

# Metodología de ponderación de la variable geología con fines de generación de cartografía multipropósito

Byron Bravo-Granda<sup>1\*</sup> ; Angélica León-Peralta<sup>1</sup> ; Lizeth Sucunuta-Ordóñez<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito, Ecuador. (\*) thegeologist7@gmail.com; aga\_173@yahoo.es

<sup>2</sup>Instituto Geográfico Militar, Quito, Ecuador. likar\_so@hotmail.com

## Resumen

Esta investigación es una propuesta metodológica para valorar la variable geología en la generación de cartografía multipropósito como mapas de deslizamientos, erosión de suelos y más, mediante la ponderación de criterios objetivos que disminuyen el grado de incertidumbre en su análisis, valorando los factores que determinan la heterogeneidad (textura, fracturación, clima y otros) del tipo de roca y depósito superficial. La metodología permite estimar un factor geológico (FG) mediante cuatro componentes: 1) resistencia del tipo litológico, 2) tipo de fábrica y/o textura, 3) grado de fracturación y 4) grado de meteorización, que se relacionan mediante matrices doble entrada para obtener tres índices: 1) índice litológico, 2) índice de fracturación y 3) índice de meteorización. Estos criterios se aplicaron en el cuadrángulo de la hoja geológica de Guayllabamba escala 1:25.000 en Ecuador, y se obtuvo un FG medio y muy malo que resultan de genéticas deposicionales volcánicas aluviales y otros materiales sueltos que afloran en el área; es clave la geoinformación con escalas adecuadas y una correcta valoración.

**Palabras clave:** Análisis; Geoinformación; Geológico; Mapa; Multicriterio, Valoración.

## Weighting methodology of the geology variable for the use of multipurpose cartographic generation

### Abstract

This research presents a methodological proposal to assess the geology variable in the development of multipurpose cartograph such as landslide maps, soil erosion maps, and other by weighting objective criteria that reduce the degree of uncertainty in analysis. The approach evaluates factors that determine the heterogeneity (e.g., texture, fracturing, climate) of rock types and surficial deposits. The methodology enables the estimation of a Geological Factor (GF) through four components: 1) lithological resistance, 2) fabric and/or texture type, 3) degree of fracturing, and 4) degree of weathering. These components are interrelated using cross-matrix methods to derive three indices: 1) lithological index, 2) fracturing index, and 3) weathering index. The method was applied to the Guayllabamba geological map sheet (1:25,000 scale) in Ecuador, yielding medium to very poor GF values, mainly due to depositional environments of volcanic, alluvial, and other unconsolidated materials outcropping in the area. The use of appropriately scaled geoinformation and accurate assessment proved to be key.

**Keywords:** Analysis; Geoinformation; Geological; Map; Multicriteria; Assessment.

Forma de citar: Bravo-Granda, B.; León-Peralta, A.; Sucunuta-Ordóñez, L. (2025). Metodología de ponderación de la variable geología con fines de generación de cartografía multipropósito. *Boletín de Geología*, 47(3), 145-164. <https://doi.org/10.18273/revbol.v47n3-2025007>

## Introducción

El análisis espacial en la elaboración de cartografía multicriterio, en el desarrollo de políticas y proyectos locales, es fundamental en la toma de decisiones en territorio; retrospectivamente, desde el año 1992 al 2006, se ha incrementado 4,2 veces el uso de herramientas multiatributo (Wallenius *et al.*, 2008), que integran componentes físicos, bióticos, constructivos, entre otros, con criterios objetivos que deben ser cuantificables, medibles y comparables, sin dejar de lado la subjetividad como juicios, preferencias y razonamientos.

La ponderación de variables es fundamental en el análisis de cartografía multipropósito y, según Celemín (2010), lleva implícita una elevada subjetividad, por lo que es necesario minimizarla con una metodología lo más objetiva posible.

La cartografía multipropósito integra la combinación de muchas variables según su temática, por ejemplo, en estudios de riesgos por deslizamientos se usan variables como pendiente, geomorfología, vegetación, geología y más; en este caso, la variable geología es la más difícil de evaluar (Mora y Vahrson, 1994). Este criterio es reforzado por Marcano *et al.* (2015), quienes señalan que existen variables como la litología y la resistencia que

tienen mayor incidencia y consideración en la temática de riesgos por deslizamientos.

En este contexto, la complejidad al ponderar la variable geología radica en el grado de subjetividad con que se evalúa; se asume, por ejemplo, que materiales rocosos duros son más resistentes y por ende más aptos, y un material menos duro es menos apto, por lo que se dejan de lado las características geomecánicas, clima, tectonismo, origen y otros más.

## Materiales y métodos

La propuesta metodológica para ponderar la variable geología es una adaptación de la metodología propuesta por Trejos *et al.* (2012), y relaciona con matrices doble entrada los componentes que determinan el grado de resistencia y anisotropía del tipo de roca y depósito superficial a los que se asigna valores del 1 al 5 (de muy bueno a muy malo).

La combinación de cada componente permite estimar tres índices: 1) índice litológico IL, 2) índice de fracturación IF y 3) índice de meteorización IM, que a su vez se relacionan entre sí para obtener el factor geológico FG. Nótese en la Figura 1 el esquema de índices y componentes que conforman el FG. En los siguientes apartados se detalla la metodología propuesta.

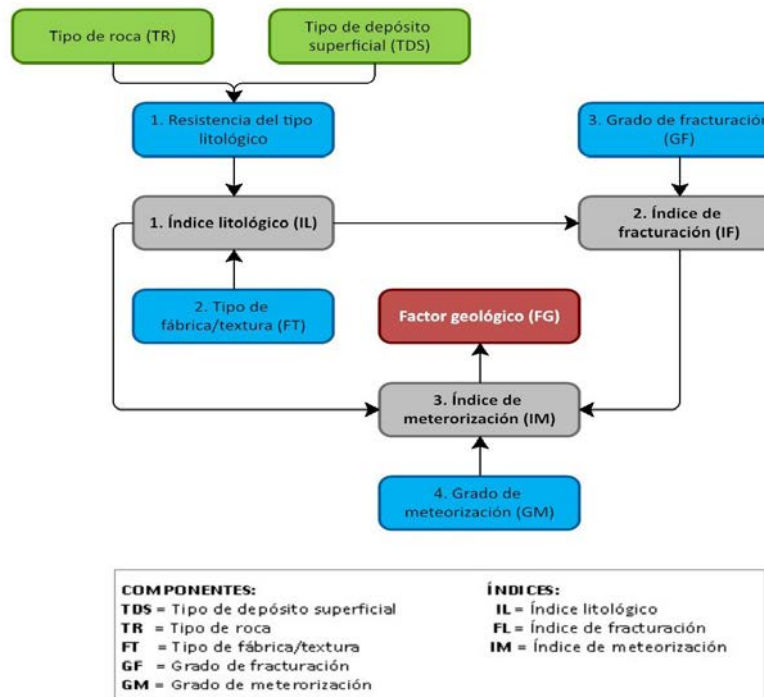


Figura 1. Esquema de componentes del FG.

### Escala de trabajo y ámbito de aplicación

Según la [Commission on Engineering Geological Maps of the International Association of Engineering Geology \(1976\)](#), la escala de trabajo se determina según el propósito y contenido, que para el caso de esta investigación, cuya finalidad es ponderar las características geológicas según su uniformidad, es recomendable una escala menor a 1:10.000 y mayor a 1:100.000. Téngase en cuenta no descartar escalas mayores a 1:10.000 siempre y cuando el detalle de otras capas de geoinformación a relacionarse sea correspondiente.

La metodología es aplicable y adaptable en cualquier región y/o país; es importante la caracterización del tipo de roca y depósito superficial en las escalas recomendadas. En Ecuador, por ejemplo, se puede aplicar en cualquiera de los terrenos litofisiográficos establecidos por [Aspden y Litherland \(1992\)](#), considerando las características

propias de cada región, ya que su comportamiento será distinto uno de otro según sea el caso.

### Unidad cartografiable

Como unidad básica de análisis, se considera a la unidad litoestratigráfica y los depósitos superficiales; la unidad litoestratigráfica se define a partir de las características litológicas de los cuerpos rocosos tanto para unidades estratificadas como no estratificadas, por lo que su valoración se hará según el tipo de roca. Los depósitos superficiales en cambio se valoran según su genética. La clasificación de tipos de depósito superficial se detalla en apartados siguientes.

La [Figura 2](#) contiene la clasificación de unidades cartografiables según su litotipo; se toma como referencia los Estándares de Nomenclatura Estratigráfica, Simbolización y Abreviaturas para la Cartografía Geológica ([IIGE, 2019](#)).

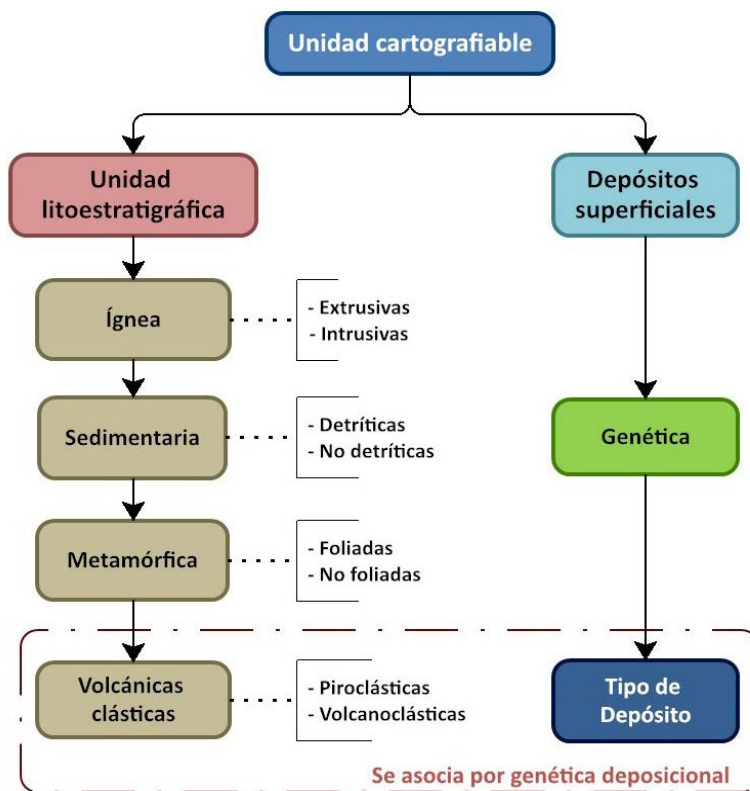


Figura 2. Clasificación de unidades cartografiables.

### Uso de matrices doble entrada

Las matrices doble entrada son muy útiles para toda clase de información que posea dos variables fijas; permiten comparar los resultados de la unión de los valores que estas puedan tener ([CISE, 2019](#)). Según [Carmona-Sánchez \(2018\)](#), la extensión de la matriz dependerá de la cantidad de datos; para este caso, se asignaron valores

del 1 al 5, y se organizaron en dos ejes: uno vertical y otro horizontal, combinando en diferentes matrices los componentes e índices que conforman el FG. En la [Figura 3](#) se puede observar el flujograma para obtener el FG, y en la [Figura 4](#), un caso demostrativo de los pasos a seguir en cada matriz.

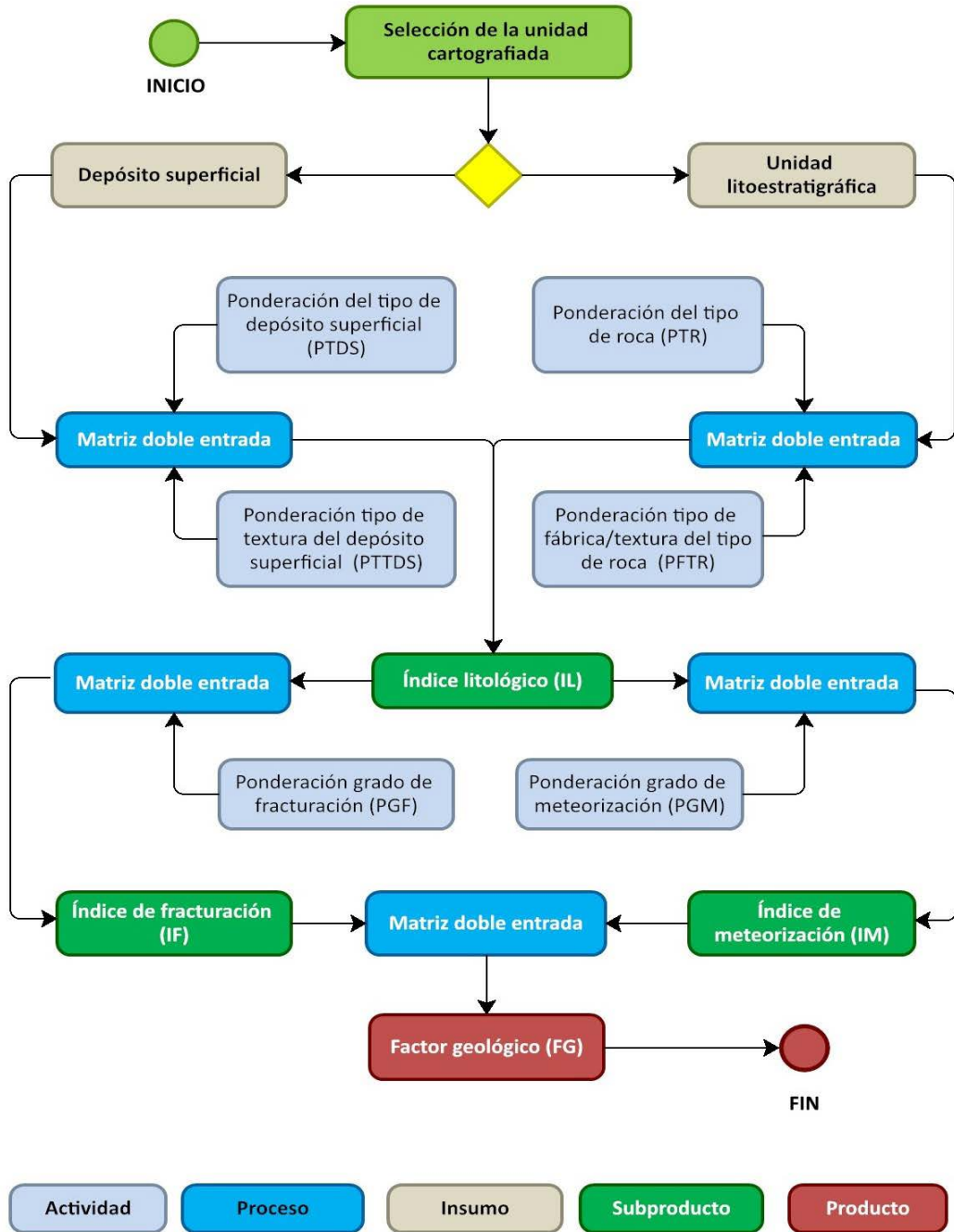


Figura 3. Flujoograma para determinar el FG.

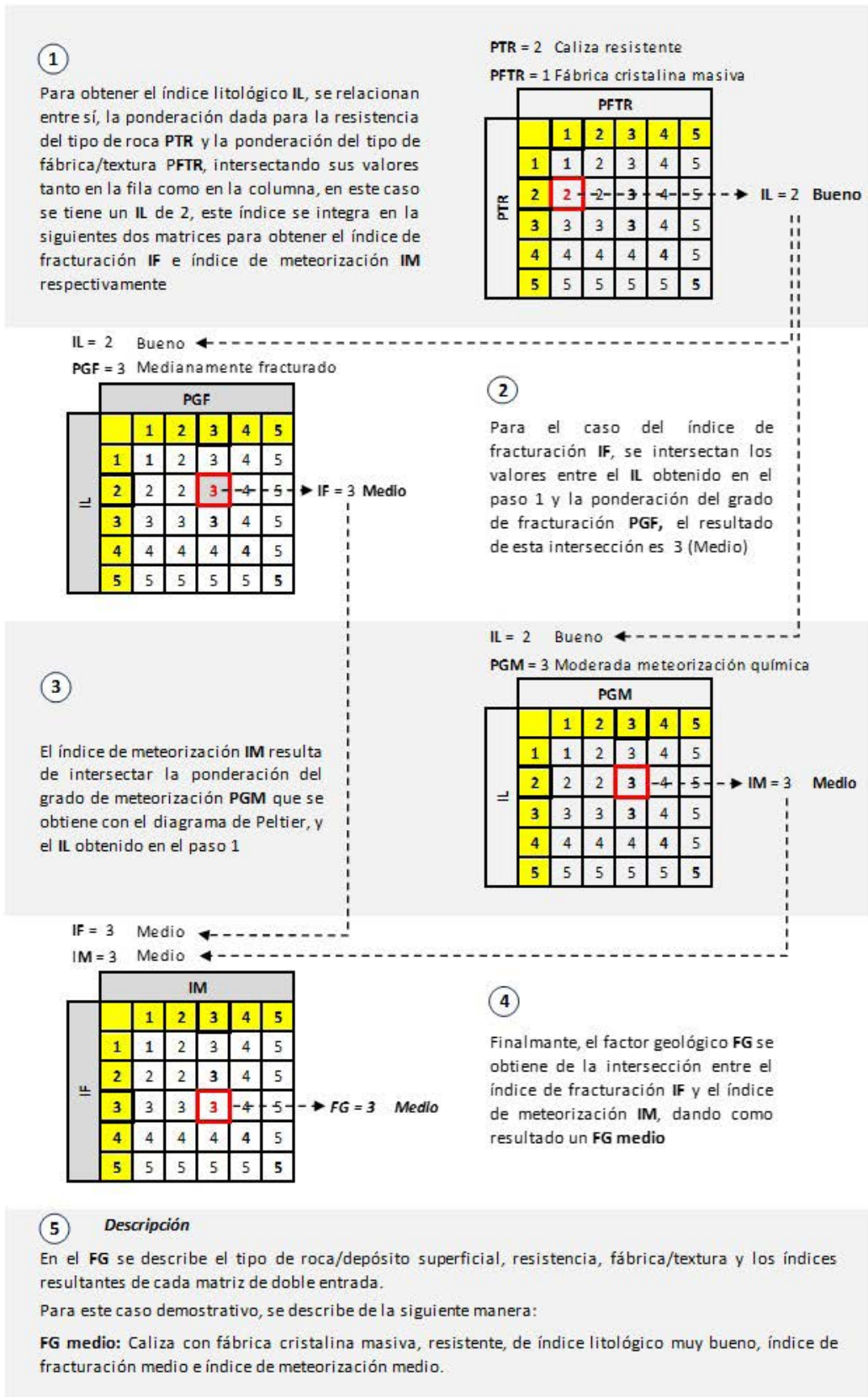


Figura 4. Caso demostrativo de matrices doble entrada.

**Resistencia del tipo litológico**

**Tipo de roca (TR):** la clasificación litológica es fundamental, ya que aporta información mineralógica, textura y de fábrica, que define el comportamiento geomecánico de las rocas; según [González de Vallejo et al. \(2002a\)](#), estas características condicionan las propiedades físicas y resistentes de las rocas, que, aunque

son fundamentales para su clasificación, no aportan información cuantitativa, por lo que su valoración se hace con base en las clases de resistencia de la roca propuesta por [Hoek y Brown \(1997\)](#). En las [Tablas 1 y 2](#) se pueden observar tanto las clases de resistencia de la roca como la ponderación propuesta, respectivamente.

**Tabla 1.** Clases de resistencia de la roca, elaborado a partir de [Hoek y Brown \(1997\)](#).

Clase (a)	Resistencia uniaxial (MPa)*	Índice carga puntual (MPa)	Estimación en terreno	Ejemplos
R6	>250	> 10	Golpes de martillo geológico solo causan descostramientos superficiales en la roca.	Basalto fresco, chert, diabasa, gneiss, cuarcita.
R5	100-250	4-10	Un trozo de roca requiere varios golpes de martillo geológico para fracturarse.	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneiss, granodiorita, caliza, mármol, riolita, toba.
R4	50-100	2-4	Un trozo de roca requiere más de un golpe con el martillo geológico para fracturarse.	Caliza, mármol, filitas, arenisca, esquistos, pizarras.
R3	25-50	1-2	Un trozo de roca puede fracturarse con un único golpe del martillo geológico, pero no es posible descostrar la roca con un cortaplumas.	Arcillolita, carbón, concreto, esquistos, pizarras, limolitas.
R2	5-25	(b)	Un golpe con la punta del martillo geológico deja una indentación superficial. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas, pero con dificultad.	Creta, sal mineral, potasio.
R1	1-5		La roca se disgrega al ser golpeada con la punta del martillo geológico. La roca puede ser descostrada con un corta plumas.	Roca muy alterada o meteorizada.
R0	0,25-1		La roca puede ser indentada con la uña del pulgar.	Salbanda arcillosa dura.

(a) Clases según Brown

(b) Para rocas con una resistencia en compresión uniaxial menor que 25 Mpa, los resultados del ensayo de carga puntual son poco confiables R0 (extremadamente débil); R1 (muy débil); R2 (débil); R3 (moderadamente resistente); R4 (resistente); R5 (muy resistente); R6 (extremadamente resistente)

\*De ser necesario y factible, se puede complementar la estimación de la resistencia de la roca con la utilización del martillo geológico según la [ISRM \(1978\)](#); también se puede utilizar la correlación de rebote R del martillo Schmidt según norma [ASTM D5873-05](#); [Barton y Choubey \(1977\)](#) también establecen una correlación de rebote R del martillo Schmidt.

**Tabla 2.** Propuesta de ponderación del tipo de roca PTR.

Clase	Tipo de resistencia según la roca	Ponderación propuesta	Descripción
R6	Extremadamente resistente	1	Muy bueno
R5	Muy resistente	1	Muy bueno
R4	Resistente	2	Bueno
R3	Medianamente resistente	3	Medio
R2	Débil	4	Malo
R1	Muy débil	5	Muy malo
R0	Extremadamente débil	5	Muy malo

**Tipo de depósito superficial (TDS):** las características geotécnicas de los depósitos superficiales dependerán de su morfometría, transporte, ambiente de formación y más, que permita asumir su disposición y algunas de sus propiedades físicas; es necesario clasificar el tipo de depósito según su genética. Para este caso se han simplificado y adaptado los criterios de [McMillan et al.](#)

(1999) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013).

Con los criterios antes citados, en la [Figura 5](#) se disgrega a mayor detalle el tipo de depósito superficial asociándolo a su geoforma, lo que permite estimar su genética y textura.

Genética	Textura	Tipo de depósito	Descripción	Geoforma asociada
Gravedad y movimientos en masa		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coluviales</li> <li>- De detritos</li> <li>- De derrubios</li> <li>- De lodo y/o tierra</li> </ul>	Masa de material heterogéneo incoherente y caótico de fragmentos de suelo y roca; clastos de variado tamaño embebidos en una matriz arenosa, limosa, arcillosa o su combinación.	Coluvión antiguo/reciente, flujo de detritos, tierra y/o lodo, talud y conos de derrubio
Fluvio-Deposicional		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aluviales subactuales consolidados</li> <li>- Aluviales subactuales semiconsolidados</li> <li>- Aluviales finos</li> </ul>	Depósitos finos y subactuales (gravas, arenas, limos) consolidados y semiconsolidados, presentan una matriz soportada y clastos de diámetro y forma homogénea.	Llanura aluvial, terraza aluvial, abanico aluvial, cono de deyección-esparramiento y valles fluviales
Poligénico		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Depósitos detríticos</li> <li>- Arena-limoso</li> <li>- Limo-arcilloso</li> </ul>	Materiales de origen fluvial más derrubios depositados en pendientes bajas, compuestos por detritos aglomeráticos en una matriz arenosa, limosa o su combinación.	Coluvio-aluvial reciente/antiguo
Fluvio-Lacustre		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sedimento arcilloso</li> <li>- Sedimento arcillo-limoso</li> <li>- Sedimento arcillo-arenoso</li> </ul>	Depósitos mixtos de medios fluviales, lagunares y pantanosos, donde se produce estancamiento de agua favoreciendo al decantamiento de partículas finas.	Laguna colmatada, llanura fluvio-lacustre, depresión lagunar o pantanosa, zonas endorreicas, basin y otros.
Marino y Fluvio-Marino		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Arenas finas</li> <li>- Arenas limosas</li> <li>- Limos</li> </ul>	Materiales intermareales resultado de ambientes continentales y marinos, por la acción de corrientes fluviales y oleaje, predominando las arenas y limos.	Playa marina, marisma, estuario, salitral, planicie costera y más.
Volcánico		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flujo de lava</li> <li>- Ceniza compactada (cangagua)</li> <li>- Aglomerado, brecha y lahar</li> <li>- Flujos de lodos y escombros</li> </ul>	Depósitos volcánicos por caída y flujo de material de diferente tamaño y composición, los fragmentos piroclásticos son generalmente angulosos y subangulosos mal gradados con matrices lapilíticas con y sin finos intersticiales clastosoportada y soportada.	Flujos de lava, lodos, piroclastos, Avalancha de escombros y lahar antiguo/reciente
Glaciar, Periglaciar y Fluvioglaciar		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Depósitos de Till</li> <li>- Depósitos de bloques</li> </ul>	Depósitos poco consolidados de fragmentos mal consolidados y gran variedad de tamaños desde fragmentos milimétricos hasta bloques métricos con una matriz de grano fino.	Campos y ríos de bloques, morrenas (de fondo, lateral, frontal, de arco), fondos de valle glaciar y otros.
Eólico		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Arena y/o capas de arena</li> <li>- Arena limo-arcillosa</li> </ul>	Depósitos de arenas, limos y arcillas transportados y acumulados por la acción del viento, su acumulación es desde capas de pocos centímetros hasta metros.	Dunas, Loees, Barjones, Nebkhas y manto eólico.
Tecnogénesis		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suelos sin compactar</li> <li>- Escombros/basura</li> </ul>	Superficies intervenidas por el hombre con disposición de suelos sin tratamiento geotécnico.	Escombreras y/o rellenos de tierra y suelo.

**Figura 5.** Clasificación del TDS según genética y geoforma asociada.

**Tabla 3.** Propuesta de ponderación del tipo de depósito superficial PTDS.

Genética	Tipo de depósito	Ponderación	Descripción
Gravedad y movimientos en masa	Coluviales	4	Malo
	De detritos	5	Muy malo
	De derrubios	5	Muy malo
	De lodos y/o tierras	5	Muy malo
Fluvio-deposicional	Aluviales subactuales consolidados	2	Bueno
	Aluviales subactuales semiconsolidados	3	Medio
	Aluviales finos	4	Malo
Poligénico	Depósitos detríticos	4	Malo
	Areno-limoso	3	Medio
	Limo-arcilloso	3	Medio
Fluvio-lacustre	Sedimento arcilloso	4	Malo
	Sedimento limo-arcilloso	3	Medio
	Sedimento arcillo-arenoso	3	Medio
Marino y fluvio-marino	Arenas finas	4	Malo
	Arenas limosas	4	Malo
	Limos	4	Malo
Volcánico*	Flujo de lava	1	Muy bueno
	Ceniza compactada (cangagua)	2	Bueno
	Aglomerado, brecha y lahar	3	Medio
	Flujos de lodos y escombros	5	Muy malo
Glaciar, periglacial y fluvio-glaciar	Depósitos de Till	2	Bueno
	Depósitos de bloques	3	Medio
Eólico	Arena y/o capas de arenas	4	Malo
	Arena limo-arcillosa	4	Malo
Tecnogénesis	Suelo sin compactar	4	Malo
	Escombros basura	5	Muy malo

\*Para el caso de materiales piroclásticos y volcanoclasticos, al no considerarse como depósitos superficiales sino como unidades litoestratigráficas, necesariamente por su genética deposicional se ponderarán según esta tabla.

Consecuentemente, en la [Tabla 3](#) se puede observar la ponderación que se atribuye según los criterios indicados en la [Figura 5](#).

#### **Tipo de fábrica y textura (FT)**

**Fábrica/textura del tipo de roca (FTR):** el término fábrica, según [Strahler \(1992\)](#), hace referencia a la disposición espacial y geométrica de los componentes que constituyen la roca; por otro lado, [Pettijohn et al. \(1973\)](#) definen como fábrica al arreglo espacial de los elementos que conforman a una roca tanto a nivel

macroscópico como microscópico; estas propiedades físicas, según [González de Vallejo et al. \(2002a\)](#), influyen en el comportamiento geomecánico del material rocoso, puesto que controlan sus características resistentes y deformacionales, que resultan de la génesis, procesos geológicos y tectónicos.

En las [Tablas 4](#) y [5](#) se presenta la clasificación y ponderación de las rocas según la fábrica y/o textura (editado a partir de [INGEOMINAS, 2004](#)).

**Tabla 4.** Fábrica/textura del tipo de roca.

Fábrica/Textura	Características
Cristalina masiva	En rocas de cualquier origen (ígneo, metamórfico o sedimentario) cuyas partículas minerales están entrelazadas y con orientación aleatoria. Corresponde a las rocas más resistentes y menos deformables, salvo las rocas volcánicas cuya calidad es un poco dispersa según sean porosas o no lo sean. Ejemplos: granitos, basaltos, calizas, chert, cuarcitas, mármoles y más.
Cristalinas bandeadas	En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, conformando bandas composicionales con alguna influencia direccional. Ejemplo: Gneis.
Clásticas cementadas	En rocas con partículas cementadas, con resistencia y deformaciones variables, dependiendo de la calidad del material cementante, la relación matriz-clastos y el grado de empaquetamiento general que posea, se considera mayor resistencia aquellas rocas con una matriz o clasto soportadas. Ejemplos: areniscas, conglomerados, entre otros.
Clásticas consolidadas	En estas rocas se presenta comportamiento variable esfuerzo-deformación, con direccionalidad de sus propiedades mecánicas. La resistencia aumenta con el grado de consolidación diagenética. No se considera una matriz clasto soportada.
Cristalina foliada y rocas de falla	En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, con una orientación preferencial a lo largo de la cual las rocas son menos resistentes. Su calidad se dispersa como consecuencia de su fábrica orientada, es decir, por los planos de esquistosidad y foliación. Ejemplos: pizarras, filitas, esquistos, milonitas.

\*Esta tabla no incluye la textura de rocas volcano sedimentarias o piroclásticas; por su genética deposicional se ponderarán como un tipo de textura de depósito superficial explicado en el apartado siguiente.

**Tabla 5.** Ponderación de las rocas según su fábrica/textura PFTR

Fábrica/Textura	Ponderación propuesta	Descripción
Cristalina masiva	1	Muy bueno
Cristalinas bandeadas	2	Bueno
Clásticas cementadas	3	Medio
Clásticas consolidadas	4	Malo
Cristalina foliada y roca de falla	5	Muy malo

**Textura del tipo de depósito superficial (TTDS):** La textura de los depósitos superficiales permite inferir en procesos deposicionales el origen de los granos y/o clastos mediante la descripción de su forma, tamaño y disposición; [González de Vallejo et al. \(2002b\)](#), en cambio, los clasifican en función de sus relaciones geológico-geotécnicas y su genética, asocian mayor resistencia a texturas de matriz clasto soportada como depósitos aluviales subactuales consolidados o semiconsolidados; menor resistencia se asocia con una matriz soportada como depósitos coluviales poco o nada consolidados.

El esquema de la [Figura 6](#) estima la resistencia de los TDS a través del tipo de textura en función de la relación del tamaño, redondez y gradación del grano vs el grado de consolidación, es decir, a mayor gradación, redondez y tamaño del grano, mejor disposición y homogeneidad

del TDS, por lo que aumenta su consolidación y resistencia.

Por ejemplo, una textura clasto soportada presenta mejor distribución de esfuerzos efectivos a través de sus clastos, disipando de mejor manera la presión de poros; al contrario, una textura con matriz de finos tendrá una disipación de presión de poros lenta, generando mayor empuje activo o reactivo tanto en la cara de un talud como en cimentaciones superficiales. Así, texturas porosas indican mayor alterabilidad, baja densidad y resistencia al corte. La clasificación de tamaño y redondez del grano son las de [Wentworth \(1922\)](#) y [Powers \(1953\)](#).

En las [Tablas 6 y 7](#) se presenta la clasificación y ponderación de las texturas de los TDS.

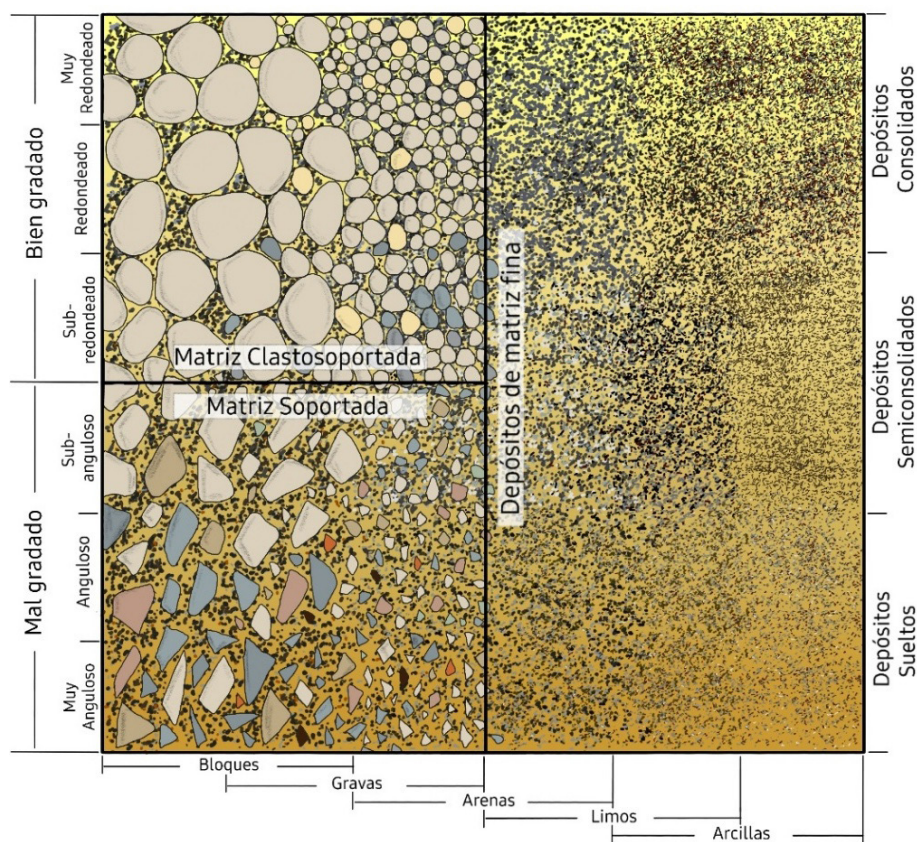


Figura 6. Resistencia de los TDS según tamaño, matriz, redondez, gradación y consolidación.

Tabla 6. Textura del tipo de depósito superficial.

Textura	Consolidación	Características
Matriz clasto soportada	Consolidado	Depósitos subactuales de cantos, gravas y transición de arenas medias y finas presentan mayor grado de redondez y gradación que indican un depósito maduro con mejor acomodo y homogeneidad del tamaño de clastos. Ejemplos: depósitos aluviales de cantos, gravas y conglomerados.
	Semiconsolidado	Depósitos subactuales de bloques, gravas y transición de arenas gruesas y medias presentan menor redondez y gradación. Ejemplos: depósitos piroclásticos, aglomerados volcánicos, de till y más. Se debe identificar y distinguir aquellos depósitos con texturas de alta porosidad que indican una baja densidad y resistencia.
Matriz soportada	Semiconsolidado	Depósitos actuales de bloques, gravas y transición de arenas gruesas y medias embebidos en una matriz de finos, sus clastos presentan menor grado de redondez y gradación que indican menor distribución y acomodo de clastos, que relativamente indican depósitos sueltos y/o menor consolidación. Ejemplos: depósitos coluviales, detríticos, coluvio-aluviales, otros.
	Suelos	
Matriz de finos	Consolidado	Depósitos de grano fino a medio, presentan una variedad de matriz arcillosa, limosa y arenosa o su combinación en menor y mayor porcentaje de finos y gruesos, su resistencia se puede asumir en términos de esfuerzos totales con mayor saturación y presión de poros, su consolidación se puede estimar según la genética de deposición. Ejemplos: depósitos aluviales finos, bancos de arena, sedimentos de textura variada, ceniza compactada, otros.
	Semiconsolidado	
	Suelos	

**Tabla 7.** Ponderación de la textura del tipo de depósito superficial PTTDS.

Textura	Grado de consolidación	Ponderación propuesta	Descripción
Matriz clasto soportada	Consolidado	1	Muy bueno
	Semiconsolidado	2	Bueno
Matriz soportada	Semiconsolidado	3	Medio
	Sueltos	4	Malo
Matriz de finos	Consolidado	2	Bueno
	Semiconsolidado	3	Medio
	Sueltos	5	Muy malo

**Grado de fracturación (GF)**

El GF analiza la influencia de la actividad cortical en los materiales rocosos superficiales, asumiendo que, a mayor cantidad de estructuras geológicas, mayor fracturación; en este sentido, [Trejos et al. \(2012\)](#) cuantifican la tasa de desplazamiento de fallas geológicas y la relacionan con el grado de fracturación. Para el caso de Ecuador, no es posible implementarlo, pues las tasas de desplazamiento de algunas fallas importantes son las propuestas por [Eguez et al. \(2003\)](#) a 1:1'250.000, escala demasiado pequeña para las recomendadas.

Por otro lado, es deseable incluir un análisis de actividad sismotectónica que permita entender de

mejor manera el GF, con la salvedad de que estos análisis por su naturaleza suelen representarse en escalas pequeñas, y combinarlas con escalas grandes (1:10.000, 25.000...) puede diluir el detalle de información, por lo que es fundamental un análisis de sismotectónica a similares escalas.

En consecuencia, el GF se limita a la utilización de la herramienta Line Density (ESRI, s.f.) expresando la densidad lineal en m/km<sup>2</sup>; el radio será igual a la media de la distancia entre lineaciones; el tamaño de celda se define según [Tobler \(1987\)](#), y se clasifica en cinco clases por el método Natural Breaks ([Tabla 8](#)). En la [Figura 7](#) se muestran casos demostrativos.

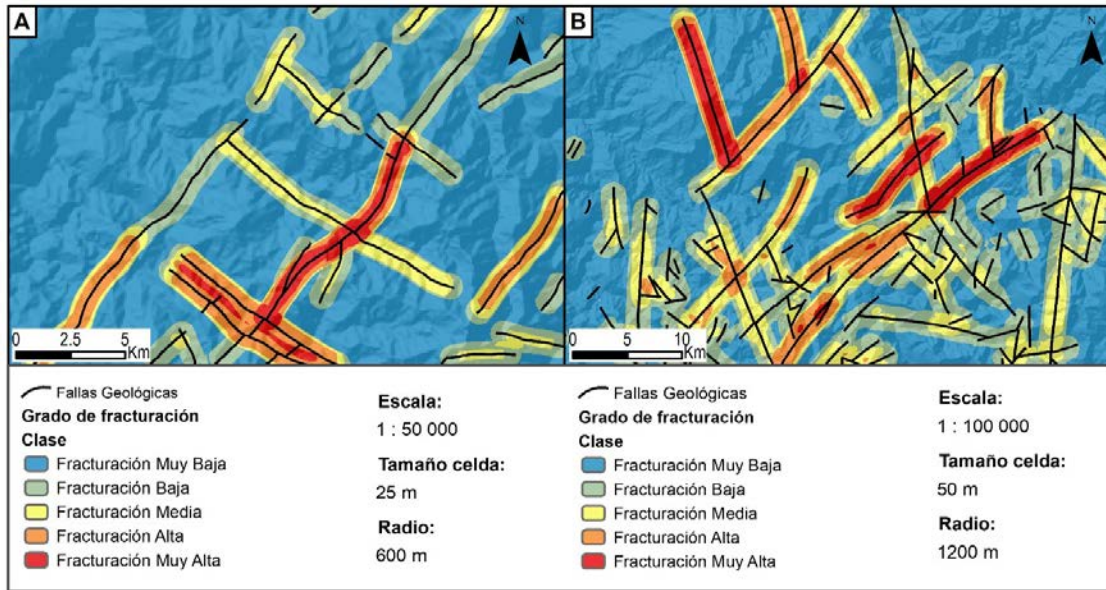
**Tabla 8.** Grado de fracturación y ponderación propuesta PGF.

Clase	Ponderación propuesta	Descripción
Fracturación muy baja	1	Muy bueno
Fracturación baja	2	Bueno
Fracturación media	3	Medio
Fracturación alta	4	Malo
Fracturación muy alta	5	Muy malo

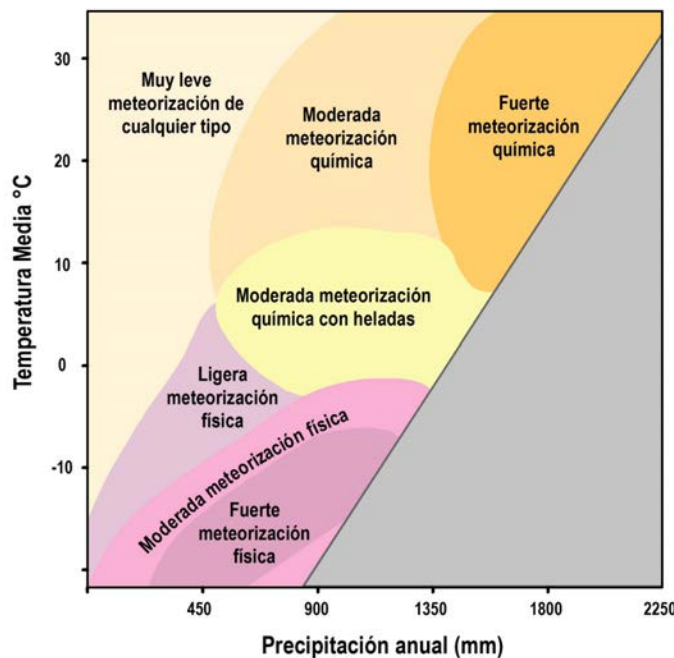
**Grado de meteorización (GM)**

La meteorización, según [Reiche \(1945\)](#), es la alteración de la roca en su origen natural en o cerca de la superficie por procesos físicos, químicos y biológicos que son modificados por el viento, el agua y el clima; estos procesos pueden parecer tan lentos y sutiles que es fácil subestimar su importancia ([Tarbuck y Lutgens, 2005](#)), y juegan un papel muy importante en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales rocosos ([González de Vallejo et al., 2002a](#)).

En cambio, [Peltier \(1950\)](#) sostiene que los factores influyentes en la meteorización química y física de las rocas están condicionados por la temperatura y precipitación, argumentan que, a mayor temperatura y precipitación, mayor meteorización química, y, al contrario, mayor meteorización física, para lo cual definió el diagrama de regiones morfogenéticas (ver [Figura 8](#)).



**Figura 7.** Grado de fracturación GF de fallas geológicas digitalizadas en **A.** Hoja geológica Jijón-Caamaño escala 1:50.000 IIGE (2014) y en **B.** Hoja geológica Maldonado escala 1:100.000 IIGE (2018).



**Figura 8.** Diagrama de meteorización según temperatura y precipitación (Peltier, 1950). Nótese la zona gris, aquellas regiones con valores de precipitación y temperatura muy altos, se consideran en una zona de fuerte meteorización química.

En ese sentido, para estimar el GM se combina la temperatura media (°C) y la precipitación anual (mm); se utilizarán las escalas indicadas en apartados anteriores, por ejemplo, para análisis a escalas pequeñas se tienen las variables climáticas de la WorldClim, resolución espacial de 1 km (Fick y Hijmans, 2017); para escalas mayores, en Ecuador se dispone de las zonas de temperatura media y zonas de precipitación anual escala 1:25.000 (IEE, 2013a, 2013b).

Cabe aclarar que el diagrama de Peltier permite estimar el grado de meteorización de los materiales rocosos, sin embargo, este no representa con exactitud condiciones de meteorización distintas de microclimas diferentes de los actuales o de la información disponible al momento del análisis; se deben tomar en cuenta aquellas condiciones especiales y relacionarlas con capas de geoinformación semejantes en detalle y escala. En la [Tabla 9](#) se puede observar la propuesta de ponderación para el GM.

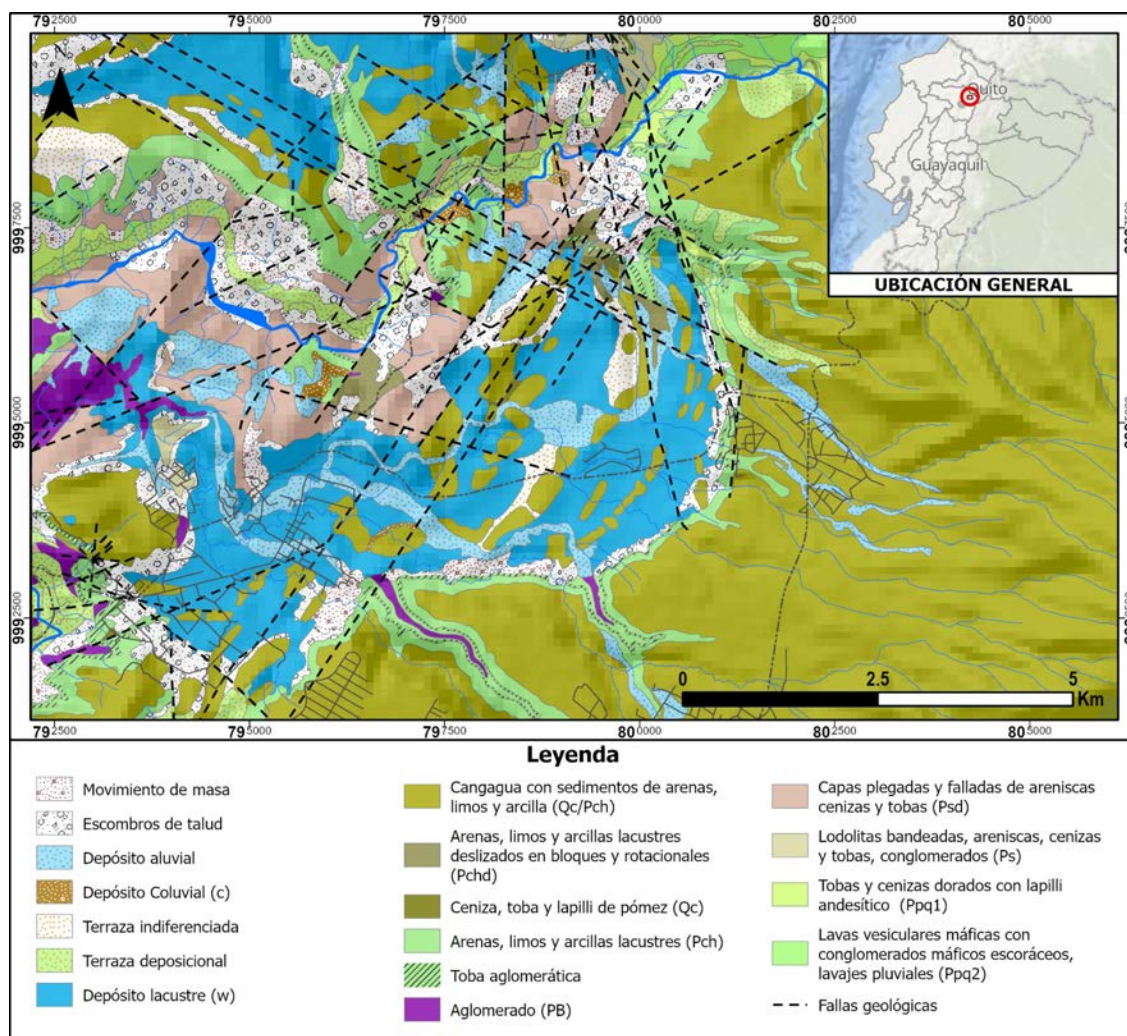
**Tabla 9.** Grado de meteorización y ponderación propuesta PGM.

Tipo de meteorización	Clase	Ponderación propuesta	Descripción
Cualquier tipo	Muy leve meteorización de cualquier tipo	1	Muy bueno
Química	Moderada meteorización química con heladas	3	Medio
	Moderada meteorización química	3	Medio
	Fuerte meteorización química	4	Malo
Física	Ligera meteorización física	2	Bueno
	Moderada meteorización física	3	Medio
	Fuerte meteorización física	5	Muy malo

**Resultados y discusión**

Para una aplicación demostrativa de la metodología propuesta, se ha considerado el cuadrángulo de la hoja geológica de Guayllabamba, escala 1:25.000

(IIGE, 1982), ubicada en las poblaciones de Guayllabamba, Otón, Ascázubi y caseríos menores, con alturas entre 1900 y 3200 m s. n. m. Los materiales rocosos que afloran son de edad cuaternaria y de genéticas principalmente deposicionales aluviales, volcánicas, de gravedad y otras más (Figura 9).

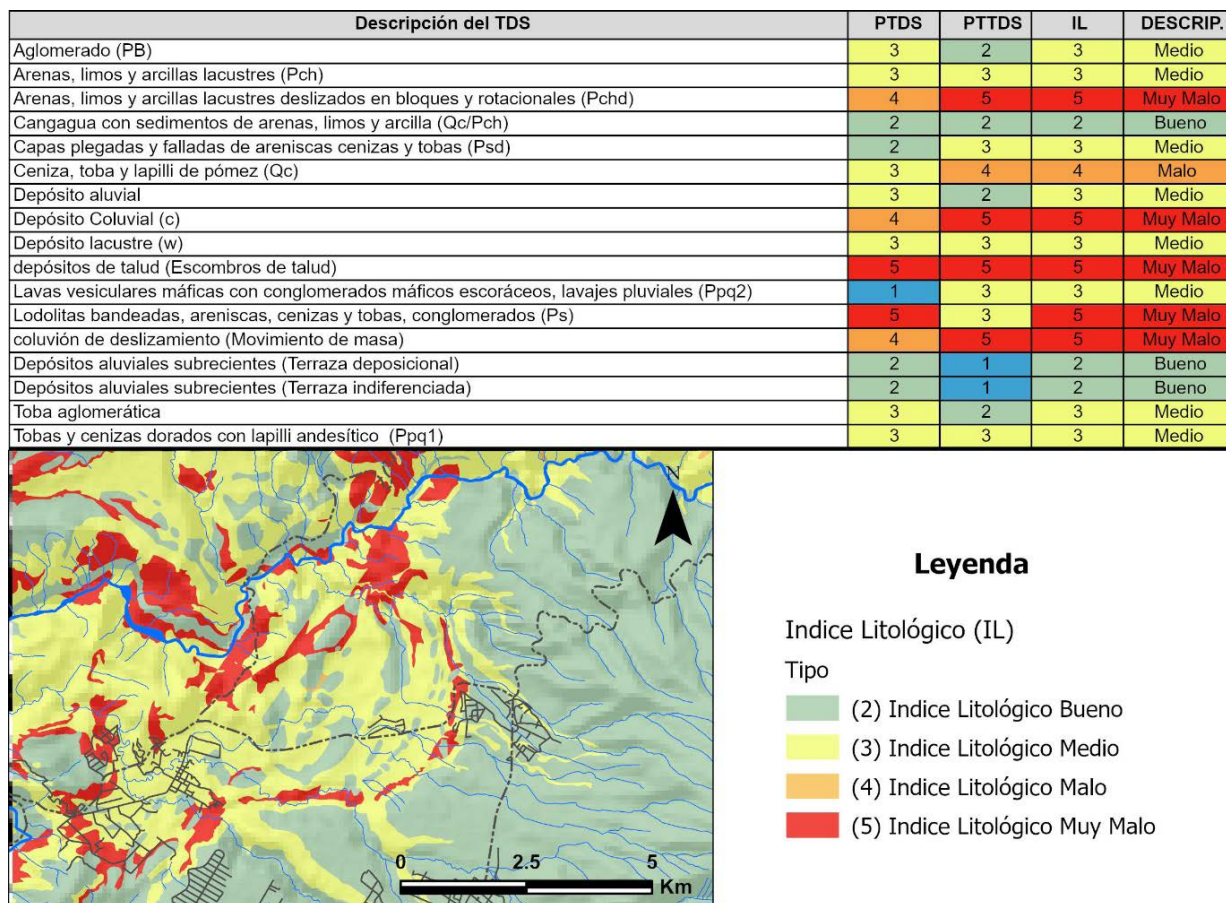


**Figura 9.** Geología del área de caso de estudio obtenida de la hoja geológica de Guayllabamba.

El índice litológico IL se obtuvo mediante matrices doble entrada, ponderando valores por tipos de depósitos superficiales PTDS y texturas de depósitos superficiales PTTDS. En la **Figura 10** se puede observar un IL de tipo malo a muy malo, que se asocia a litologías de tipo coluvial, movimiento de masa y algunos bloques

deslizados de texturas con matriz soportada sueltos y semiconsolidados.

Por la gran cantidad de polígonos y combinaciones de matrices, este y demás combinaciones, se realizaron con el *software* ArcGis Pro y la herramienta Field Calculator.



**Figura 10.** Determinación del índice litológico IL mediante la combinación de la ponderación del tipo de depósito superficial PTDS y ponderación de la textura del tipo de depósito superficial PTTDS del área de caso de estudio.

Estructuralmente, la zona de estudio se encuentra influenciada por zonas de horsts y grabens que han generado fallas rotacionales, tangenciales y verticales que han influenciado al grado de fracturación de los materiales rocosos de la zona.

de píxel de 12,5 m. En la **Figura 11** se aprecia un GF alto y muy alto en zonas donde la agrupación de estructuras geológicas es mayor, lo cual puede tener relación con la abundancia de estructuras inferidas que pueden sobreestimar el GF, razón por la cual debe considerarse disgregar este tipo de estructuras para identificar zonas en donde los materiales rocosos estén verdaderamente fracturados.

La estimación del grado de fracturación GF se dio con un radio de búsqueda de 300 m y un tamaño

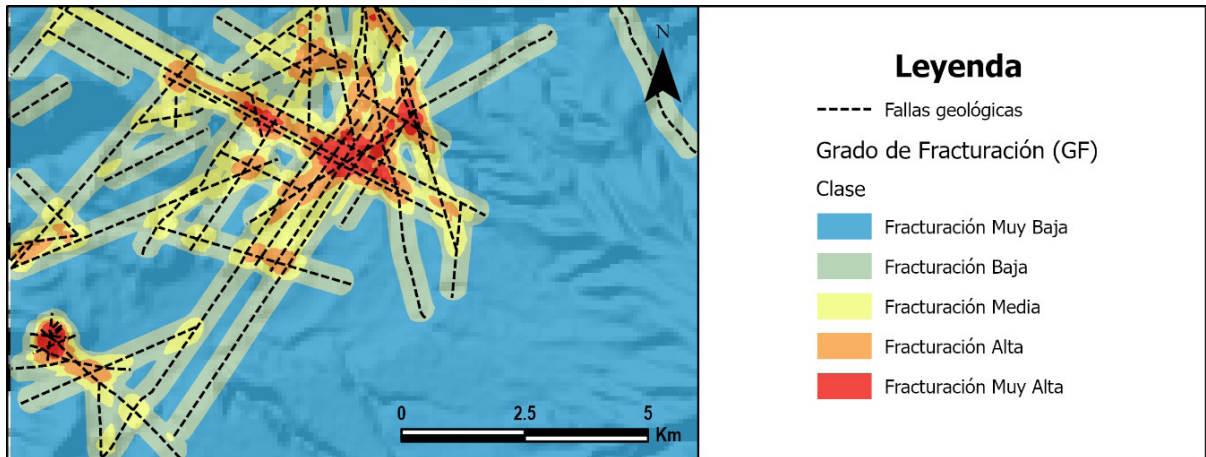


Figura 11. Grado de fracturación GF del área de caso de estudio.

Definido el GF se procede con la ponderación del grado de fracturación PGF, según las tablas antes indicadas y su combinación con el IL para obtener el índice de

fracturación IF. En la Figura 12 se puede apreciar esta combinación y los tipos de IF resultantes.

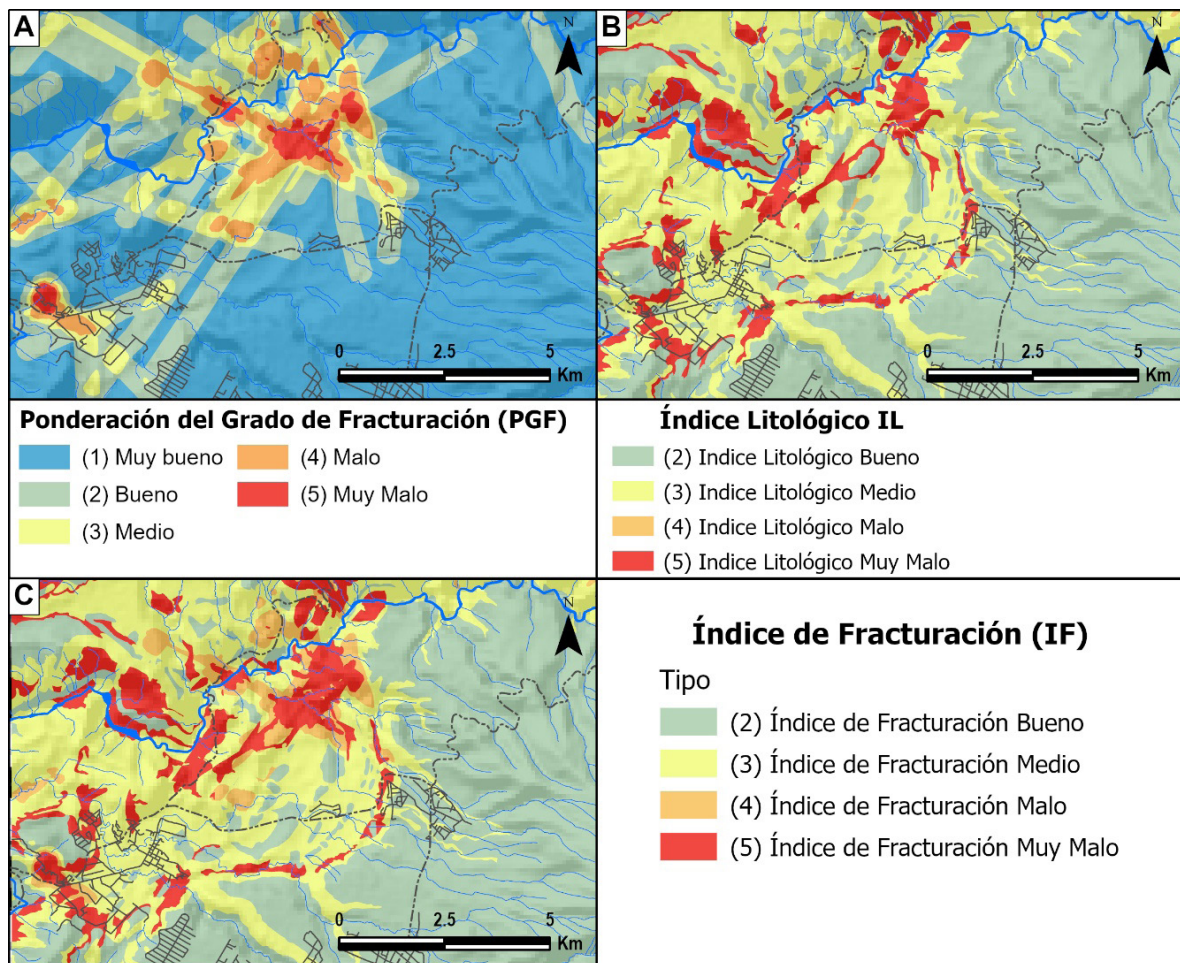


Figura 12. Combinación de A. ponderación del grado de fracturación PGF y B. índice litológico IL para obtener C. índice de fracturación IF.

La combinación resultante entre la PGF y el IL refleja valores altos en el IF (tipo 4 en color naranja) que resulta de la combinación de un PGF malo (4) con un IL medio (3 en color amarillo) donde se mantiene el valor más alto (4); el resto de las combinaciones (2, 3 y 5) se mantiene por combinarse entre valores iguales, por lo que no domina un valor alto.

Resulta claro que la combinación entre valores altos y bajos conservará el valor más alto, por ejemplo, entre una PGF muy bueno (1) y un IL bueno (2), se

mantendrá este último, por tal razón la PGF muy bueno (en color azul) tiende a desaparecer en esta combinación.

Ahora, el grado de meteorización GM resulta al relacionar la temperatura media anual versus precipitación anual, utilizando el diagrama de Peltier con precipitaciones que varían de 400 a 800 mm/año y temperaturas de 10 °C a 18 °C, ubicando la zona de estudio en moderada meteorización química y muy leve meteorización de cualquier tipo (Figura 13).

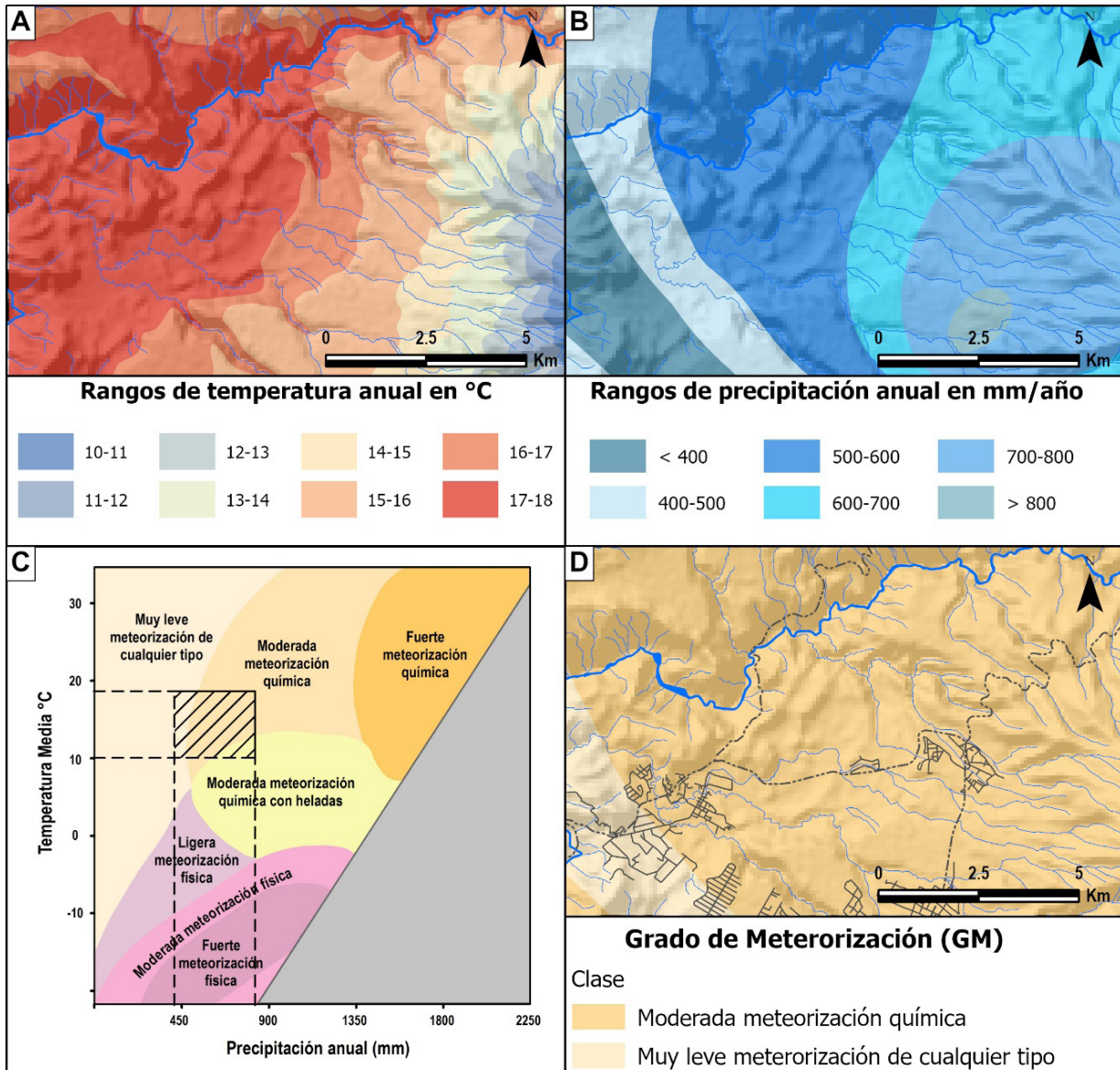
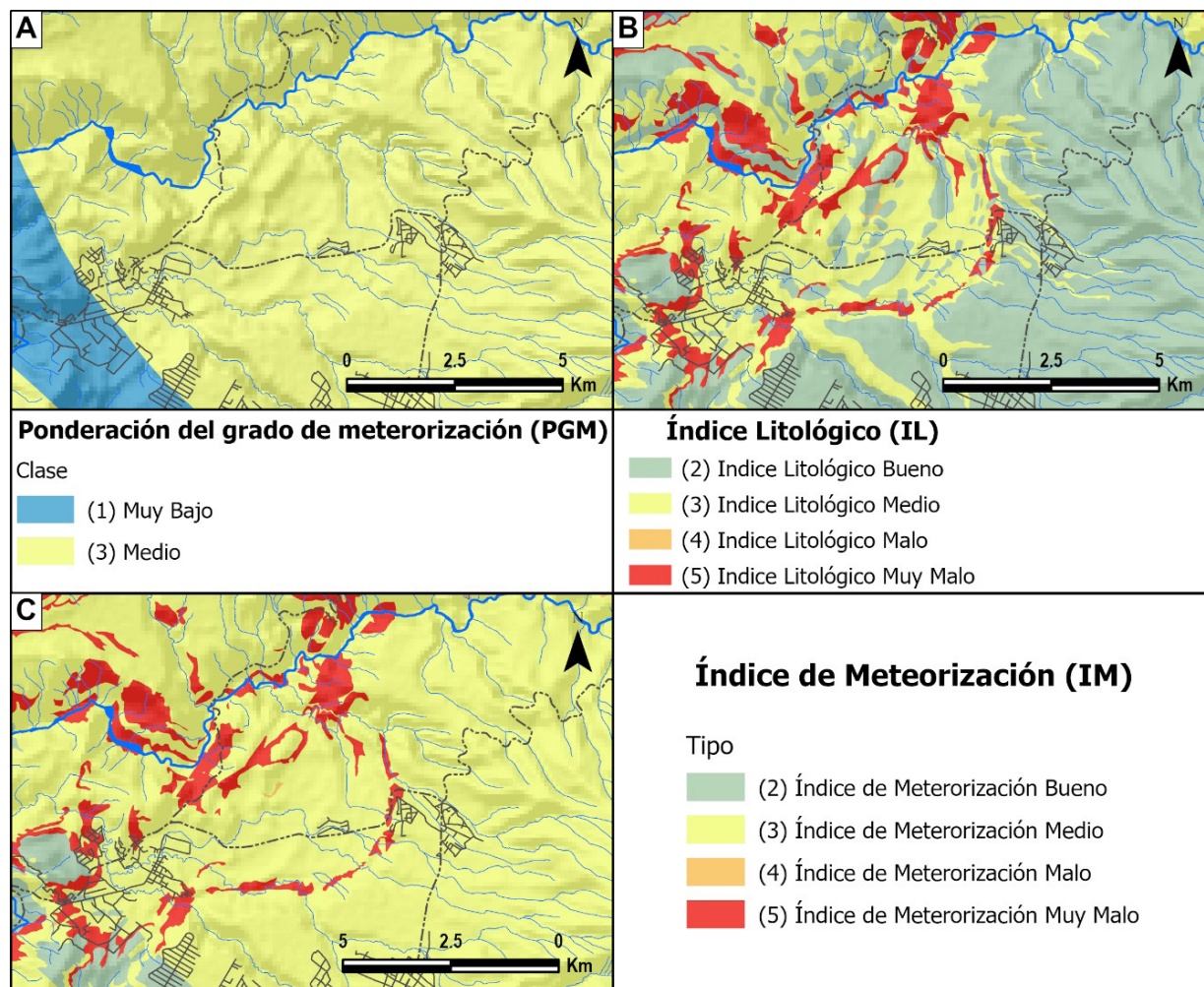


Figura 13. Combinación de A. rangos de temperatura escala 1:25.000 y B. rangos de precipitación escala 1:25.000 mediante la utilización de C. diagrama de Peltier para obtener D. grado de meteorización GM.

En la **Figura 14** se aprecia el índice de meteorización IM resultante de la combinación entre la ponderación del grado de meteorización PGM y el índice litológico IL; esta muestra un IM medio (color amarillo) en su mayoría, y una pequeña parte de la zona con un IM bueno (color verde). Este resultado es consecuencia

de combinar valores altos como una PGM medio (3) y un IL bueno (2), donde predomina el valor más alto; de igual manera ocurre con la PGM muy bueno (1) y el IL bueno (2), los IL 4 y 5 se mantienen en el resultado.



**Figura 14.** Combinación de A. ponderación del grado de meteorización PGM y B. índice litológico IL para obtener C. índice de meteorización IM.

El IM y el IF obtenidos anteriormente se combinan para obtener el factor geológico (FG) como se aprecia en la **Figura 15**; en esta se observa que gran parte del IF bueno (2) tiende a desaparecer, lo cual, como se ha explicado anteriormente es consecuencia

de la combinación de valores altos con valores bajos. Lógicamente al combinar zonas de IF altos (3, 4 y 5) y zonas de IM medio (3), estos se reflejan en el resultado final, pues los valores iguales se mantienen y los valores altos se sobrepone en el FG.

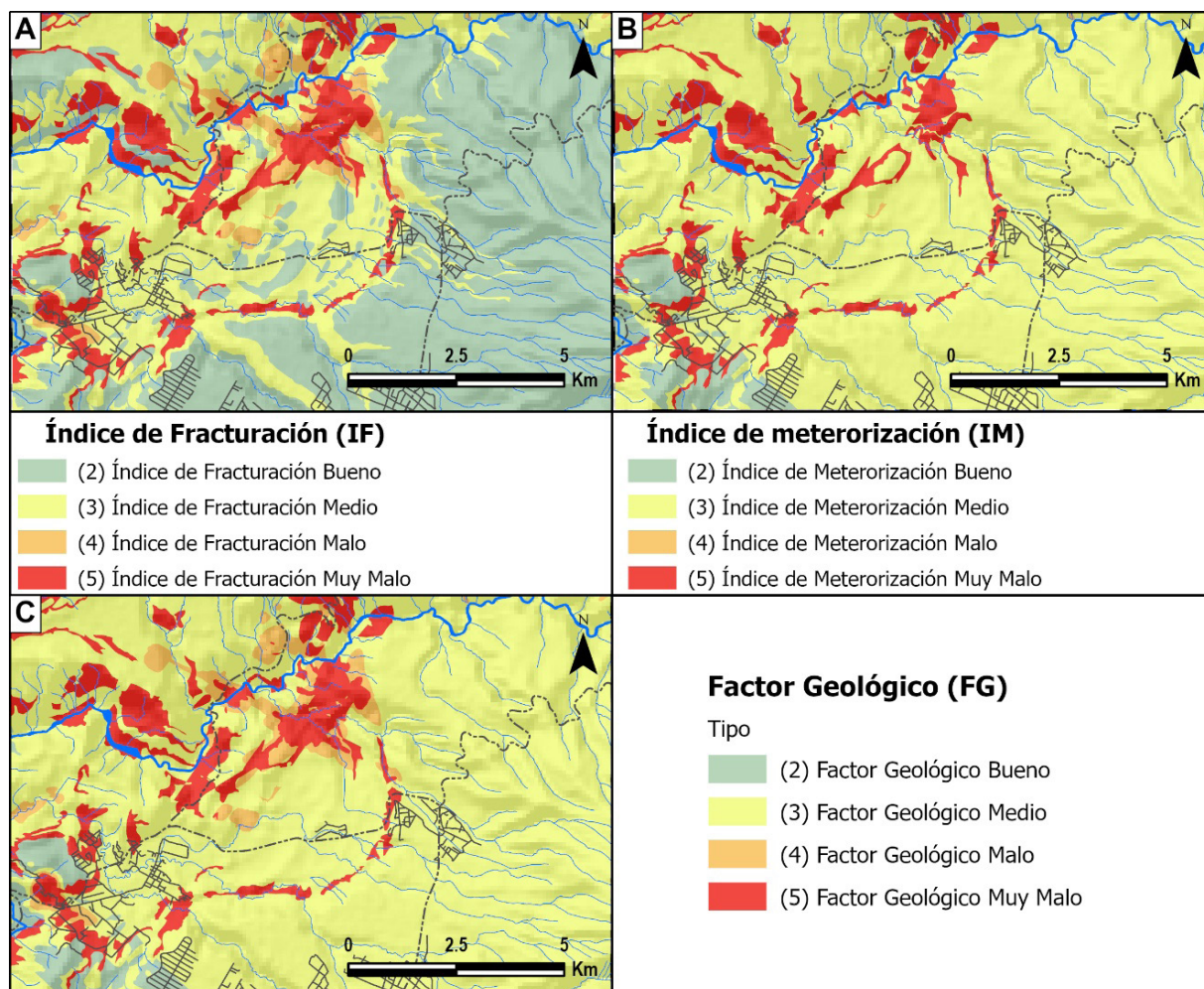


Figura 15. Combinación de A. índice de fracturación IF y B. índice de meteorización IM para obtener C. factor geológico FG.

## Conclusiones

Los resultados son concordantes con los tipos de depósito superficial TDS del área en estudio; estos reflejan un índice litológico IL medio, malo y muy malo, asociados a materiales de genética deposicional con texturas soportadas y finas medianamente consolidados y sueltos como depósitos coluviales, arenas y otros.

Los IL coinciden con zonas de grado de fracturación GF alto y muy alto, relacionado con zonas de mayor densidad de estructuras geológicas, y que coinciden con geformas como movimientos de masa, bloques colapsados, escombros de talud y otros más.

La combinación de capas de geoinformación de precipitación y temperatura para estimar el grado de meteorización GM es determinante en este caso, debido particularmente a la extensión del área de estudio y a la

forma como se suelen presentar dichas capas, que a pesar de poseer una escala a 1:25.000 tienden a generalizar grandes zonas con un solo tipo de ponderación o valor (bueno y medio), lo cual en zonas de estudio más extensas no sucedería; aunque aquello no indica un mal resultado, puede afectar la estimación de índices consecuentes.

La objetividad de criterios con que se analiza cada componente en esta metodología permite reducir el grado de incertidumbre en los resultados finales, sin embargo, no pierde subjetividad por la variedad de criterios que cada profesional puede tener en su área de conocimiento.

La valoración resultante en esta investigación corresponde solamente a la variable geología, y esta no indica si una zona es susceptible a riesgo, erosión y más, pero sí indica que una zona es distinta de otra en términos

geológicos; la calidad y objetividad de resultados según el estudio que se realice dependerá de la combinación de esta y otras variables con una metodología adecuada.

### Agradecimientos

Se agradece al Instituto Geográfico Militar del Ecuador por la oportunidad de participar en el proyecto “Determinación de la capacidad de acogida del territorio con fines de desarrollo urbano mediante la generación de geoinformación temática a escala 1:5.000”, que motivó el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se reconoce el valioso aporte de los evaluadores, cuyas observaciones contribuyeron significativamente al fortalecimiento del manuscrito.

### Referencias

- Aspden, J.A.; Litherland, M. (1992). The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, 205(1-3), 187-204. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90426-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90426-7)
- ASTM D5873-05. Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2005. <https://doi.org/10.1520/D5873-05>
- Barton, N.; Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10(1-2), 1-54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
- Carmona-Sánchez, M.L. (2018). Las matrices o tablas de doble entrada: Una aplicación práctica en las investigaciones de diseño. En: *De los métodos y las maneras* (pp. 107-112). Universidad Autónoma Metropolitana.
- Celemín, J.P. (2010). Contribución metodológica a la ponderación de variables: Aplicación desde una perspectiva geográfica. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(1), 45-58.
- CISE. (2019). Nota técnica Nro. 4 ¿Cómo se hace un cuadro de doble entrada? Centro de Investigaciones y Servicios Educativos.
- Commission on Engineering Geological Maps of the International Association of Engineering Geology. (1976). *Engineering geological maps-A guide to their preparation*. The Unesco Press.
- Eguez, A.; Alvarado, A.; Yepes, H.; Machette, M.; Costa, C.; Dart, R.; Bradley, L.A. (2003). Database and Map of Quaternary Faults and Folds in Ecuador and its Offshore Region. U.S. Geological Survey.
- ESRI. (s.f.). ArcGis Desktop. Cómo funciona la densidad de líneas. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/3.3/tool-reference/spatial-analyst/how-line-density-works.htm>
- Fick, S.E.; Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- González de Vallejo, L.I.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. (2002a). Mecánica de Rocas. En: I. Capella (ed.). *Ingeniería geológica* (pp. 118-230). Pearson Educación.
- González de Vallejo, L.I.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. (2002b). Mecánica de Suelos. En: I. Capella (ed.). *Ingeniería geológica* (pp. 18-114). Pearson Educación.
- Hoek, E.; Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- IEE. (2013a). Mapa temático de las zonas de precipitación anual (Serie 1985-2009). En Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a nivel Nacional. Instituto Espacial Ecuatoriano.
- IEE. (2013b). Mapa temático de las zonas de temperatura media anual expresada en °C (Serie 1985-2009). En Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a nivel Nacional. Instituto Espacial Ecuatoriano.
- IIGE. (1982). Hoja geológica Guayllabamba escala 1: 25 000. Instituto de Investigación Geológico y Energético.
- IIGE. (2014). Hoja geológica Jijón y Caamaño escala 1: 50 000. Instituto de Investigación Geológico y Energético.
- IIGE. (2018). Hoja geológica Maldonado escala 1: 100 000. Instituto de Investigación Geológico y Energético.

- IIGE. (2019). Estándares de Nomenclatura Estratigráfica, Simbolización y Abreviaturas para la Cartografía Geológica. Versión 2.0. Edición Especial No. 163; Versión 2. Instituto de Investigación Geológico y Energético.
- INGEOMINAS. (2004). Compilación y levantamiento de la información geomecánica. Instituto Colombiano de Geología y Minería.
- ISRM. (1978). Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 15(3), 89-97. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90002-5)
- Marcano, A.; Cartaya, S.; Pacheco, H.; Méndez, W. (2015). Estimación de pesos ponderados de variables para generar mapas de susceptibilidad a movimientos en masa a través de la Evaluación Espacial Multicriterios. *Terra. Nueva Etapa*, 31(50), 55-80.
- McMillan, A.A.; Powell, J.H.; Evans, C.D.R.; Irving, A.A.M.; Merritt, J.W.; Morigi, A.N., Northmore, K.J. (1999). BGS rock classification scheme. Volume 4, classification of artificial (man-made) ground and natural superficial deposits applications to geological maps and datasets in the UK (No. RR 99-04). British Geological Survey.
- Mora, S.; Vahrson, W.G. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 31(1), 49-58. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.xxxi.1.49>
- Peltier, L.C. (1950). The geographic cycle in periglacial regions as it is related to climatic geomorphology. *Annals of the Association of American Geographers*, 40(3), 214-236. <https://doi.org/10.1080/00045605009352070>
- Pettijohn, F.J.; Potter, P.E.; Siever, R. (1973). Sand and sandstone. *Limnology and Oceanography*, 18(1), 182-183. <https://doi.org/10.4319/lo.1973.18.1.0182>
- Powers, M.C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 23(2), 117-119. <https://doi.org/10.1306/D4269567-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Reiche, P. (1945). A survey of weathering processes and products. *Geological Magazine*, 83(2), 101-102. <https://doi.org/10.1017/S001675680008290X>
- SGC. (2013). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa Esc. 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano.
- Strahler, A.N. (1992). Rocas ígneas y actividad ígnea. En: *Geología Física* (pp. 67-93). Ediciones Omega.
- Tarback, E.J.; Lutgens, F.K. (2005). *Ciencias de la tierra: Una introducción a la geología física*. Vol. 8. Ed. Pearson Educación.
- Tobler, W. (1987). Measuring spatial resolution. *Land Resources Information Systems Conference*. Beijing.
- Trejos, G.; Ruiz, G.; Medina, E.; Sandoval, J. (2012). Guía metodológica para la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa, escala 1:100.000. *IV Simposio Panamericano de Deslizamientos, Vulnerabilidad y Gestión del Riesgo en la Región Tropical de Centro y Suramérica*. Paipa, Colombia. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18425.47203>
- Wallenius, J.; Dyer, J.S.; Fishburn, P.C.; Steuer, R.E.; Zionts, S.; Deb, K. (2008). Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: Recent accomplishments and what lies ahead. *Management Science*, 54(7), 1336-1349. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1070.0838>
- Wentworth, C.K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377-392.

---

---

Fecha de recibido: 14 de noviembre de 2022

Fecha de aceptado: 06 de agosto de 2025

---

---