOME:**

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>