

1. GEOAMBIENTE

*“Cada detalle en la naturaleza, una hoja, una gota, un cristal, un momento en el tiempo, está relacionado al conjunto, y forma parte de la perfección del todo”
Emerson, R., (s. f.).*

Análisis con sensores remotos y control de campo en el área de la cuenca alta del Río Nevado, con el propósito de caracterizar dinámicas y procesos geomorfológicos y antrópicos.



Laguna La Pintada, microcuenca del río Lagunillas, al fondo aguja glaciaria

INTRODUCCIÓN

La comprensión de la evolución de los paisajes, desde las fuerzas geológicas que permitieron la depositación de sedimentos y su posterior plegamiento, los factores asociados a la geodinámica externa que con los cambios climatológicos durante el cuaternario permitieron el desarrollo de glaciares y las formas heredadas de su erosión y con ellos la colonización de la vegetación adaptada a estas condiciones.

El componente geo-ambiental, presenta la compilación geológica, su densificación y articulación con la geomorfología, interpretada en escala 1/25.000, con algunos aspectos glaciológicos relacionados con el retroceso, evaluado a partir de imágenes de sensores remotos desde el año 1985 hasta el año 2018. Este componente evalúa de manera preliminar la susceptibilidad al desarrollo de fenómenos de remoción en masa a partir de la metodología desarrollada por el Servicio Geológico Colombiano SGC. Así mismo, la pérdida de suelo para establecer la correspondencia entre actividades antrópicas de las zonas más bajas comparada con la pérdida de suelo del área protegida. Para evaluar estas pérdidas se sigue el modelo propuesto en la ecuación establecida por Wischmeyer y Smith (1978).

Durante el cuaternario a nivel planetario, se dieron los periodos glaciares que modificaron la morfología de la alta montaña y cuyas consecuencias ambientales son de amplia significancia. El presente documento describe de forma más detallada la distribución de geoformas, los elementos litológicos subyacentes, la importancia de la estructura geológica y su impacto en la actual evolución de paisajes.

El enfoque utilizado para la investigación son las microcuencas, de modo que todo sea conducente a la generación de Unidades Diagnósticas de Planificación Ambiental (UPA) que establecen la síntesis de las presiones antrópicas y naturales en el área de estudio.

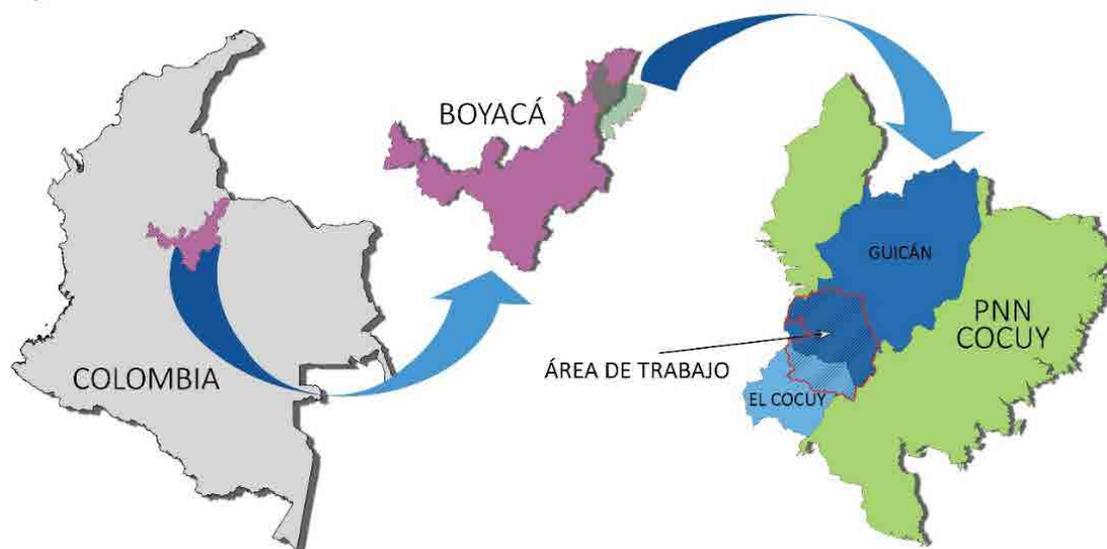
Comprender la evolución geomorfológica y los condicionantes litológicos subyacentes permite entender la dinámica de paisajes y ecosistemas presentes, ofrece un panorama inicial para establecer las relaciones geoquímicas con algunos aspectos relacionados con la calidad de las aguas que nacen en la cuenca alta del Río Nevado.

El área de estudio corresponde a la zona más alta de la cordillera oriental, incluyendo el pico más alto (Ritacuba Blanco, 5.410 msnm), con una evolución que inicia aproximadamente 3,5 a 3,0 millones de años (Plioceno superior) cuando empezó su levantamiento, que aún continua.

1.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza al NE del departamento de Boyacá (Figura 1.1)

corresponde a la cuenca alta del Río Nevado conformado por siete (7) microcuencas y las áreas intercuenca que drenan directamente al Río Nevado.



| SÍMBOLO | ÁREA TOTAL (Ha) | SUPERFICIE DENTRO DEL ÁREA DE TRABAJO (Ha) | % |
|--|-----------------|--|--------|
|  ÁREA DE TRABAJO | 29.075,470 Ha | 29.075,470 Ha | 100% |
|  MUNICIPIO EL COCUY | 23.834,46 Ha | 8.105,17 Ha | 27,87% |
|  MUNICIPIO GÜICÁN | 95.221,78 Ha | 20.970,29 Ha | 72,13% |

Figura 1.1 Localización del área de trabajo

La cuenca alta del Río Nevado tiene por límite inferior la cota 3.000 msnm y la conforman exclusivamente los municipios Güicán y Cocuy. Equivale aproximadamente al 9,43% del PNN El Cocuy, aunque el extremo occidental se encuentre fuera del área.

1.1.1 Distribución de áreas de drenaje

El área de trabajo corresponde a la cuenca alta del río Nevado, delimitada en su parte más baja por la cota 3.000, de tal manera

que hacia la parte alta (noreste) los procesos glaciares operaron en apogeo durante la última glaciación, lo que Flórez (1997), considera la alta montaña, y donde la herencia morfoclimática es constitutiva (durante la última glaciación el borde inferior de los glaciares estaba alrededor de los 3000 ± 100 m). Se definieron 7 microcuencas y las áreas de drenajes directas al Río Nevado, la siguiente ilustración muestra la subdivisión realizada de la cuenca alta del Río Nevado. (Figura 1.2)

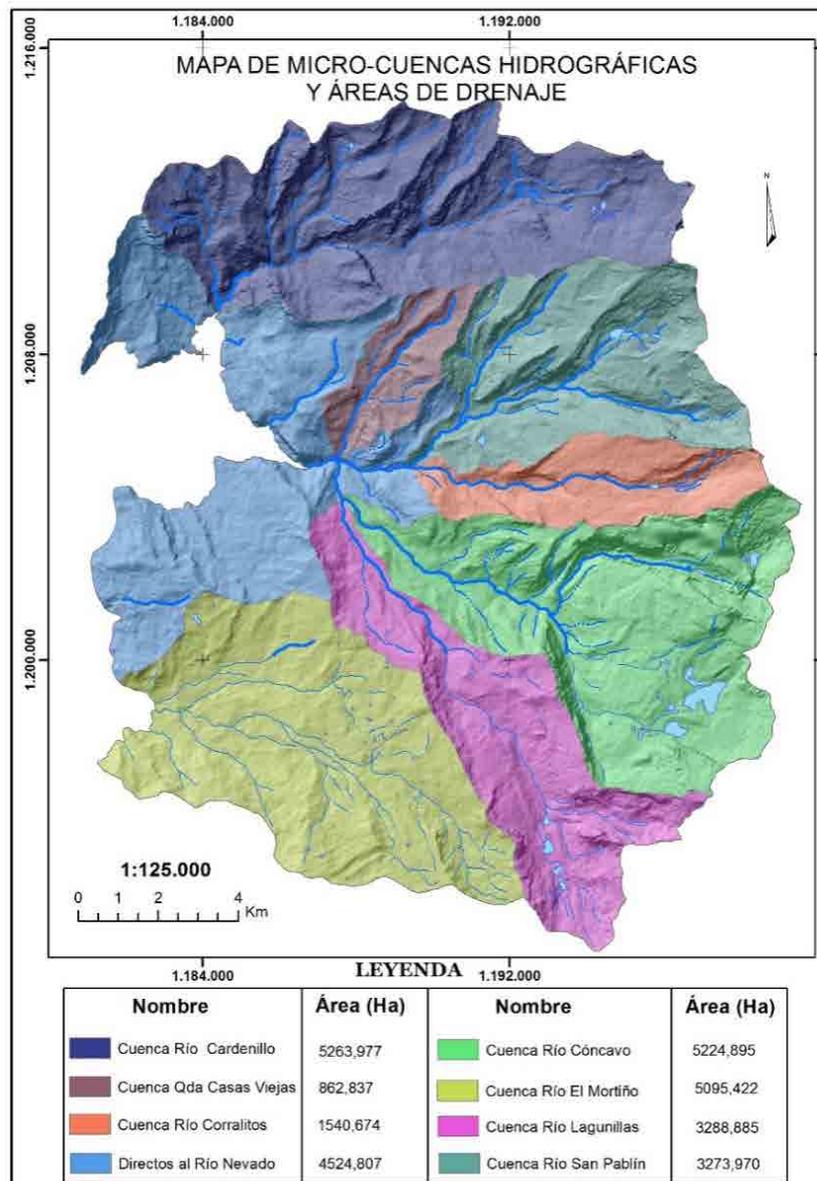


Figura 1.2 Subdivisión de microcuencas

1.2 GEOLOGÍA

La zona de estudio que hace parte de la Sierra Nevada del Cocuy, cuenta con un área aproximada de 290 Km² en la cual se distinguen Formaciones Geológicas Sedimentarias del Cretácico y el Terciario, además de una serie de depósitos Cuaternarios relacionados a la

actividad glaciaria en la Sierra. A continuación, se realiza una breve descripción para cada unidad, adaptadas de la memoria geológica de las planchas 137 y 153 del Servicio Geológico Colombiano, SGC¹. El mapa fue objeto de densificación y refinamiento a partir del modelo de sombras ALOS PALSAR de 12,5 m y un breve control de campo, el producto se expone en la Figura 1.3.

¹ INGEOMINAS (1981). Geología regional de la Sierra Nevada del Cocuy plancha 137, “El Cocuy”.

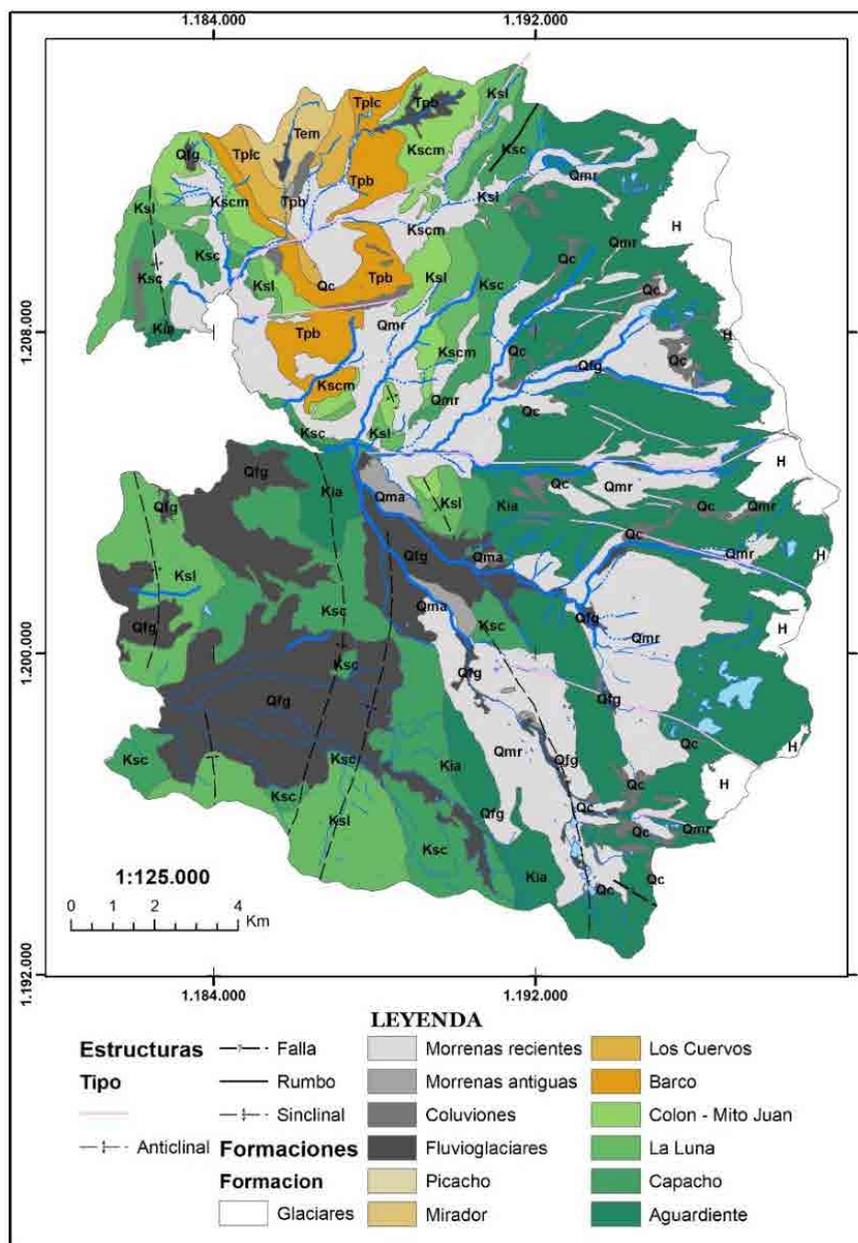


Figura 1.3 Mapa geológico del área de estudio

La cuenca presenta un predominio de formaciones cretáceas principalmente las formaciones Aguardiente, responsable de las laderas estructurales cubiertas de nieve, y un poco más abajo las formas suavizadas de la formación Capacho. Solamente al norte de la zona de estudio, en la microcuenca del Río Cardenillo aparecen algunas formaciones terciarias que generan prominentes escarpes en las areniscas de la formación Barco. A continuación se describe brevemente la estratigrafía de la zona.

1.2.1 Estratigrafía

Formación Aguardiente (Kia)

Esta Formación Geológica definida por Notestein en 1944, se extiende principalmente al nororiente de Colombia, es descrita por Fabre en 1981, como intercalaciones de areniscas calcáreas, glauconíticas con estructuras entrelazadas, y delgadas capas de shales negros carbonosos y micáceos. Subyace en contacto concordante a la Formación Capacho. Edad: Albiano medio - Albiano superior.



Adaptado de Fabre, A. 1981.

Figura 1.4 Columna estratigráfica de la formación Aguardiente

En el área de la Sierra Nevada del Cocuy, la Formación Aguardiente aflora al occidente y en ella se dan expresiones morfológicas sobresalientes como los picos más altos de la Sierra. Es separada por Fabre (1981), en tres miembros: uno Inferior con 30 metros de espesor y constituido por areniscas cuarcíticas, de grano medio a microconglomerático, con estructuras entrecruzadas planas e intercaladas con delgadas capas de lutitas carbonosas y micáceas; un miembro medio o principal con 1.180 metros de espesor constituido por areniscas cuarcíticas, de grano medio a grueso,

intercaladas con lodolitas negras micáceas y areniscas finas oscuras, generalmente en este miembro la granulometría es más gruesa en su parte inferior y los bancos son más espesos; y un miembro superior con espesor de 40 metros, donde la Formación está constituida por niveles más blandos de arenisca de grano fino a medio con delgadas intercalaciones de lutitas limosas oscuras, y presencia de bioturbación (Figura 1.4). Se sugiere para esta Formación, un ambiente costero de depositación, con subambientes litorales y depósitos finos de lagunas costeras. En el área de estudio dicha

Formación aflora al este y ocupa un área de 76,64 Km².

Formación Capacho (Ksc)

Esta Formación Geológica definida por Sutton en 1946 y Rod and Maync en 1954, como intercalaciones de shales negros y calizas fosilíferas, que suprayacen en contacto concordante a las rocas de la Formación Aguardiente, y subyacen de aquellas que constituyen la Formación La Luna. Edad: Albiano superior o Cenomaniano.

Para el área de la Sierra Nevada del Cocuy, esta Formación aflora al occidente de la parte alta de la Sierra y presenta morfologías más suaves en contraste con aquellas de la Formación Aguardiente. Fabre (1981), la separa en tres miembros: un miembro designado como H1 con 203 metros de espesor, está constituido por lutitas lodosas negras e intercalaciones delgadas de areniscas finas, cuarcíticas oscuras, con estructuras entrecruzadas, y algunos estratos delgados de calizas arenosas. La bioturbación es muy intensa; al miembro H2 con 114 metros de espesor lo caracteriza una alternancia de bancos de calizas arenosas, bancos de lodolitas negras y areniscas cuarcíticas de grano fino a medio.

El espesor de los bancos de caliza bastante fosilífera, varía a lo largo del área de la Sierra, desde los 40 metros hasta presentarse como reducidos lentes de corta extensión y nódulos; y el miembro Superior con 232 metros de espesor, está constituido principalmente por lutitas limosas y arcillosas oscuras o negras, y algunas intercalaciones de conjuntos arenosos. Se definen otras características comparativas entre los tres miembros, como por ejemplo la morfología más pronunciada en el miembro H2. Los sedimentos de esta Formación, se depositaron en un ambiente marino tranquilo. En el área de estudio dicha Formación aflora al centro y noroeste, ocupando un área de 32,88 Km².

Formación La Luna (Ksl)

Esta Formación Geológica que suprayace a la Formación Capacho, fue definida en Colombia por Notestein en 1944, como bancos delgados de calizas oscuras laminadas con foraminíferos y shales calcáreos negros. Presenta concreciones de caliza de gran tamaño y nódulos de chert negro. Edad: Coniaciano.

Formación Colón-Mito Juan (Kscm)

Esta Formación Geológica ha sido definida por varios autores y en ella se han incluido algunas formaciones, (Vargas et al., 1970) en la leyenda del mapa geológico del cuadrángulo, la divide en tres partes: una inferior de arcillas laminadas negras, areniscas de grano fino, calizas y areniscas glauconíticas; una intermedia con areniscas de grano fino a medio con intercalaciones de arcillas negras laminadas; y la parte superior con arcilla negras, areniscas de grano fino y algunas capas de carbón. Edad: Santoniano.

Para el área de la Sierra Nevada del Cocuy, esta Formación que suprayace a la Formación La Luna y subyace a las areniscas de la Formación Barco en contacto concordante y transicional. Formación Barco (Tpb).

Esta Formación Geológica fue descrita por Notestein en 1944, como areniscas arcillosas de grano fino a medio, con estratificación cruzada, algunas con sobrecrecimientos que contienen arcillas. Entre los bancos de areniscas existen intercalaciones de lutitas limosas y arcillosas, y localmente en la parte superior delgados bancos de carbón. Edad: Paleoceno Inferior.

Para el área de la Sierra Nevada del Cocuy, esta Formación con 294 metros de espesor y una morfología con escarpes bien marcados, está constituida principalmente por bancos de areniscas cuarcíticas, de grano medio a grueso, y delgadas intercalaciones de areniscas finas y lodolitas oscuras. Su contacto inferior con la Formación Colón-Mito Juan es concordante y el contacto superior con la Formación Los Cuervos es concordante y transicional. Un

ambiente de depositación litoral o deltáico subcontinental es propuesta por Fabre en 1981 para esta Formación. En el área de estudio dicha Formación aflora al noroeste y ocupa un área de 10,45 Km².

1.2.1.1 Formación Los Cuervos (T_{plc})

Definida por Notestein en 1944 como secuencias monótonas de arcillolitas y lutitas con algunas intercalaciones de areniscas micáceas y estratos de carbón. Edad: Paleoceno- Eoceno Inferior.

Para el área de la Sierra Nevada del Cocuy, Fabre (1981), describe una columna de 495 metros de espesor correspondiente a la Formación Los Cuervos, y en la cual se presentan capas de hasta 10 metros de espesor de lutitas lodosas negras, a veces carbonosas, separadas por conjuntos arenosos color gris oscuro a gris verdoso, grano fino a medio y estratificación cruzadas. En la parte inferior de la Formación, se presentan esporádicos niveles de carbón de hasta 90 cm de espesor y en ciertos bancos existen zonas extensas, lentes y nódulos de areniscas calcáreas que resaltan muy bien. El contacto inferior con la Formación Barco es concordante y transicional, mientras el contacto superior es concordante, bien marcado y nítido por la aparición de las rocas que constituyen la Formación Mirador que la suprayace. El mismo autor propone un ambiente de depositación deltáico subcontinental de aguas poco profundas en llanuras de inundación. En el área de estudio dicha Formación aflora al noroeste y ocupa un área de 3,2 Km².

1.2.1.2 Formación Mirador (T_{em})

Descrita por Notestein en 1944, como gruesos bancos de areniscas macizas claras y limpias, de grano fino a grueso y en parte conglomeráticas, con delgadas intercalaciones de lutitas grises a marrón, micáceas. Edad: Eoceno Inferior-Eoceno Medio.

Fabre en 1981, realiza la descripción de 284 metros de espesor correspondiente a esta Formación para el área de la Sierra Nevada del Cocuy, como gruesos espesores

de areniscas claras generalmente de color blanco, rosado o gris verdoso, macizas, líticas, de grano fino a medio y con estructuras entrecruzadas, conglomerados polimícticos con cantos subredondeados a redondeados en bancos de hasta 5 metros de espesor, y algunas intercalaciones delgadas de arcillolitas y limolitas verdosas. Esta Formación se correlaciona litológicamente con la Formación Picacho. En el área de estudio dicha Formación aflora al noroeste y ocupa un área de 2,44 Km². Nótese su localización en el contexto general.

Depósitos de origen glaciar

El material que constituye las morrenas de los varios depósitos glaciares son principalmente bloques de areniscas que provienen de las Formaciones Aguardiente y Río Negro.

Morrenas recientes (Q_{mr})

Fabre en 1981, describe que estos depósitos están constituidos por material de color claro, sin vegetación, poco afectado por erosión, alcanzando alturas de hasta 4300 metros en su parte más frontal. El estadio glaciar que los produjo “Estadio de Corralito”, Van der Hammen lo ha estimado entre los 1500 y 1850 d.C., es decir, el Neoglacial; y cubre en toda la Sierra, aproximadamente 170 Km². En el área de estudio dicha unidad aflora al este y noroeste ocupando un área de 67,40 Km².

Morrenas antiguas (Q_{ma})

Están constituidas por material cubierto parcial o completamente por vegetación, más expuesto a los procesos erosivos y formando cordones que se extienden desde el límite frontal de las morrenas recientes y hasta una altura de 3000 metros. En el área de estudio dicha unidad aflora al centro y ocupa un área de 2,12 Km².

Depósitos glaciares sin diferenciar (Q_{gl})

Estos depósitos son caracterizados por Fabre, por la ausencia de alguna morfología en particular, más bien, los propone como morrenas de fondo, laterales o frontales

completamente destruidas. Tanto el material que comprende estos depósitos sin diferenciar como las morrenas antiguas, pudieron ser depositados durante varios estadios glaciares que ocurrieron entre 10.000 a.p y 30.000 a.p.

Depósitos fluvio-glaciares (Qfg)

Según Fabre, estos depósitos que rellenan el fondo de los valles principales en la región, están constituidos principalmente por cantos redondeados de areniscas, limos y arcillas, producto de los procesos erosivos que afectan las diferentes Formaciones litológicas (principalmente del Cretáceo y Terciario), y a los depósitos de origen glaciar, su posterior transporte y redepositación. El mismo autor agrupa también en esta unidad, los materiales finos, generalmente arenas, lodos y materia orgánica, que rellenan las lagunas glaciares y que actualmente se presentan como extensas áreas pantanosas, donde abundan frailejones y plantas almohadilladas. Para el área de trabajo esta unidad junto a los depósitos glaciares sin diferenciar, ocupan 40 Km², generalmente al suroeste.

1.2.1.3 Coluviones (Qc)

Se incluyen bajo esta unidad, aquellas áreas afectadas por movimientos en masa como derrumbes, deslizamientos y materiales traslocados, que se observan en los flancos de los valles, algunos más antiguos sobre los cuales ya se observa crecimiento de vegetación. En la zona de estudio dicha unidad ocupa un área de 6,02 Km², distribuida en pequeñas áreas al este y noroeste.

1.2.1.4 Glaciares (N)

Con una extensión total de hielo de 12 Km² (2018), esta unidad representa la masa glaciar que cubre las cumbres de la Sierra Nevada del Cocuy con alturas de hasta 5300 metros, de las cuales emergen unos picos de rocas. La forma de las masas glaciares van a estar condicionadas con las formas del terreno que hacen parte del monoclinal de la Sierra, es decir, los flancos que buzan hacia el oeste y que representan las pendientes estructurales, y masas extensas de hielo, donde el proceso de ablación se da

principalmente por fundición, por su parte, los flancos que buzan hacia el este y que representan la contrapendiente o frente de la estructura, son más cortos, con mayor pendiente, presentando masas glaciares colgadas y donde la ablación se da principalmente por caída de bloques de hielo. Fabre hizo un cálculo del volumen de la masa glaciar para inicios de los años 80, él tomó un promedio de 100 metros de espesor, el volumen del hielo alcanzaría unos 5,3 Km³, para ese entonces la isoterma de 0°C se encontraba por debajo de los 4700 msnm. Para el año 1959, una expedición de glaciólogos de la Universidad de Cambridge, realizó mediciones de flujo acumulación y ablación, y aunque no son representativos lograron estimar lo siguiente: “la velocidad de flujo de la superficie del Glaciar San Pablín es de 4 pulgadas por día en el centro de la lengua y 3,5 pulgadas por día en el borde del glaciar donde la fricción es mayor. La velocidad de fundición era de unas 3 pulgadas por semana a 4.570 m”. Esta descripción permite verificar la actividad glaciar hasta hace muy poco tiempo, la involución de las masas glaciares se detallará en el capítulo de geomorfología.

1.2.2 Síntesis

Como se observa en la Figura 1.5, los porcentajes de ocupación areal más grandes se encuentran por las dos formaciones cretáceas Aguardiente y Chipaque que con un 37,6% del área supera levemente a los depósitos de morrena y los fluvioglaciares.

Solamente la cuenca del Río Cardenillo situada más hacia el norte de la zona de estudio, con una extensión de 5.264 Ha. Presenta una alta heterogeneidad litológica, allí afloran casi todas las formaciones que se encuentran dentro de toda el área de trabajo, sin embargo, son los recubrimientos cuaternarios los que mayor representatividad poseen, así mismo en la parte alta las laderas estructurales de la formación aguardiente, luego descendiendo las rocas de Tibú Mercedes que confieren tonalidades negras a las laderas donde se ha perdido la cobertura vegetal y muestran los shales alteradas por la crioclastia.

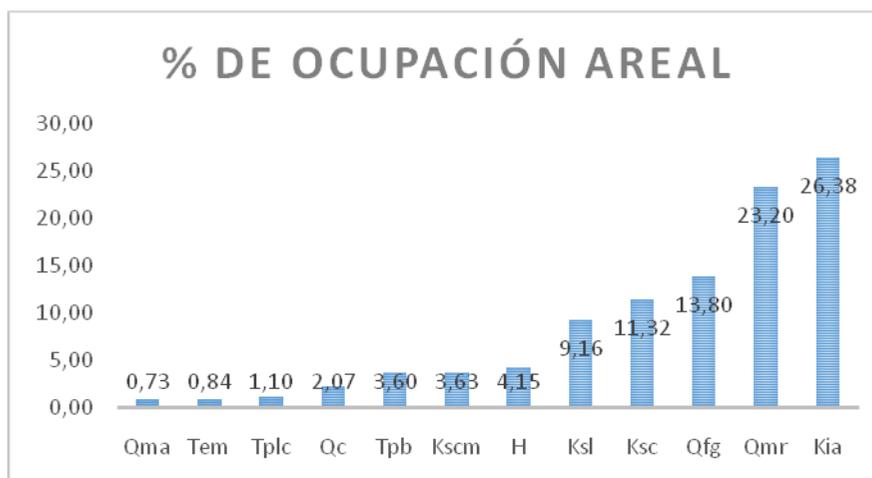


Figura 1.5 Ocupación areal de las unidades litológicas en el área de estudio.

La parte media de la cuenca está dominada por rocas del Neógeno, por lo que adquiere una mayor expresión topográfica debida a las areniscas de Mirador. Es probable que, dada la alta presencia de rocas de ambientes litorales y bentónicos, y la presencia de caliza pueda favorecer la existencia de aguas duras algo carbonatadas.

1.3 GEOMORFOLOGÍA

El presente apartado se basa en la metodología para levantamientos geomorfológicos del Servicio Geológico Colombiano, adaptada para escala 1/25.000, se presenta brevemente el procedimiento metodológico para la interpretación, los insumos para dar paso a la descripción de unidades y sub unidades encontradas, así como la descripción de la evolución de la masa glacial y el análisis de la desglaciación que se viene presentando.

Las definiciones fueron adaptadas del glosario Geomorfológico del SGC.

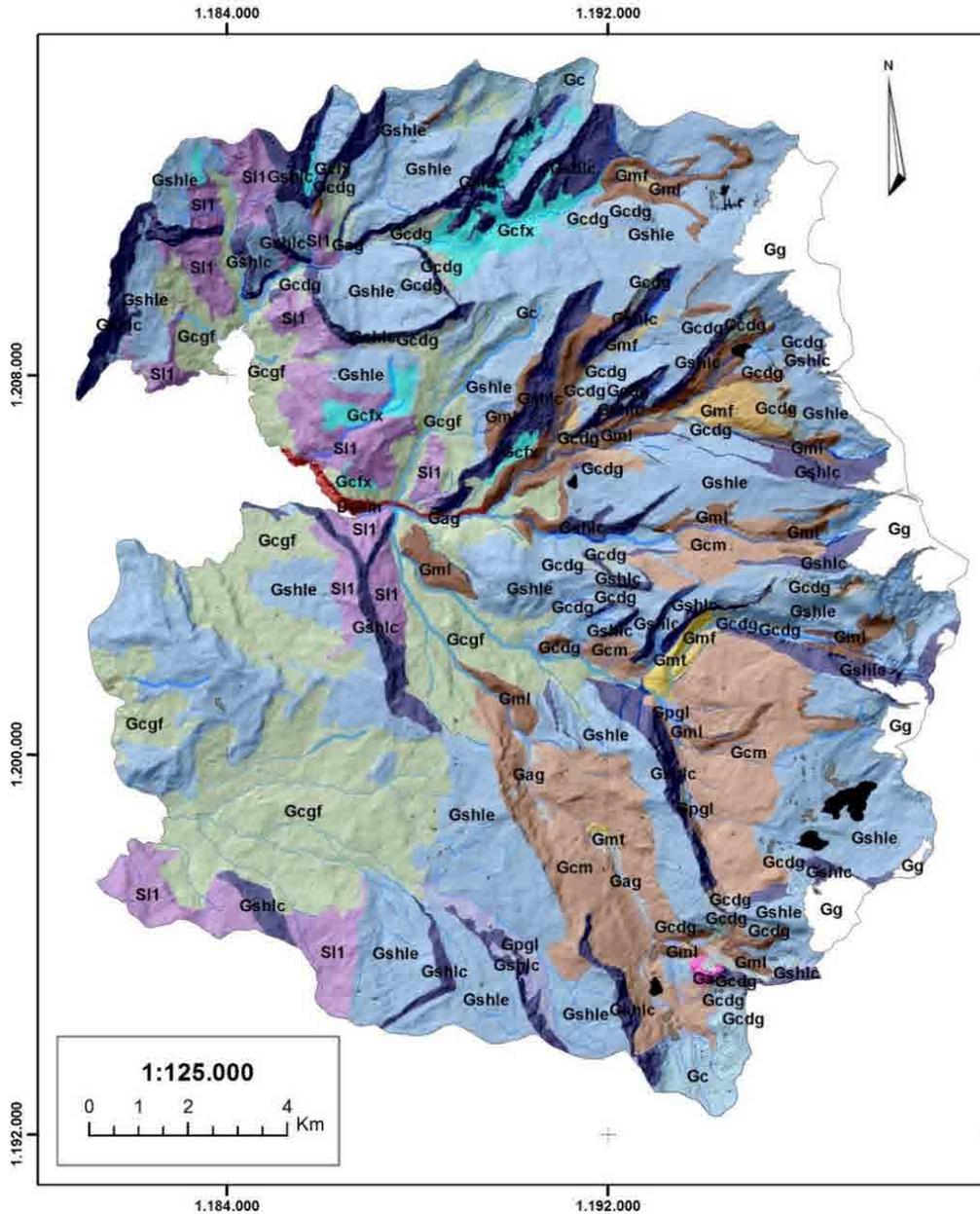
Para simplificar un poco la presentación del mapa, y la comprensión de personas no versadas en el tema se decidió agrupar todas las geoformas del ambiente glacio-estructural, independiente de la condición de plegamiento (anticlinal o sinclinal) como laderas homoclinales. Los sub-ambientes presentados, hacen referencia a procesos actuales que podrían enmarcarse en otro tipo de ambiente,

pero que por la longitud o extensión de las geoformas son exclusivamente glaciales.

Las geoformas ya especializadas se encuentran expuestas en la Figura 1.6, aunque los colores no son exactamente los sugeridos en las metodologías se hace una excepción en razón a la cantidad de unidades que de un mismo color pero en diferentes tonos hacía difícil su comprensión, así pues algunas geoformas de orden agradativo o depositacional fueron identificadas con color marrón en diferentes tonos (color utilizado para ambientes denudacionales), y los lomeríos estructurales en color morado (color utilizado para ambientes estructurales). La descripción se hace de la siguiente manera.

1.3.1 Generalidades

El relieve glacial heredado fue originado por la acción de los glaciares en otras épocas, su expresión morfológica fue establecida por la erosión intensa ocasionada por el movimiento de grandes masas de hielo, o por los procesos de gelifracción actuales en zonas de alta montaña. Esta acción combinada ha generado modelados característicos e imponentes como enormes valles con fondo en U, valles colgantes, agujas glaciarias y hombreras glaciales algunas de ellas con relictos de nieve y formas agradacionales (Figura 1.6) o de sedimentación que se acumularon o se están acumulando en las laderas adyacentes o subyacentes.



LEYENDA

| Síntesis_ | | | |
|-----------|---|--|---|
| | Gg. Masa glaciár | | Gmf. Morrena de fondo |
| | Gag. Valle Aluvio-glaciár | | Gml. Morrena lateral |
| | Gpgl. Plano glaciolacustrino | | Gcm. Campo de morrenas |
| | Ga. Aguja Glaciaria | | Gcgf. Conos glacioluviales |
| | Gc. Circo glaciár | | SI1. Lomerio estructural poco disectado |
| | Gshlc. Lad Contrapén sierra homoclinal glaciada | | Deem. Escarpe de erosión mayor |
| | Gcfx. Colada de geliflución | | |
| | Gcdg. Cono-depósito de gelifractos | | |
| | Gmt. Morrena terminal - frontal | | |

Figura 1.6 Mapa Geomorfológico

Allí surgieron y surgen procesos denudatorios complejos como la gelifracción, la generación de valles en U y la retroexcavación que los acompaña en algunos lugares, y el material así desprendido, depositado con formas

características como las morrenas. El área de estudio fue modelada por tres grandes masas glaciares principales: Cardenillo, Corralitos y Lagunillas, esta última alcanzó grandes dimensiones y alcanzó a dejar valles colgados

como el de Aguabendita, por el camino que asciende al lugar denominado “*El Púlpito del Diablo*”.

Los glaciares de San Pablín y del Cóncavo fueron masas tributantes de las principales, esto en razón al tamaño de sus morrenas y las lagunas de retroexcavación que dejaron a su paso. Esta herencia permitió describir las siguientes unidades, a partir de la Figura 1.7 y 1.8.

1.3.2 Descripción de Unidades

1.3.2.1 Masa glaciaria (*Gg*)

Corresponde a la masa de hielo en retroceso o desglaciación, por lo que hace al menos

150 años su movimiento fue haciéndose cada vez más lento hasta los últimos reportes de actividad del movimiento hacia más o menos 1960, actualmente el balance entre acumulación y fusión es negativo, y en el flanco de estudio es la masa más grande del país y alcanza aproximadamente 1.206,6 hectáreas que equivalen al 4,1 de la totalidad del área de trabajo. Algunas acumulaciones que se encuentran en laderas más inclinadas forman Seracs que son bloques de hielo fragmentado por importantes grietas en un glaciar, y cuya rotura se debe al movimiento del hielo por zonas donde la pendiente se quiebra (Figura 1.7), en las zonas con menor pendiente las acumulaciones son más estables y perdurarán más en el tiempo a pesar de la inevitable desaparición total de los glaciares.



Figura 1.7 Panorámica de la masa glaciaria del San Pablín

1.3.3 Formas erosionales

1.3.3.1 Aguja glaciaria (*Ga*)

Es una cima montañosa en forma aproximada de pirámide con pendientes muy abruptas y escarpadas a veces con formas cóncavas, es el resultado de la destrucción de una hombrera

por un glaciar perpendicular a la dirección de la cima, es decir que al menos para su formación se requirieron 3 ciclos glaciares aproximados entre sí. También puede definirse como una montaña rodeada de circos y a veces se les conoce con la voz alemana de Horn que significa cuerno (Figura 1.9) o Karling.

| LEYENDA GEOMORFOLÓGICA | | | | | |
|------------------------|--|--|---|---------|-----|
| Grupo | Unidad/sub-unidad | Símbolo | Área (Ha) | Porcent | |
| Masa Glaciar | | Gg  | 1.206,6 | 4,1 | |
| Formas erosionales | Aguja Glaciaria | Ga  | 23,8 | 0,1 | |
| | Circo glaciar | Gc  | 621,4 | 2,1 | |
| | Laguna Glacial | Glg  | 170,0 | 0,6 | |
| | Ladera estructural de sierra homoclinal glaciada | Gshle  | 10.947,0 | 37,8 | |
| | Ladera de contrapendiente sierra homoclinal glaciada | Gshlc  | 3.035,7 | 16,7 | |
| | Lomerío Estructural poco disectado | Sl1  | 1.919,8 | 6,6 | |
| | Valle aluvio glacial | Gag  | 117,3 | 0,4 | |
| | Escarpe de erosión mayor | Deem  | 79,4 | 0,3 | |
| Formas agradacionales | Morrenas | Morrena terminal | Gmt  | 102,2 | 0,4 |
| | | Morrena de fondo | Gmf  | 267,5 | 0,9 |
| | | Morrena Lateral | Gml  | 1.448,0 | 5,0 |
| | | Campo de morrenas | Gcm  | 2.885,1 | 9,9 |
| | Plano Glaciolacustrino | Gpgl  | 218,1 | 0,8 | |
| | Colada de geliflucción | Gcfx  | 522,6 | 1,8 | |
| | Cono depósito de gelifractos | Gcdg  | 624,9 | 2,1 | |
| | Conos glaciofluviales | Gcgf  | 4.847,2 | 16,7 | |

Figura 1.8 Leyenda geomorfológica, áreas y porcentaje de cada unidad

Existen varios ejemplos de agujas glaciarias para este sector del parque, por ejemplo, los Ritacubas, o el de la imagen que es el cerro tutelar de la laguna La Pintada en el valle de Lagunillas.

1.3.3.2 Circo glaciar (Gc)

Son geoformas negativas originadas cuando una concavidad preglaciar poco profunda fue ampliada progresivamente, constituyendo

depresiones rocosas de paredes escarpadas de grandes dimensiones y forma circular similar a la de un anfiteatro y por presentar un perfil topográfico cóncavo, originadas por la acción de una masa de nieve. La gelivación va excavando las bases de las paredes circundantes, manteniendo y aumentando así la concavidad de la depresión y propiciando derrubios que actúan a modo de abrasivos al ser arrastrados por el hielo.

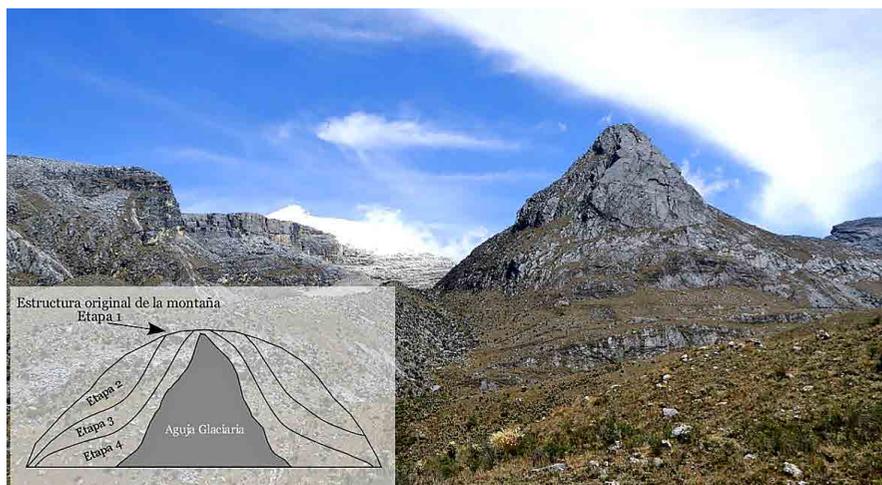


Figura 1.9 Aguja Glaciaria

El hielo, al descender puede originar fenómenos de sobreexcavación entre un punto de ruptura de la pendiente (umbral de circo), que acentúa la forma de la cuenca. Estos umbrales son rasgos frecuentes en las formaciones montañosas sometidas a glaciario y contienen pequeños lagos. Los circos desarrollados en la zona de trabajo (Figura 1.10), presentan comparativamente con otros circos menos inclinación, en razón a la baja inclinación de las laderas estructurales que los albergan.

La cabecera del río Lagunillas, corresponde a una arista glaciaria que es la cresta o borde

originado por la erosión del hielo, formando una divisoria de agua menor, sobre esta parte se encuentra el paso de Cusirí a 4.600 msnm, que técnicamente se denomina *Collar*, es decir, forma un paso a través del filo de una montaña, creado por el agrandamiento de dos circos situados en lados opuestos de la montaña hasta que sus cabeceras se encuentran y se rompen. El circo formado por la masa glacial del Lagunillas es amplio, pero carece un poco de la característica escarpada de los circos. Debido a su desarrollo sobre una ladera homoclinal de baja inclinación (Figura 1.11).



Fuente: <https://earth.google.com>

Figura 1.10 Circo Glacial

Dentro de la zona baja del circo se generaron lagunas por procesos de retroexcavación, dispuestas de manera arrosariada y escalonada

como se aprecia en la Figura 1.11, formando lagunas glaciares.



Fuente: <https://earth.google.com>

Figura 1.11 Conjunto de circos en la cuenca alta del Lagunillas

1.3.3.3 Laguna glaciar (Glg)

También son denominadas cubetas de sobreexcavación, la masa glaciar en su proceso de avance genera componentes erosivos o de “retroexcavación” principalmente en la base o piso de los circos glaciares, ocasionando depresiones que una vez se han retirado los hielos se colman de agua, y a veces son ayudadas por la obturación que crean los

depósitos del fondo del valle glacial que se forman al quedar taponado el valle por la morrena frontal del mismo; de esta forma, al retirarse el hielo, el valle queda ocupado por un río que forma la laguna. También se conocen como ollas glaciarias u ombligos. La Figura 1.12, muestra los dos ejemplos, a la izquierda una laguna de origen mixto: por retroexcavación y obturación, a la derecha una netamente por retroexcavación.



Figura 1.12 Panorámicas de lagunas glaciares

Para la zona de estudio se registran 212 lagunas de alta montaña, de las dos génesis por retroexcavación y por obturación siendo la de mayor extensión la Laguna Grande con 50,3

Ha, y seguida por la laguna del Púlpito y que hacen parte del mismo sistema arrosariado, y su génesis es por retroexcavación (Figura 1.13).



Figura 1.13 Complejo de lagunas Grande de la Sierra, laguna del Púlpito y asociadas

1.3.3.4 Ladera estructural de sierra homoclinal glacida (*Gshle*)

Corresponde a Laderas definidas por la inclinación de los estratos en el mismo sentido, de la pendiente con rangos que varían desde ligeramente inclinadas a inclinadas, de longitud moderada a muy larga, presentan un perfil topográfico rectilíneo a irregular de morfologías cóncavo-convexas y superficies aborregadas.

Es la unidad más representativa del área de estudio y se forma sobre las areniscas de la formación Aguardiente, conformando una ladera de gelifracción sobre el revés del Crestón, presenta un perfil topográfico rectilíneo e irregular con inclinaciones que oscilan entre los 20 y 27° (Figura 1.14). Hacia el Sur en la parte alta del Lagunillas la inclinación se acentúa y deja de ser crestón para pasar a ser espinazos.

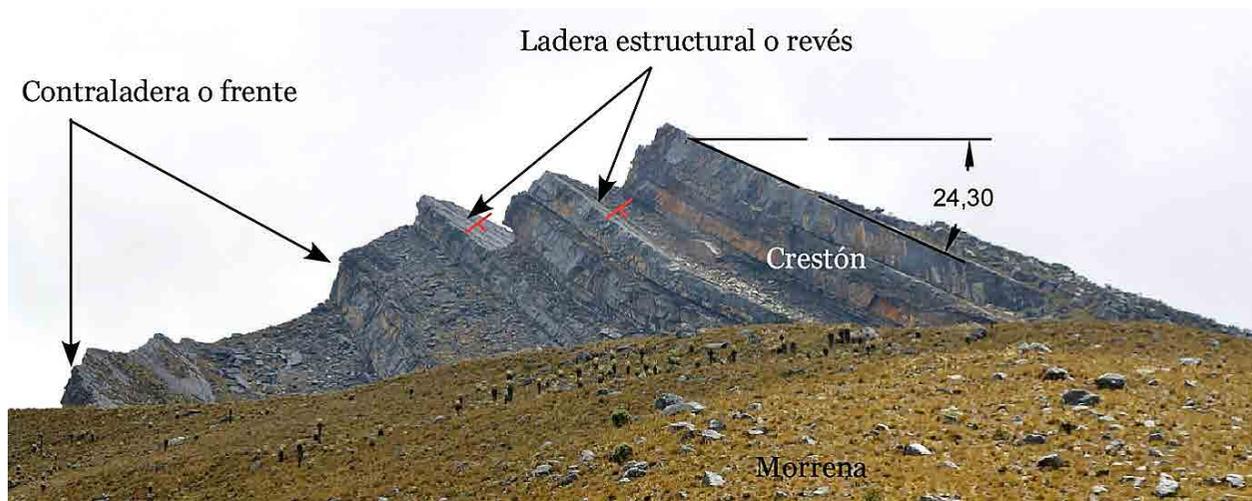


Figura 1.14 Posición de las unidades en un crestón estructural

Las laderas estructurales en la zona alta se presentan sin recubrimientos de ninguna clase, excepto los depósitos de origen glacial, la roca presenta una superficie pulida, estriada y atendiendo a escalonamientos y fallas locales asociadas a la falla del Río Nevado. Por su parte en la zona baja los buzamientos se hacen mucho más pronunciados y hacen parte de estructuras como el sinclinal de Las Mercedes que afecta principalmente rocas terciarias hacia el norte de la zona de estudio, o el Anticlinal de Güicán que afecta rocas cretáceas con inclinaciones de sus estratos que oscilan entre los 10 a 30° aproximadamente.

1.3.3.5 Ladera en contrapendiente de sierra homoclinal glaciada (Gshlc)

Laderas definidas por la inclinación de los estratos se encuentra en dirección opuesta o perpendicular al buzamiento de los estratos o en contra de la pendiente, de longitud moderada

a muy larga, de formas cóncavas a irregulares escalonadas y con pendientes escarpadas a muy escarpadas asociadas localmente a depresiones de nivación y circos glaciales (Figura 1.15).

Algunas de las laderas en contrapendiente de la zona alta están asociadas a sistemas de fallamiento o sus componentes por los cuales los drenajes encontraron zonas de debilidad estructural y profundizaron la incisión, tal es el caso del alineamiento que sufre el Río Cóncavo, cuya dirección SSE – NNW genera uno de los escarpes más pronunciados de la zona de estudio, muy a pesar que este río perfectamente alineado e incisando una ladera estructural no esté reportado como falla en la literatura del SGC, o los escarpes asociados a la actividad tectónica como los mostrados en la Figura 1.16 cuyas componentes generan escarpes profundos y bien demarcados sobre las laderas estructurales, por ello se incluyen en esta categoría.



Figura 1.15 Ladera en contrapendiente de sierra homoclinal glaciada

1.3.3.6 Lomerío estructural poco disectado (Sl1)

Son geoformas un tanto complejas que hacen parte de los sinclinales y anticlinales de las

zonas de trabajo y corresponden a laderas simétricas en rocas sedimentarias disectadas con pendientes cortas, generadas por la Formación Barco y la formación Aguardiente.



Figura 1.16 Laderas en contrapendiente asociadas a la estructura de fallas

1.3.3.7 Valle aluvio Glacial (Gag)

En términos estrictos corresponde a artesas de topografía cóncava y perfil en U, se encuentra recubierta por materiales que han sido remodelados y transportados por corrientes fluviales posteriores a la glaciación. Son

modelados heredados de la última glaciación y que actualmente están siendo modelados por corrientes fluviales, que ha generado rellenos sobre el fondo del valle (Figura 1.17).



Figura 1.17 Valle aluvio Glacial

Los materiales que conforman esta unidad provienen de las morrenas de fondo principalmente, que con el posterior entalle fluvial puede desarrollar pequeñas terrazas.

1.3.4 Formas agradacionales

1.3.4.1 Morrenas

Son las formas de acumulación glacial más relevantes y quizás las más conocidas, el término proviene del vocablo que usaron campesinos

franceses del siglo XVIII para designar bancos de tierra y piedras y gradualmente fue aceptado por la literatura científica. En términos amplios es un conjunto de detritos rocosos, transportados o depositados por un glaciar y dependiendo de la posición que ocupan en el glaciar reciben su nombre: frontales, laterales (Figura 18), de fondo. Son de composición heterogénea, incluyen desde material grueso del tipo de bloques angulosos hasta arcilla, no existe clasificación y el nombre de la roca en conjunto es tillita.



Figura 1.18 Panorámica de una morrena lateral

Dependiendo de su altura relativa, estas denotan la edad en que fueron depositadas y entre más antiguas sean más desarrollo de suelos y vegetación poseen. Los depósitos morrénicos proceden de la fusión del hielo, es decir, cuando cede la acción transportadora del glaciar. Se distinguen en el área de trabajo las

siguientes categorías (Tabla 1.1). Dependiendo de la altura relativa hasta donde descendieron los glaciares la mayor evidencia de este fenómeno son las morrenas y dependiendo de la edad pueden estar o no cubiertas de vegetación (Figura 1.18).

Tabla 1.1 Descripción de los tipos de morrena encontrados

Morrena Terminal (Gmt): Depositadas en la extremidad del glaciar (arcos frontales o recesionales) por el empuje del glaciar; dibuja un anfiteatro morrénico, en forma de dique o barrera del circo, facilitando el desarrollo de lagunas glaciares por obturación.



Morrena de fondo (Gmf): Consiste en material detrítico asociado a la capa de hielo inmediata al fondo del glaciar. Estos fragmentos rocosos provienen de la alteración y destrucción de las rocas del lecho por el movimiento del hielo y los detritos transportados. La unidad está conformada por depósitos localizados en ambos márgenes o costados del flujo de hielo son alargadas y sinuosas en forma de cresta.



Morrena lateral (Gml): Comprendidas entre la margen glaciar y la vertiente. Están formadas por materiales que han caído sobre el glaciar o que han sido arrastrados por él en las paredes del valle glaciar, formando cordones adheridos o no a las vertientes.

Campo de Morrenas (Gcm): Corresponde principalmente a morrenas de fondo, pero que eventualmente pueden contener otros tipos de morrenas y por la escala de trabajo se hace innecesaria su separación.



Esta condición de las morrenas, sumado a estudios palinológicos y de dataciones absolutas como ^{14}C permite establecer las cronosecuencias de la desglaciación durante el holoceno, que se discutirá más adelante.

1.3.4.2 Plano glaciolacustrino (Gppl)

Corresponde a los fondos de artesa, son formas negativas casi completamente colmatadas, por lo que en general, presentan pendiente suaves, aunque pueden existir planos inclinados y son formadas por depositación de sedimentos en lagos y zonas marginales a un glaciar. Se constituyen de materiales finos (limos, arcillas), pero principalmente por musgos por lo que se les denomina turberas, se alimentan por aguas descongeladas. Genéticamente se debe al arranque y a veces la sobreexcavación del tillglaciarico sobre los fondos de los valles y luego durante el proceso de desglaciación genera umbrales o barreras topográficas que facilita la acumulación de sedimentos en ambiente lacustrino permitiendo posteriormente la colonización de plantas acidófilas, que con el tiempo forman turba muy ácida (Figura 1.19).

Estas geoformas adquieren gran significancia en su cuidado por su característica como sumidero de carbono, su alteración supone grandes emisiones de CO_2 a la atmósfera, muchas de ellas se asocian también a los fondos de valle con corrientes permanentes.

1.3.4.3 Colada de geliflucción (Gcfx)

La definición para esta unidad es tomada en su totalidad del glosario de geoformas del SGC, en su versión aún no editada. Corresponde a lóbulos de morfología alomada de longitudes largas a muy largas, que generan pendientes naturales inclinadas con formas convexas. Es una forma de soliflucción localizada en una vertiente glaciar o periglacial, en forma restringida corresponde a un movimiento semilíquido de materiales saturados de agua, cuyo origen se asocia a avalanchas torrenciales que pueden o no estar canalizadas inducidas por heladas, eventos sísmicos o lluvias intensas, este tipo de geoformas es característico de las regiones periglaciares y se produce por el deshielo que sobrecarga de agua el suelo no necesitando mucha inclinación en la ladera para desplazarse.

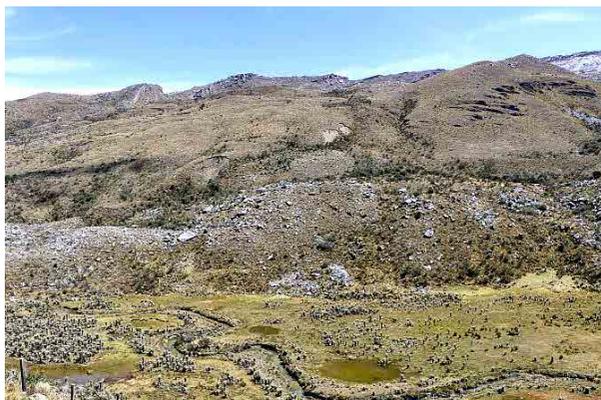


Figura 1.19 Plano glaciolacustrino en la parte baja de la fotografía

Puede extrapolarse al concepto de solifluxión que es un Conjunto de procesos morfogenéticos (vertientes) caracterizado por movimientos en masa del terreno, originados por efectos de la saturación en agua del material arcilloso. Según que este material ha alcanzado el umbral de plasticidad o liquidez (límites de Atterberg) los fenómenos de solifluxión son lentos o catastróficos. Los fenómenos de solifluxión superficial ocurren cuando las capas superiores del suelo retienen gran cantidad de agua, esto tiene por consecuencia un resbalamiento paulatino o rápido de dicha capa: reptación, camellones de solifluxión. Los fenómenos de solifluxión son amplios, pueden producirse cuando una capa de terreno permeable desliza sobre otra arcillosa, la cual, al saturarse de agua, forma un plano lubricado, generalmente los movimientos de masa amplios se caracterizan por una cicatriz en la vertiente. Estos movimientos son los siguientes: desprendimientos o despegamientos, golpe de cuchara, coladas de barro. La gelifluxión designa a la solifluxión relacionada con la helada. Se localizan principalmente hacia la parte norte de la cuenca (cuenca del Río Cardenillo, donde la presencia de rocas tipo shale favorece el desarrollo de estas geoformas.

1.3.4.4 Cono depósito de gelifractos (Gcdg)

Son formas de acumulación glacial dispuestas en las bases de cornizas y escarpes verticales y subverticales morfológicamente parecen conos

y lóbulos alomados de diversas longitudes y formas generalmente y convexas. Son depósitos clastosoportados y generalmente oligomícticos (Figura 1.20), derivados de la gelifracción, se caracterizan por la ausencia total de suelo, aunque algunas veces pueden estar colonizados por arbustales

La gelifracción es producto del intemperismo físico producido por cambios de temperatura, congelamiento y derretimiento del hielo en las fisuras de las rocas en este proceso el agua penetra en las rocas; cuando se congela, su volumen aumenta el 10% ensanchando las grietas donde se acumula, también se conoce como gelivación, este proceso es eficaz cuando el ciclo hielo-deshielo es reiterado. Los clastos así afectados se desprenden del talud cayendo por gravedad, por lo general son de muy cortos recorridos por lo que son extremadamente angulares.



Figura 1.20 Conos de gelifractos dispuestos en la base de escarpes

En estas geoformas es posible que exista una distribución de tamaño de grano dado que los bloques más grandes se disponen hacia la base, cuando hay coalescencia de conos, la geoforma se denomina glacis de gran ángulo o talud de derrubios.

1.3.4.5 Conos glaciofluviales (Gcgf)

Son depósitos de origen mixto, con aportes de materiales de depósitos glaciares y favorecidos por las corrientes aluviales, se estima que durante las desglaciaciones los caudales eran significativamente mayores que las actuales, lo que favoreció su

desarrollo. Los aportes glaciares favorecidos por la pendiente, han venido desarrollando paulatina y constantemente conos con cantos glaciares generalmente matriz-soportados, pero pueden contener enormes bloques a veces decamétricos, pero forman laderas con pendientes inclinadas a ligeramente

inclinadas, dada su falta de diagénesis, las corrientes fluviales se profundizan fácilmente, permitiendo la formación de escarpes erosivos, sujetos a frecuentes desplomes. Generalmente hay coalescencia de estas geoformas formando glacis de grandes extensiones (Figura 1.21).



Figura 1.21 Interpretación de un cono glaciofluvial

1.3.4.6 Síntesis de Unidades

La Figura 1.22 muestra de mayor a menor la representatividad areal de cada una de las unidades, es claro el dominio de las formas glacioestructurales, las unidades agrupadas, muestran cómo el 54,8% corresponde a las laderas estructurales y contraladeras, seguido por las formas agradacionales con un 37,5% de representatividad areal. Al revisar unitariamente las unidades también es muy dominante la geoforma de laderas estructurales, y las implicaciones que esto trae tanto en la conservación del glaciar como en la evolución pedológica y la apropiación social del territorio.

Todas las microcuencas en la zona alta presentan un dominio significativo de las laderas estructurales de la formación Aguardiente, su comportamiento es similar con excepción de las microcuencas Casas viejas, Cardenillo y las áreas de drenaje directos al nevado, en estas áreas las unidades geomorfológicas dominan procesos acumulativos, por ello es frecuente ver superficies menos abruptas, ya que los depósitos de cierta manera suavizan las geoformas originales,

haciendo que los índices de relieve presentan gradientes más bajos, ello explica en parte la mayor apropiación de la tierra por parte de las comunidades locales.

Las áreas de drenaje directos al nevado con los que mayor uso tienen justamente porque casi todas estas áreas están sobre los conos glaciofluviales, que aparte de tener pendientes más suaves, el desarrollo de suelos permite que las actividades agropecuarias sean viables.

1.3.4.7 El Holoceno en la cuenca alta del Río Nevado

Tal como plantea Flórez² con la Orogenia se generaron grandes cambios bioclimáticos, con temperaturas más frías y mayor interceptación de humedad cuya consecuencia fue en lo biológico una mayor humedad y consecuentemente una mayor biodiversidad, y en lo geológico el plegamiento y el desarrollo de saprolitos que en la medida que se localizaban a mayor altura ganaban mayor potencial hidrogravitatorio, así como el desarrollo de un patrón de drenaje que permitió la disección

2 IDEAM. (2010). Sistemas morfogénicos del territorio colombiano.

del bloque cordillerano y la formación del actual avenamiento con sus cañones y drenajes.

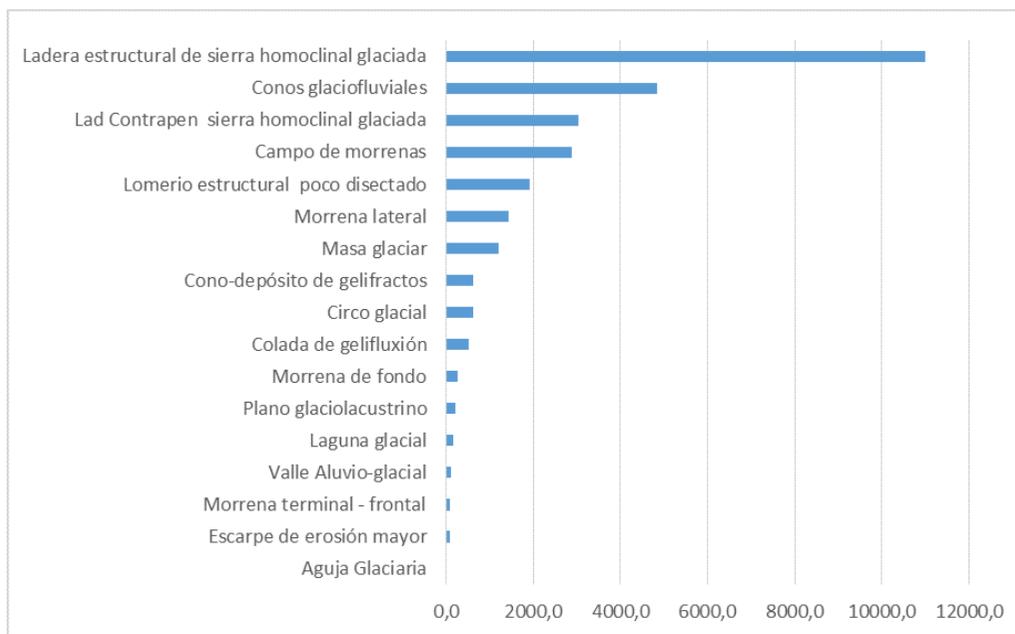


Figura 1.22 Distribución areal de geoformas en hectáreas

Estos fueron modificados durante el cuaternario y los periodos glaciares que lo afectaron, generando casquetes de hielo y glaciares que modificaron la morfología de la alta montaña dejando un paisaje glacial heredado y periglacial, el último periodo glacial comenzó hace aproximadamente 70.000 años hasta los 25.000 años que se denominó el pleniglacial. La desglaciación empezó hace aproximadamente 18.000 años y desde hace 11.000 las condiciones son muy parecidas a las del presente.

Se estimó a partir de la cartografía de los depósitos morrénicos, la localización de los principales sistemas, tratando de ubicar lo más fielmente posible el arco terminal o la zona más baja de las morrenas laterales. Vistos de perfil se pudieron identificar los diferentes estadios

de retroceso (Figura 1.23) los trabajos de Van der Hammen realizaron dataciones absolutas sobre estos sistemas identificando 5 estadios (Figura 1.24) con sus respectivas dataciones. Estas morrenas se localizaron sobre la Tabla del tiempo geológico con escala fija medida cada 1000 años para comprender la disposición de las secuencias glaciares, el trabajo de Van der Hammen et al, realizaron sobre cuatro sistemas de morrenas (Figura 1.25) pero probablemente estadios intermedios fueron posibles, entre el Estadio de Lagunillas y el del Río Nevado se encuentran las morrenas de San Pablín sobre los 3.800 msnm. Y el sistema morrénico más bajo denominado Casas Viejas por la quebrada del mismo nombre podría estar asociada al estadio del Río Nevado, o quizás un poco más antiguo.

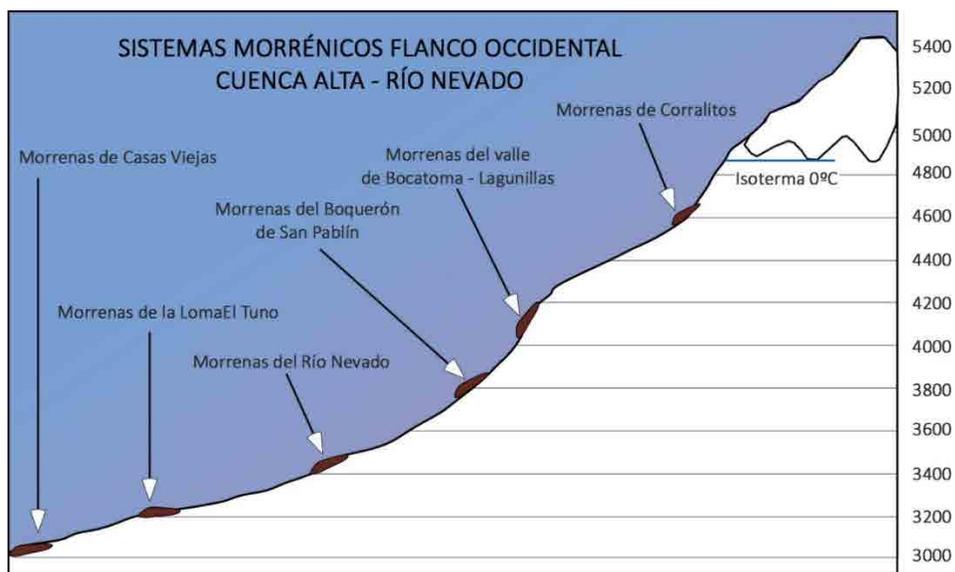


Figura 1.23 Sistemas morrénicos del flanco W del PNN Cocuy

Las dataciones de morrenas hechas por Helmens en la Sabana de Bogotá presentan una asimetría altitudinal con respecto a las del Cocuy, pero bien pudo ser por condiciones topográficas locales o de las calotas de hielo que dieron origen a los glaciares que depositaron cada una de las morrenas.

1.3.4.8 Aspectos Glaciológicos

De acuerdo a Flórez, hace 70.000 años empezaron a formarse los glaciares que ocuparon muchas de las áreas que hoy día están en páramo, la máxima extensión de hielo se dio hace 35.000 años, a partir de este momento los glaciares fueron disminuyendo. Hace 21.000 y 14.000 años antes del presente, hubo una notable reducción del hielo, que permitió la depositación de las morrenas de Lagunillas. El retroceso continuó hasta la pequeña edad glaciación donde hubo una pequeña reactivación de los glaciares y se dio un breve avance depositando las morrenas de Corralitos, donde

el límite inferior de las masas de hielo estaba aproximadamente a los 4.300 msnm.

A partir de hace 11.000 años las condiciones del interglacial han sido muy similares a las actuales, pero desde entonces la isoterma 0° se desplaza cada vez más hacia arriba, en la actualidad se sitúa a los 4860 msnm. De acuerdo con Flórez (2002) la isoterma de 0°C se desplaza altitudinalmente con una velocidad de 5 m/año, promedio para los últimos 150 años, sin embargo, de acuerdo a las mediciones realizadas en el presente trabajo, la velocidad desde 1985 a 1991 ha aumentado con promedios entre 10 y 36 metros dependiendo del sitio de medición, entre 1991 y 2001 los promedios son semejantes. Entre 2001 y 2011 el promedio se redujo un poco entre 15 y 24 metros, ritmo que ha parecido avanzar en los últimos 10 años, porque en términos generales en las laderas más pronunciadas el fenómeno es mucho más veloz.



Figura 1.25 Ilustración de dos sistemas de morrenas

Haciendo una estimación sobre un período más largo, se puede decir que después del último estadio glaciario o sea alrededor de 1850 D.C. el límite inferior de los glaciares que tenía una altura promedio de 4.500 metros pasó en esos 130 años a una altura promedio de 4.760 (actualmente) o sea que el retiro vertical es de unos 1,5 metros por año. Si esta velocidad fuera lineal se necesitará unos 450 años para llegar a 5.400 metros de altura, lo que representaría la desaparición total de los glaciares de la Sierra. De estos cálculos muy imprecisos y que no tienen ninguna base científica se puede sin embargo decir que dentro de 3 a 5 siglos los glaciares de la Sierra habrán probablemente desaparecido en su mayor parte si el clima sigue como el actual”.

1.3.5 Evaluación del retroceso glaciario

1.3.5.1 Materiales y métodos

28 Imágenes del sensor de observación Landsat descargadas de <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Path7, Row 56), desde 1985 hasta el 2018 (Tabla 1.3), todas del periodo comprendido entre el 1 de enero y el 15 de marzo, para asegurar homogeneidad en las observaciones, sin cobertura de nubes sobre el área de trabajo, solamente para los años 1990, 1993 a 1996, es decir solo 5 años sin registros.

Sobre la totalidad del área glaciada y con posterior clip de las áreas por las cinco microcuencas que tienen nieve, se procedió a calcular las áreas por año, perímetro y variación con respecto al año anterior para poder establecer regresiones lineales con las tendencias de los 27 datos para estimar el año sin cubierta de nieve. La Tabla 1.2, muestra la relación de imágenes utilizadas, su área y perímetro nival y la variación positiva o negativa con respecto al año anterior. Cada uno de estos polígonos se superpuso y se generó un mapa con las tendencias de desglaciación (Figura 1.26). El glacial se dividió a comienzos del año 2.000 momento desde el cual se aceleró el proceso por la retroalimentación positiva de la radiación solar.

1.3.5.2 El proceso de desglaciación

Para efectos del trabajo se decidió la zona glaciada entre cada una de las microcuencas que conforman la cuenca alta del Río Nevado, calculando separadamente las diferencias entre las pérdidas glaciares por año y su retroceso, se realizó un corte por cada microcuenca con el año de posible desglaciación (Figura 1.27), para establecer modelos de regresión por cada una de las cuencas (Figura 1.28), se calculó de igual manera el encogimiento anual de la masa glaciada con la siguiente expresión:

$$r = 1 - \left[1 - \left(\frac{A1 - A2}{A1} \right) \right]^{1/t}$$

En donde:

r es la rata anual de encogimiento glaciario

A1 es el área glaciario en el tiempo 1

A2 es el área glaciario en el tiempo 2

T es el número de años entre las dos observaciones

Se plasma en la Tabla 1.2, los resultados de otras investigaciones.

|| Tabla 1.2 Valores de r calculados por otros autores y el presente estudio ||

| ESTUDIO | PERIODO TIEMPO | t | ÁREA INICIAL (Ha) | ÁREA FINAL (Ha) | r |
|-------------------------|----------------|----|-------------------|-----------------|------------|
| Herrera German 2004 | 1896 - 2003 | 17 | 2813 | 2079 | 1,76289083 |
| Herrera German 2004 | 2003 - 2007 | 4 | 2079 | 1715 | 4,69791355 |
| Flórez | 1978 - 2006 | 7 | 3833 | 3570 | 1,01032148 |
| Morris et al., 2006 | 1959 - 1973 | 14 | 3912 | 2800 | 2,36047543 |
| Morris et al., 2006 | 1973 - 1999 | 26 | 2800 | 2039 | 1,21243591 |
| Morris et al., 2006 | 1999 - 2003 | 4 | 2039 | 1630 | 5,44323738 |
| Ceballos et al., 2006 | 1955 - 1986 | 31 | 3890 | 3140 | 0,68854234 |
| Ceballos et al., 2006 | 1986 - 1994 | 8 | 3140 | 2370 | 3,45554456 |
| Ceballos et al., 2006 | 1994 - 2003 | 9 | 2370 | 1980 | 1,97787939 |
| Guillen et al., 2004 | 1960 - 1986 | 18 | 4888 | 3565 | 1,73815652 |
| Guillen et al., 2004 | 1986 - 2003 | 17 | 3565 | 2452 | 2,17747282 |
| UPTC (Presente estudio) | 1985 - 1997 | 12 | 2289,82 | 2036,06 | 0,97403066 |
| UPTC (Presente estudio) | 1997 - 2007 | 10 | 2036,06 | 1535,7 | 2,78090337 |
| UPTC (Presente estudio) | 2007 - 2018 | 11 | 1535,7 | 1235,23 | 1,95989496 |

Tabla 1.3 Imágenes utilizadas en la evaluación del retroceso glacial

| AÑO | ESTÁTUS | ÁREA | PERIMETRO | VARIACIÓN DEL ÁREA |
|------|---------------|------------|------------|--------------------|
| 1985 | Adecuada | 2289,8237 | 57,7852606 | |
| 1986 | Adecuada | 2286,68919 | 59,9863418 | → -3,134515 |
| 1987 | No disponible | | | |
| 1988 | Adecuada | 2178,31734 | 59,1085408 | → -108,3718 |
| 1989 | Adecuada | 2215,1679 | 57,8309375 | → 36,85056 |
| 1990 | No disponible | | | |
| 1991 | Adecuada | 2093,5326 | 60,0723356 | ↓ -121,6353 |
| 1992 | Adecuada | 2304,52701 | 60,6631812 | ↑ 210,9944 |
| 1993 | No disponible | | | |
| 1994 | No disponible | | | |
| 1995 | No disponible | | | |
| 1996 | No disponible | | | |
| 1997 | Adecuada | 2036,06111 | 59,7184381 | ↓ -268,4659 |
| 1998 | Adecuada | 1762,04588 | 58,726674 | ↓ -274,0152 |
| 1999 | Adecuada | 1700,47364 | 56,147267 | → -61,57223 |
| 2000 | Adecuada | 1788,33171 | 59,6062218 | ↑ 87,85806 |
| 2001 | Adecuada | 1787,41207 | 60,3254685 | → -0,919642 |
| 2002 | Adecuada | 1665,71577 | 54,8134963 | ↓ -121,6963 |
| 2003 | Adecuada | 1594,52221 | 56,7435112 | → -71,19357 |
| 2004 | Adecuada | 1591,29342 | 56,0336821 | → -3,228781 |
| 2005 | Adecuada | 1638,5004 | 56,1219886 | → 47,20698 |
| 2006 | Adecuada | 1561,40334 | 53,6317808 | → -77,09706 |
| 2007 | Adecuada | 1535,70997 | 52,7917133 | → -25,69337 |
| 2008 | Adecuada | 1655,06117 | 58,51232 | ↑ 119,3512 |
| 2009 | Adecuada | 1477,63643 | 53,2042951 | ↓ -177,4247 |
| 2010 | Adecuada | 1559,63078 | 56,4403775 | ↑ 81,99434 |
| 2011 | Adecuada | 1400,8335 | 51,4802855 | ↓ -158,7973 |
| 2012 | Adecuada | 1515,45606 | 53,6114295 | ↑ 114,6226 |
| 2013 | Adecuada | 1463,02351 | 55,0472378 | → -52,43255 |
| 2014 | Adecuada | 1405,05185 | 53,813194 | → -57,97166 |
| 2015 | Adecuada | 1468,29239 | 52,2093589 | ↑ 63,24054 |
| 2016 | Adecuada | 1317,04046 | 48,5535753 | ↓ -151,2519 |
| 2017 | Adecuada | 1261,92766 | 46,8245817 | → -55,1128 |
| 2018 | Adecuada | 1235,23918 | 46,3733287 | → -26,68848 |

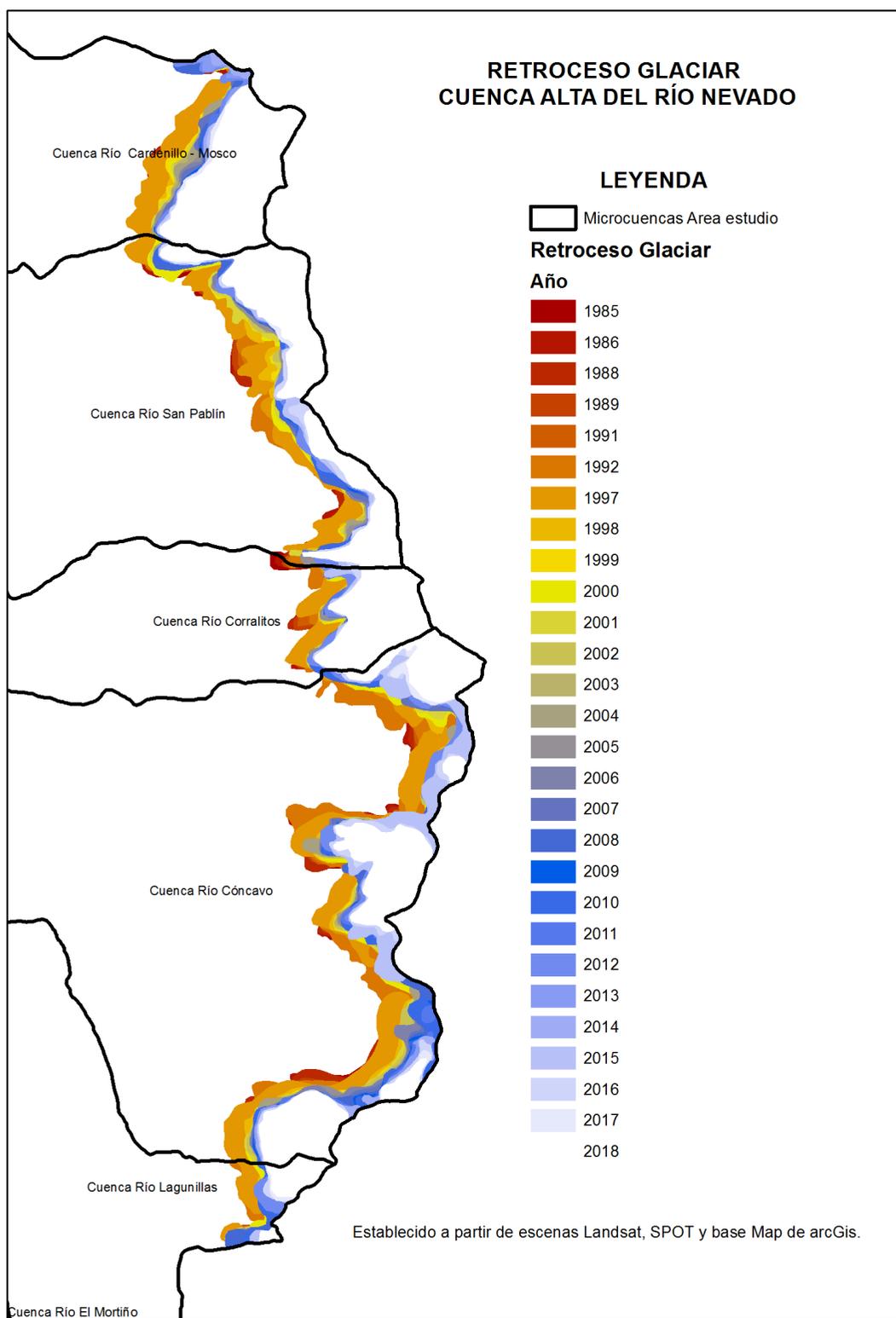


Figura 1.26 Retroceso glaciar Vertiente occidental PNN Cocuy

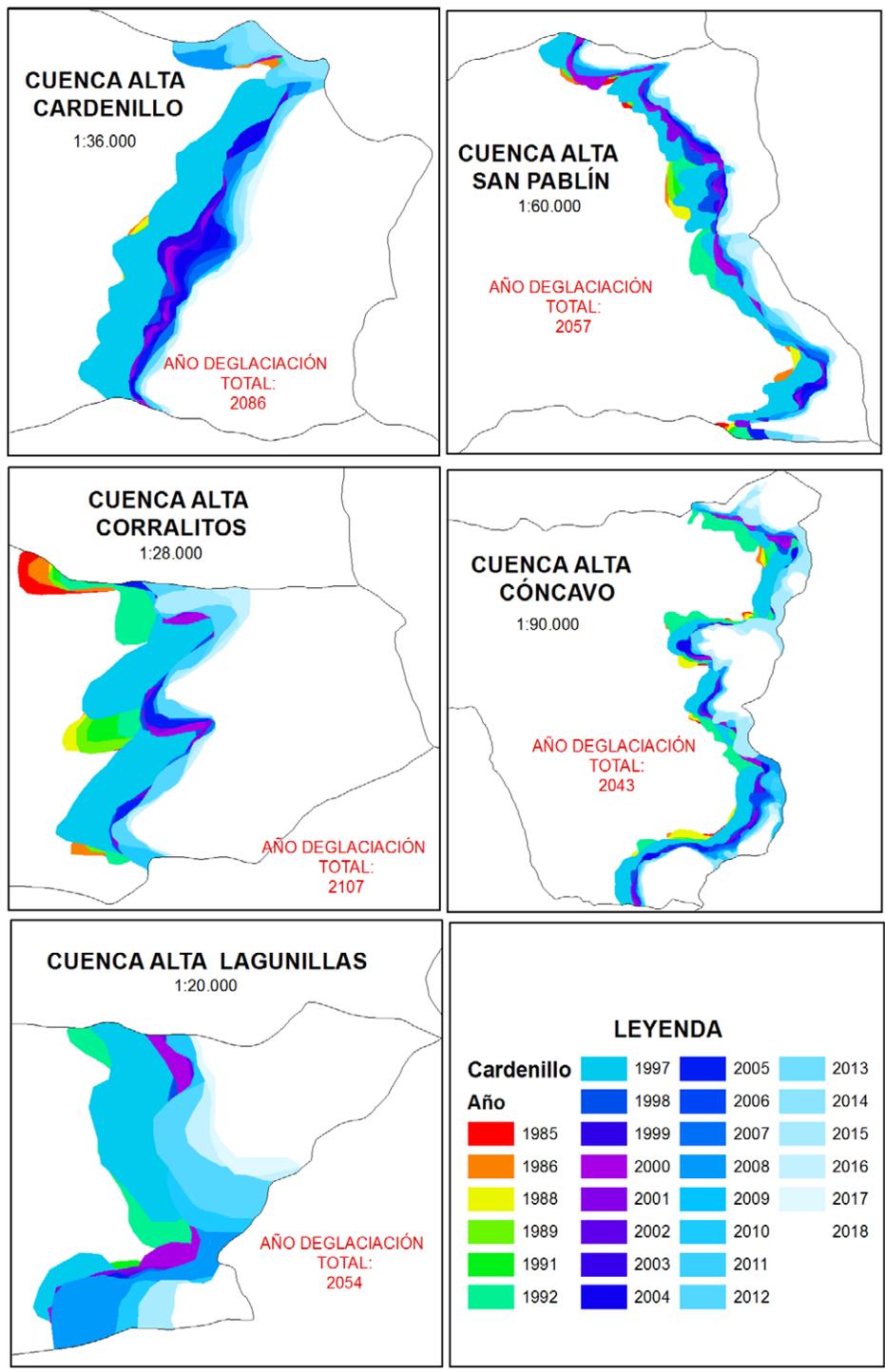


Figura 1.27 Clip del retroceso elaborado para cada microcuenca

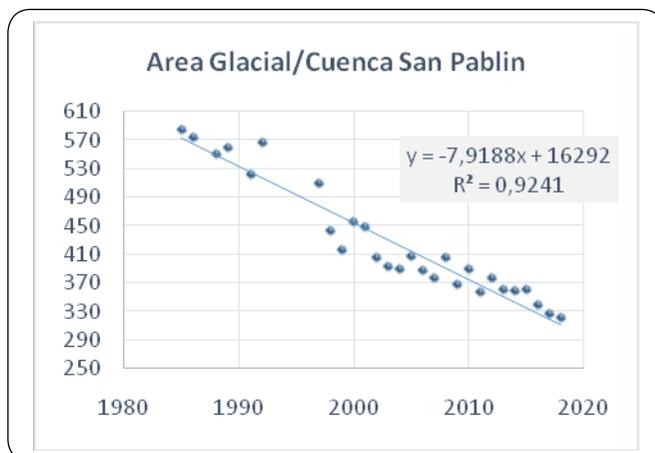
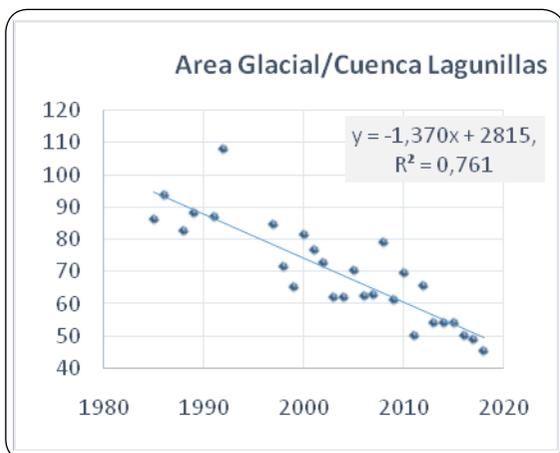
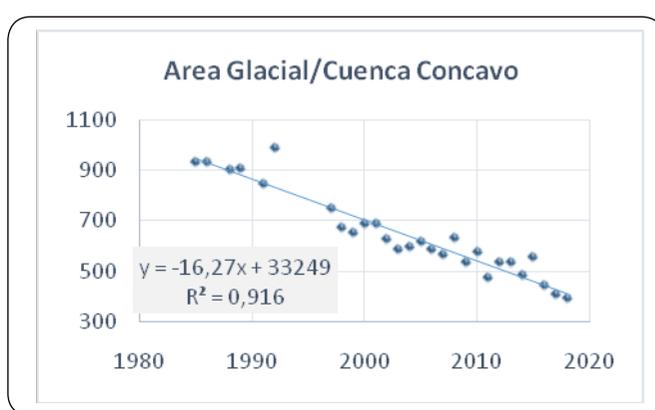
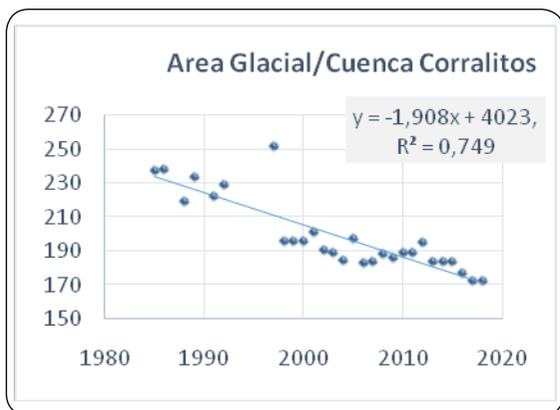
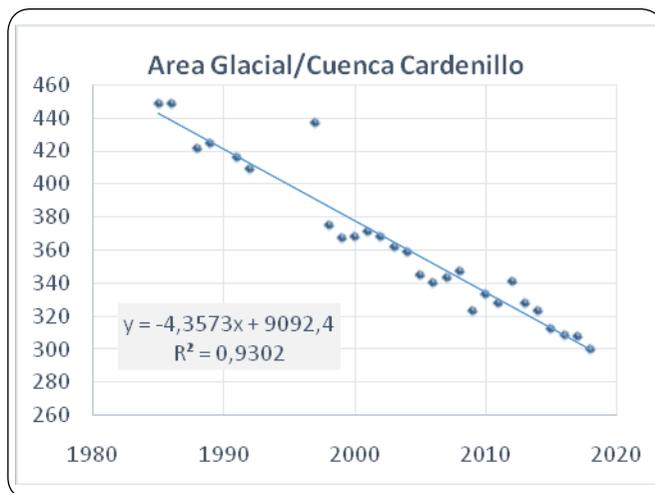
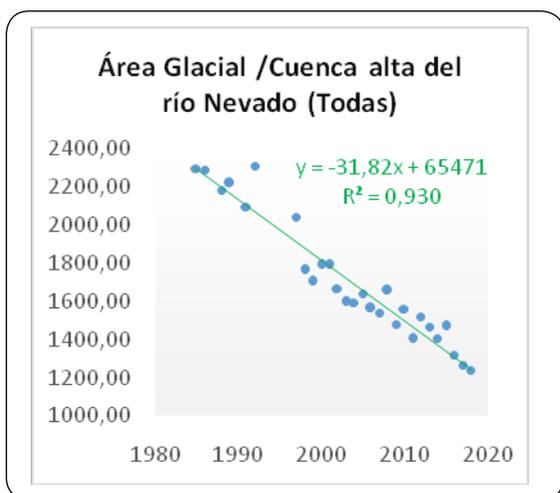


Figura 1.28 Regresiones lineales de cada microcuenca

Los resultados no dejan de ser sobrecogedores, pues se pasa de una fecha estimada de tres siglos (Fabre 1981) a un periodo menor de 3 décadas, dado los aumentos anuales de temperatura y del cambio climático global, en lo local factores como la retroalimentación positiva

de la radiación solar (menos área de nieve que refleje la luz solar) hace que se acumule mayor calor y se derritan más rápido los glaciares. La siguiente gráfica (Figura 1.29) se estima con la pendiente de la regresión el año de área cero para la nieve.

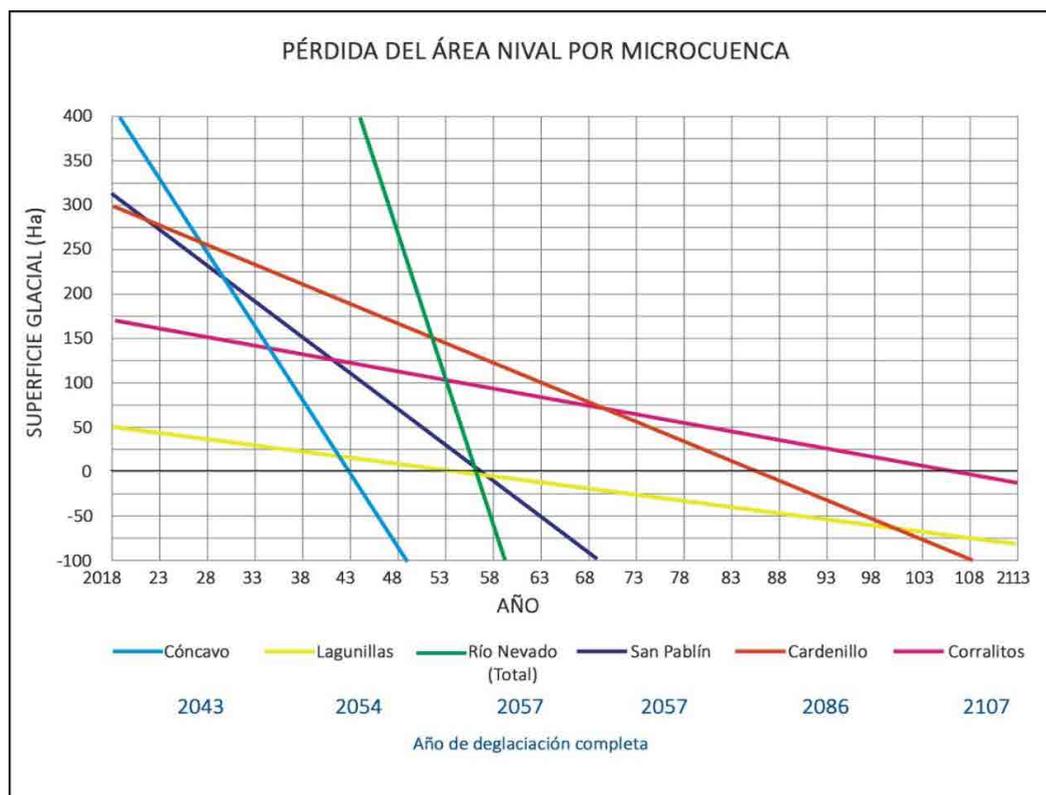


Figura 1.29 Estimación del año con área cero de glaciar para cada microcuenca

De esta gráfica se puede concluir que las cuencas de los ríos Corralitos y Cardenillo serán las últimas en perder su masa glaciar, estimadas para 2017 y 2086 respectivamente, y hoy día son las masas que más “robustas” se aprecian en las imágenes de sensores remotos y las que menor variación areal presentan, sin embargo, a partir del año 2012, su descenso

ha sido significativo y mucho mayor que en los años anteriores.

Al revisar el área cubierta año a año se nota el descenso de la masa glaciar y la variación en la superficie cubierta de nieve siempre es negativa, exceptuando contados años como en 2011 por el fenómeno de La Niña (Figura 1.30).



Figura 1.30 Disminución del área cubierta por nieve

Se comparan con estudios similares las fechas propuestas para la desaparición total de los glaciares (Tabla 1.4), y se concluye que estos

desaparecerán aproximadamente a mediados del presente siglo, de manera irremediable, asociada a una tendencia global.

|| Tabla 1.4 Fecha de desaparición estimada del glaciar por diferentes autores ||

| ESTUDIO | FECHA ESTIMADA DESAPARICIÓN GLACIAL |
|-----------------------|-------------------------------------|
| Herrera Germán, 2004 | 2.075 |
| Ceballos et al., 2006 | 2.058 |
| Morris et al., 2006 | 2.040 |
| Guillen et al., 2004 | 2.053 |
| Flórez, 1991 | 2.104 |
| PRESENTE ESTUDIO | 2.057 |

1.3.5.3 Estimación Pérdida de Suelos por Erosión Hídrica

Para el desarrollo y cuantificación teórica de las pérdidas de suelos en la cuenca alta del Río Nevado, se sigue el modelo propuesto en la ecuación establecida por Wischmeyer y Smith (1978). La metodología que se ha desarrollado, se basa en la utilización de información básica temática alfanumérica y gráfica. Para el desarrollo y presentación del modelo se utilizan los sistemas de información geográfica; los mapas vectoriales son llevados a formato GRD los valores que asume cada pixel, viene del dato original del mapa, como en el caso de precipitación o se asume una calificación por Tabla o Nomograma para los datos de suelos, cobertura y prácticas de manejo.

1.3.5.4 Metodología

La elaboración del mapa de erosión hídrica, comprende tres fases principales:

En la primera fase, a partir de la información temática, se realizan diferentes procesos digitales como interpolación, intersección, edición de tablas, etc., Cada uno de los procedimientos aplicados para obtener los factores de la ecuación universal de la erosión, que van a dar origen a los mapas temáticos.

En la segunda fase, después de realizar el procesamiento digital para determinar cada

factor, se obtienen los diferentes mapas temáticos (índice de erosividad, índice de erodabilidad, índice de cobertura y factor pendiente). En la tercera fase, se aplica la multiplicación de los mapas de cada factor en un SIG. El producto de esta multiplicación es el mapa de erosión hídrica o erosión potencial actual en la cuenca, como una aproximación cuantitativa de la pérdida de suelo. La pérdida de suelo se define como la cantidad de suelo perdido en un plazo de tiempo determinado, en una superficie de la tierra. Se expresa en unidades de masa por unidad de área y tiempo, (Ton/ha*año).

Este estudio utiliza la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE) La cual se expresa de la siguiente manera:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Donde A es el cálculo de la pérdida de suelo por unidad de superficie, expresada en las unidades seleccionadas (Figura 31).

- (R) = Erosividad de la lluvia.
- (K) = Susceptibilidad de erosión del suelo.
- (L) = Largo de la pendiente
- (S) = Magnitud de la pendiente o grado de inclinación
- (C) = Cubierta y manejo de cultivos
- (P) = Prácticas de conservación

Los términos utilizados en esta ecuación, son tomados en gran parte de los levantamientos

agrológicos elaborados por la subdirección de Agrología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá (2009), donde se involucra el área de la cuenca alta del Río Nevado. Además de la interpretación de imágenes de satélite.

Especialización de variables

El factor R

Representa la erosividad de la lluvia, calculado mediante el índice de Fournier modificado

(Fm), recomendado por FAO (1979), según la expresión

$$If = \frac{\sum_{i=1}^{12} P^2}{Pa}$$

Siendo:

P = la precipitación (en mm) del mes más lluvioso

Pa = la precipitación (en mm) anual

Este producto se obtiene a partir del mapa de isoyetas mensuales y su relación con la precipitación anual

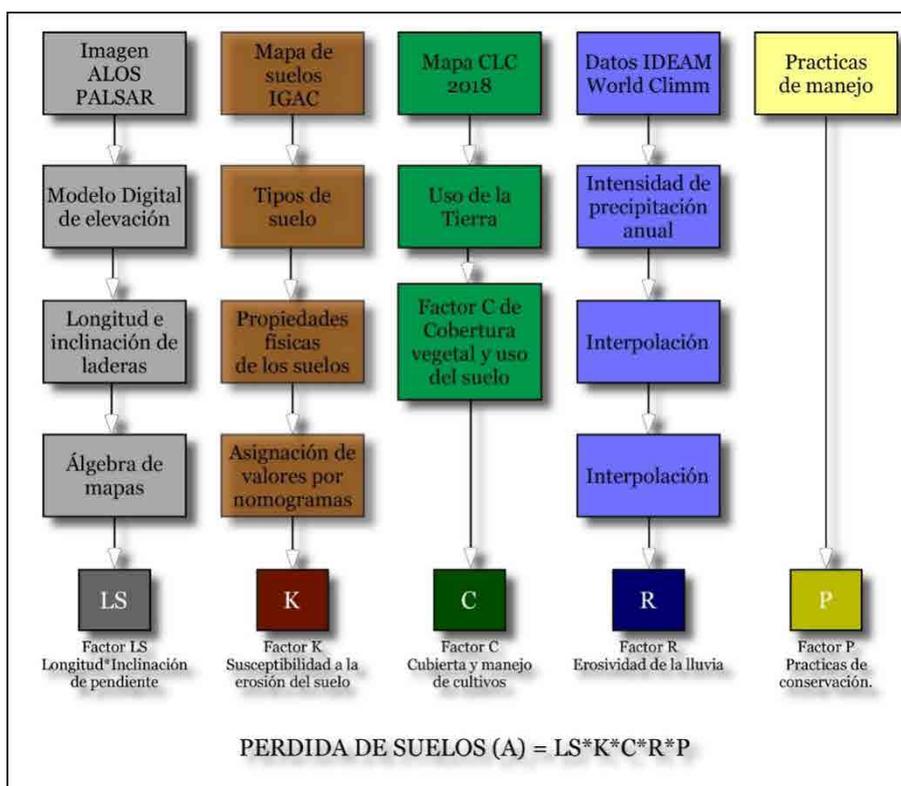


Figura 1.31 Ruta para elaboración mapa de pérdida de suelo por erosión

Determinación del Factor Topográfico LS

El factor topográfico establece el aporte que hace el relieve a la erosión hídrica. Para su cálculo se utiliza la ecuación establecida por Wischmeyer y Smith y modificada por la FAO, 1977. Esta metodología requiere como datos, la longitud de la pendiente en metros y su pendiente en grados o en porcentaje. La ecuación utilizada es la que sigue.

$$LS = (L / 22,1)^m \cdot (0,0650 + 0,04536 \cdot P + 0,0065 \cdot P^2)$$

Términos de la ecuación:

L: longitud de la pendiente en metros.
P: pendiente

m: exponente que varía con la pendiente, de la siguiente manera:

Para pendientes hasta 0,5%, m=0,2
 Para pendientes entre 1 y 3%, m=0,3
 Para pendientes entre 4 y 5 %, m=0,4
 Para pendientes mayores de 5% m=0,5
 Su espacialidad se observa en la Figura 2.63.

Este factor representa la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica, su valor depende de la textura superficial, la estructura, de la permeabilidad y del contenido de materia orgánica (Figura 2.62). Su determinación realiza aplicando la expresión:

Factor de Erodabilidad del Suelo (S)

$$K = \frac{2.1 M^{1.14}(12 - MO)(10)^{-4} + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)}{100} * 1.2928$$

Donde:

- K es el índice de erodabilidad
- M (%Limo + % arena) (100- % arcilla)
- a es el porcentaje de materia orgánica
- b es la clasificación de acuerdo al tipo y clase de la estructura
- c es la clasificación de la permeabilidad.

- 1: Muy buena estructura. Granular muy fina.
- 2: Buena estructura. Granular fina.
- 3: Estructura regular.
- 4: Mala estructura. Laminar o masiva.

Calificación del término “c”: Permeabilidad, con base en la textura, además es considerada la condición de drenaje da los suelos representativos en cada unidad cartográfica de suelos.

El valor de M en este trabajo está sobre estimado ya que no se cuenta con el fraccionamiento de las arenas, que el modelo requiere para la ecuación original, se considera que este factor pueda ser corregido a futuro $M = (\%Limo + \% arena fina) (100- \% arcilla)$.

- 1: Muy rápida, mayor a 12,5 cm/hora
- 2: Moderadamente rápida, de 6.25 A 12,5 cm/hora.
- 3: Moderada, de 2,0 a 6,25 cm/hora.
- 4: Moderadamente lenta de 0,5 a 2,0 cm/hora.
- 5: Lenta, entre 0,125 y 0,500 cm/hora
- 6: Muy lenta, inferior a 0,125 cm/hora.

Calificación del término b: grado de estructura del suelo según la siguiente escala. Se toma el tipo de estructura reportado para los horizontes “A”

Índice y Clasificación de la Erodabilidad del Suelo. Calificación Índice o Factor K (Tabla 5).

|| Tabla 1.5 Estimación permeabilidad del suelo ||

| CALIFICATIVO | RANGO | CALIFICACIÓN |
|--------------|------------|--------------|
| Muy Baja | < 0,03 | 1 |
| Baja | 0,31 - 0,5 | 2 |
| Moderada | 0,51 - 0,6 | 3 |
| Alta | 0,61 - 0,8 | 4 |
| Muy Alta | > 0,8 | 5 |

1.3.5.5 Criterios de Evaluación de la Cobertura Vegetal C

El factor C de cobertura vegetal, indica la protección que la cobertura vegetal presta al suelo al interceptar las gotas de lluvia y amortiguar su energía de impacto disminuyendo el efecto erosivo. El valor de este factor es una relación entre las pérdidas de suelo fértil con la cobertura vegetal actual y las que tendría si estuviese en barbecho continuo. Para la determinación se realizó la cartografía de usos del suelo a partir de una imagen clasificada spot de 2006 de la zona.

El factor de cobertura del suelo C, tiene en cuenta las diferencias de comportamiento del suelo frente a la erosión en función de su cobertura y el efecto de la cobertura sobre la erosión según características del ecosistema tales como: la especie o especies dominantes, el estado del ecosistema natural o intervenido, en sincronización con los periodos de lluvias, las

características de la materia orgánica acumulada sobre la superficie del suelo, etc. El parámetro C toma valores entre 0 y 1, de acuerdo a la Tablas 1.6 y 1.7, con base en la cual se calificaron las diferentes coberturas establecidas en la imagen spot.

El coeficiente C posee una variación temporal acorde a los cambios de cosecha, de temporada lluviosa a seca y de las etapas de crecimiento de los cultivos. En el caso presente, por tratarse de una zona en la que durante el año las condiciones ambientales no varían considerablemente, se ha trabajado con valores anuales, lo que simplifica considerablemente los cálculos, aunado a la falta de datos climáticos y de terreno principalmente de la parte alta.

En la región el valor más bajo es 0,002 para el suelo cubierto de bosques, y el valor máximo corresponde a suelos removidos o desnudo con un valor de 1.

|| Tabla 1.6 Factor C ||

| CATEGORÍA | C |
|-------------------------------|---------------|
| Cuerpos de agua | 0 |
| Bosque Denso | 0,002 |
| Bosque Medio | 0,006 |
| Bosque de ericáceas | 0,28 |
| Arbolado | 0,39 |
| Frutales | 0,40 |
| Gramas y pastos | 0,12 |
| Plantas herbáceas y rastrojos | 0,07 a 0,16 |
| Cultivos anuales (café) | 0,25 |
| Cultivos | 0,1 |
| Suelo removido o arado | 1 |
| Maíz, papa, cereales | 0,4 a 0,9 |
| Frailejonal | 0,003 a 0,042 |
| Pajonal | 0,1 a 0,2 |
| Cultivos de hortalizas | 0,5 a 0,7 |
| Espacios construidos | 0 |

Adaptado de: Roose, 1977 en ORSTOM Y SCSA

Para mejorar esta zonificación se hizo uso también del NDVI o Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, conocido como NDVI por sus siglas en inglés, es un índice de vegetación que se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. El NDVI, está ligado a un gran número de factores en los cultivos. La biomasa suele ser el factor más importante. Por lo que este índice es particularmente importante para correlacionar la cubierta vegetal con la pérdida

de suelos de acuerdo a su actividad clorofílica y cantidad de biomasa.

Este índice genera valores entre -1,0 y 1,0 que básicamente representan el verdor y donde cualquier valor negativo corresponde principalmente a las nubes, el agua, la nieve y los valores cercanos a cero corresponden principalmente a las rocas y al terreno desnudo. Los valores muy bajos de NDVI (por debajo de 0,1) corresponden a áreas yermas de rocas, arena o nieve. Los valores moderados representan terrenos con arbustos y prados (0,2 a 0,3), mientras que los valores altos indican bosques de zonas templadas y tropicales (0,6 a 0,8) (Figura 1.32).

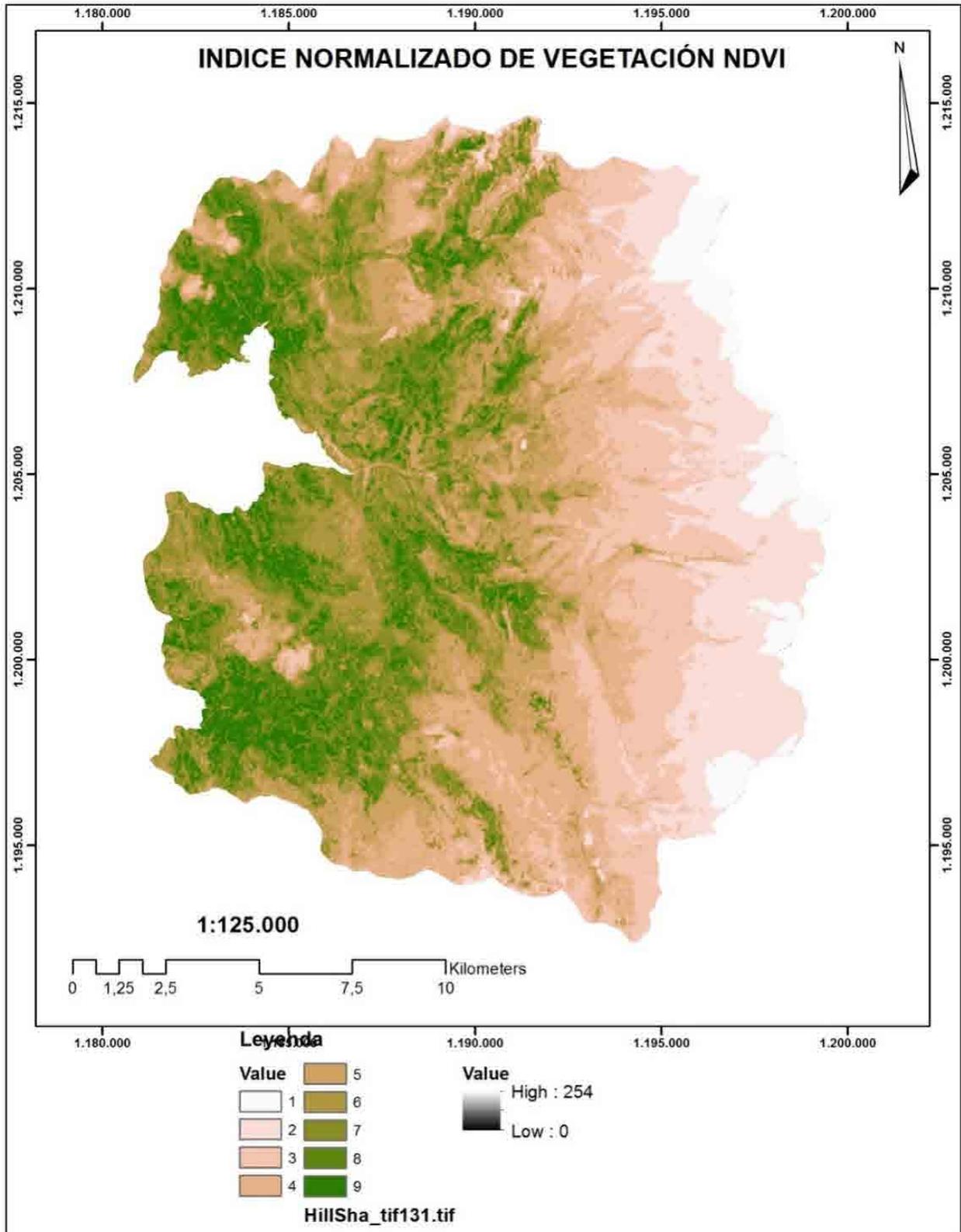


Figura 1.32 Mapa de índice normalizado de vegetación

Tabla 1.7 Factor C en la cuenca del Río Nevado

| COBERTURA SPOT | FACTOR C |
|--------------------|----------|
| AGUA | 0 |
| BOSQUE ALTO ANDINO | 0,002 |
| BOSQUE HÚMEDO | 0,002 |
| HERBAZAL | 0,12 |
| TURBERA | 0,28 |
| POTREROS ABIERTOS | 0,12 |
| SUBPÁRAMO | 0,12 |
| SUELO DESNUDO | 1 |
| TIERRAS MIXTAS | 0,6 |

1.3.5.6 Factor P

El Factor P de prácticas de cultivo considera modalidades como el cultivo siguiendo curvas de nivel o el cultivo en fajas, terrazas, etc. La que atempera el efecto de la precipitación y la incidencia de la longitud y grado de inclinación de las laderas o terrenos. Este parámetro varía de 0 a 1, donde 0 caso ideal, implica el uso al máximo de prácticas conservacionistas y 1 cultivos en dirección a la pendiente y sin ningún tipo de prácticas. En la zona de estudio, estas prácticas no se observaron en los recorridos realizados, por lo tanto se asume el valor 1, para ser aplicado en el modelo.

1.3.5.7 Aplicación del Modelo

La información disponible permite hacer una estimación de la tasa de erosión hídrica y su comparación con la tasa tolerable de erosión, teniendo presentes las variaciones metodológicas mencionadas en el Primer Taller Nacional de degradación de suelos y tierras; marco conceptual y metodológico, realizado en marzo de 2010 en Bogotá, promovido por el IGAC y el IDEAM, definen las pérdida de suelo (Ton/Ha/Año) consignadas en la Tabla 1.8 y se comparan los resultados de pérdida de suelos obtenidos para la cuenca.

Tabla 1.8 Pérdida de suelo (Ton/Ha/Año)

| EROSIÓN | PÉRDIDA DE SUELO |
|---------------|------------------|
| Clases | t/ha/año |
| Nula o ligera | < 10 |
| Moderada | 10 – 50 |
| Alta | 50 – 100 |
| Muy alta | > 100 |

1.3.5.8 Resultados

Condensando la información IGAC 1988 y 2009, como ilustración general se tiene que los suelos ocupan paisajes de: formas heredadas glaciares, muchos de ellos especialmente en la parte alta, las geoformas corresponden a laderas estructurales en areniscas sin el más mínimo desarrollo de suelos, o de morrenas aun sin colonización vegetal. Materiales parentales compuestos por rocas sedimentarias principalmente areniscas y hacia la zona norte (cuenca del Río Cardenillo) materiales lutítico-calcáreos, y en la parte baja de la zona de estudio predominan los depósitos fluvio-glaciares. Las texturas de los suelos dominan las medianas a gruesas, pocas texturas finas. La condición de drenaje dominante son los suelos bien drenados, el pH es generalmente ácido, aunque eventualmente aparecen niveles reactivos alcalinos, probablemente derivados del material parental (calizas) y la fertilidad de muy baja a muy alta.

La capacidad de almacenamiento de agua en el suelo varía de 0 a 350 mm, para las unidades cartográficas, que resulta de calcular la fracción de agua volumétrica en el suelo del nomograma, por el espesor de suelos reportado en los estudios.

1.3.5.9 Pérdida de Suelos

Las condiciones medioambientales y edafológicas de la cuenca favorecen en gran medida la ocurrencia de fenómenos erosivos; sin embargo, el uso del suelo rural y el grado de protección que brindan a las diferentes coberturas a los suelos hacen que el fenómeno

no sea tan acentuado como a priori se pudiera pensar, sin embargo no hay que olvidar otros procesos de degradación de suelos que pueden incidir en forma negativa en los suelos de la región tales como la salinización y la compactación que aunados a la erosión pueden desencadenar procesos de desertización.

Al correr el modelo propuesto en la metodología, basado en Wischmeyer y Smith (1978), se obtiene la siguiente distribución espacial por paisajes de la potencialidad erosiva de los suelos en la cuenca. Mapa de pérdida de suelos.

|| Tabla 1.9 Área y porcentaje de erosión ||

| GRADO RIESGO DE EROSIÓN | ÁREA (HA) | PORCENTAJE (%) |
|-------------------------|-----------|----------------|
| Nula o ligera | 11.158,3 | 38 |
| Moderada | 6.532,6 | 23 |
| Alta | 5.551,33 | 19 |
| Muy alta | 5.790,95 | 20 |
| Total | 29.033,18 | 100 |

Las pérdidas de suelos por erosión hídrica superficial (Tabla 1.9). Las zonas con valores de pérdida de suelo alta y muy alta se encuentran predominantemente en los lugares donde la pendiente es considerablemente fuerte. El factor R evidencia a las claras que la zona de estudio está sometida a tormentas con un alto poder erosivo y aunque la zona es seca durante gran parte del año, en la época lluviosa se presentan tormentas de gran intensidad. Los valores de erodabilidad del suelo probablemente se deban a la presencia de altos porcentajes de arena, del orden del 70% de los horizontes superficiales los cuales son de texturas moderadamente gruesas a gruesas, contribuyendo a que el suelo se disgregue más fácilmente a pesar de que el contenido de arcilla es del orden del 11 al 25 %, adicionalmente el contenido de materia orgánica no sobrepasa el 3.5%, en la mayoría de los horizontes superficiales, por lo que el suelo no posee la suficiente cohesión. La cobertura vegetal en el clima húmedo ofrece mayor protección al

suelo, no así en el clima seco donde el efecto erosivo es atemperado por el menor gradiente de la pendiente. En las zonas de planicies, de piedemonte y las colinas la pérdida de suelo es calificada como moderada y corresponde al mayor porcentaje de la cuenca, estas áreas son las más probables a ser incorporadas a la producción agropecuaria en un futuro próximo por lo que requieren de cuidados especiales y prácticas de manejo acordes con los usos que se propongan para estas tierras.

1.3.5.10 Relación de Pérdida de Suelos por Microcuenca

Las microcuencas que mayor pérdida de suelos por erosión hídrica son Casas Viejas y Cardenillo así como las áreas intercuenca que se denomina directos al Río Nevado (Figuras 1.33 y 1.34). Las dos cuencas mencionadas deben probablemente sus altas tasas de pérdida de suelos en primer lugar a la intervención y en segundo lugar, a la litología subyacente de lutitas, limos y a veces calizas.

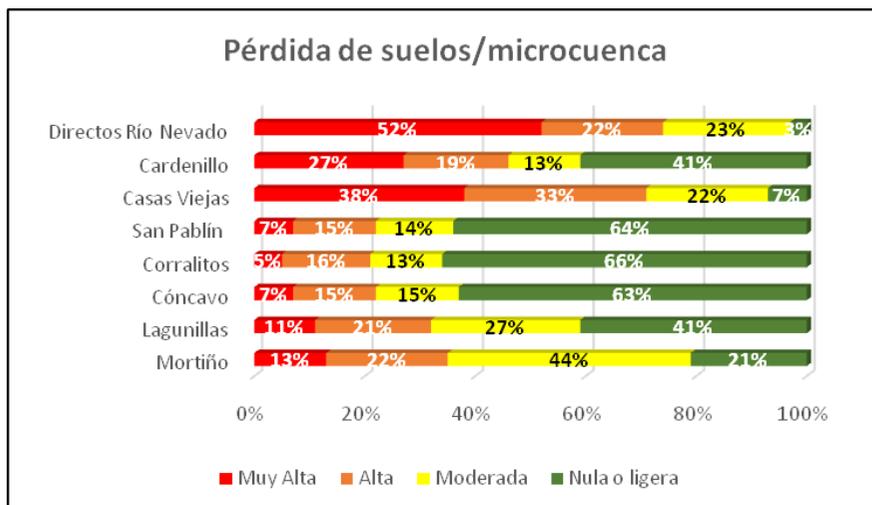


Figura 1.33 Porcentaje de pérdida de suelo por categoría por microcuenca

La situación en términos generales para toda la microcuenca está dominada por la pérdida de suelos en las cuencas de los Ríos Cardenillo y la quebrada Casas Viejas.

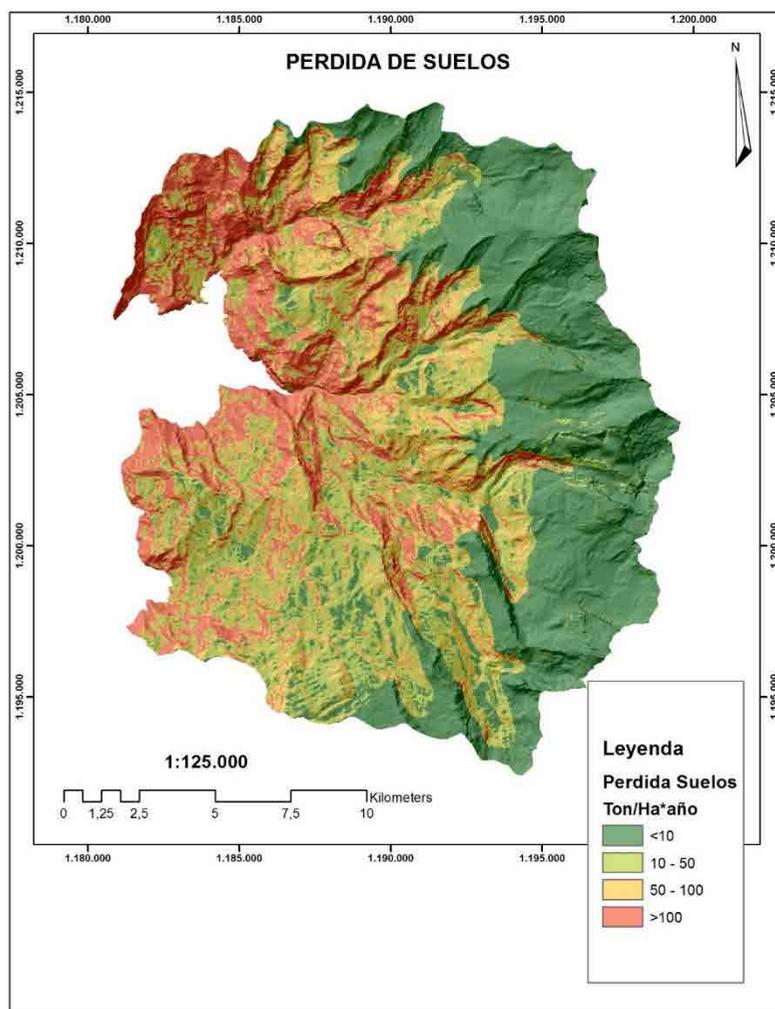


Figura 1.34 Mapa de pérdidas de suelo

Así como los directos al Río Nevado que aportan casi un 20% del total de pérdida de suelos del total de la cuenca (Figura 1.35) donde se estarían perdiendo aproximadamente 1.158.000 Ton/año. Sumando las demás áreas la pérdida de suelos en las partes medias y altas no alcanzan a superar los 542.000 Ton/año.

1.3.5.11 Evaluación de la Susceptibilidad al Desarrollo de Fenómenos de Remoción en Masa

La evaluación de la amenaza parte de la susceptibilidad que evalúa la distribución de movimientos en masa en ladera y procesos de vertientes generadores de desequilibrio morfogenético, tomando en consideración el enfoque geomorfológico, cuyo objetivo es determinar la variación espacial de la inestabilidad de las laderas y su representación cartográfica mediante el mapa de susceptibilidad geomorfológica.

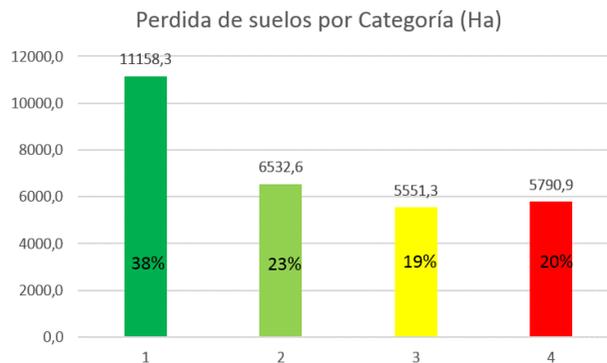
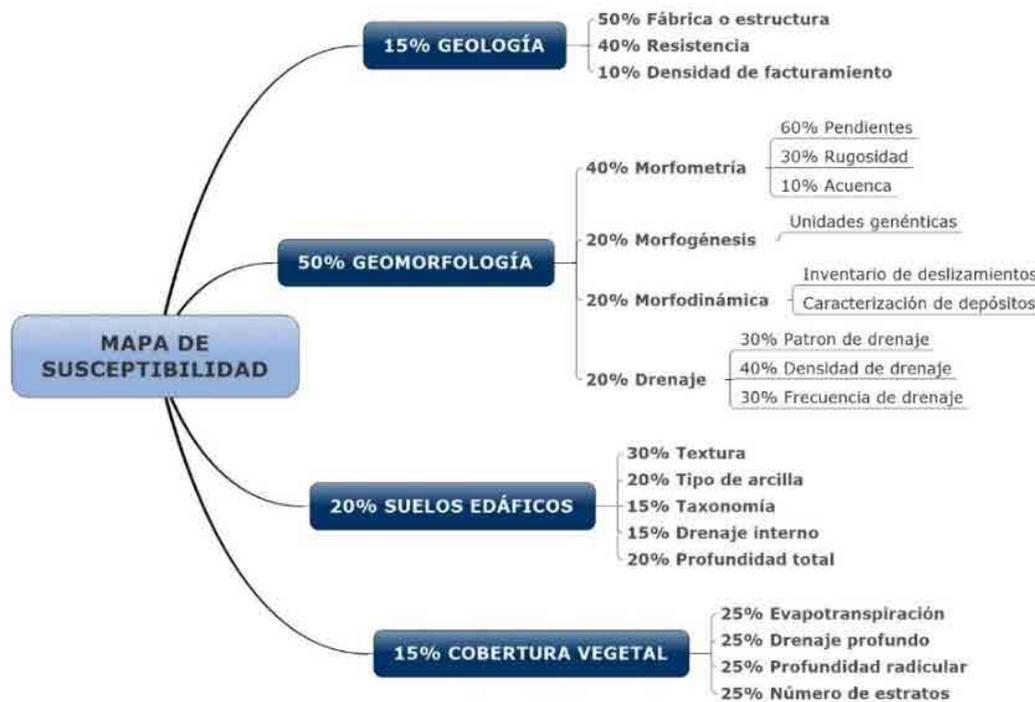


Figura 1.35 Porcentaje de pérdida de suelo por categoría por microcuenca

La evaluación de la susceptibilidad se fundamenta en el análisis y espacialización de factores ambientales que inciden en la estabilidad de las vertientes, la relación entre estos factores que evaluados por separado y luego se integran para obtener una visión general del área. La Figura 1.36 muestra a partir de un mapa mental la distribución de pesos de cada una de las variables analizadas para obtener el mapa final.



Fuente: adaptado de SGC 2012

Figura 1.36 Diagrama del recorrido metodológico para calcular el mapa de susceptibilidad

1.3.5.12 Zonificación de la susceptibilidad

Una vez definidos los criterios de cruce, espacializados y ponderados, se determina la variación espacial de la inestabilidad de las laderas, de acuerdo a la metodología, se ha considerado incluir la geomorfología, la geología, suelos edáficos y cobertura, esta relación define los valores de la susceptibilidad. La geomorfología es la variable que más peso posee en el análisis. La ecuación para determinar la susceptibilidad es la siguiente:

$$\text{Susceptibilidad Final} = 0,5 * \text{geomorfología} + 0,15 * \text{Geología} + 0,20 * \text{Suelos} + 0,15 * \text{Cobertura}.$$

1.3.5.13 Análisis y resultados

Para la caracterización de la zonificación de susceptibilidad se definieron tres rangos de clasificación: baja, media, y alta, el modelo está mostrando una alta incidencia de las pendientes como elemento que configura particularmente para este sector una susceptibilidad alta, bien sea por la remoción o por la caída de bloques en los escarpes (Figura 1.37).

1.3.5.14 Susceptibilidad baja

Zonas de laderas con pendientes inclinadas presentes en unidades geomorfológicas, de origen Glacial y fluvioglacial y Estructural, con geoformas estables, tales como fondos de artesa (planos glaciolacustrinos), las laderas estructurales de la zona alta, y geoformas acumulativas que por sus pendientes bajas, minimizan la susceptibilidad.

1.3.5.15 Susceptibilidad media

Corresponde a zonas con laderas moderadamente inclinadas a abruptas, en unidades geomorfológicas dispuestas en laderas y contraladeras cuya base litológica es de lutitas y limolitas, se distribuye uniformemente por toda la zona se ve afectada por depósitos cuaternarios de diversos espesores y particularmente donde las cubiertas vegetales originales han sido alteradas y reemplazadas. Las microcuencas que más superficie presentan en esta categoría son Casas viejas, Cardenillo y directos al Río Nevado.

1.3.5.16 Susceptibilidad alta

Zonas con laderas muy abruptas a escarpadas, donde la cubierta por depósitos de origen glacial sobre rocas de diversas, pero que aparentemente sus espesores no son sobresalientes, excepto en la zona baja donde los depósitos del abanico fluvioglacial generan escarpes con importantes espesores, estas zonas también se hacen muy susceptibles al desarrollo de FRM. La microcuenca con mayor porcentaje en esta categoría es la de Lagunillas, probablemente por la presencia de escarpes subverticales en gran parte de la zona alta, que pudiera condicionar esta situación.

1.4 SÍNTESIS

El área de trabajo corresponde a la cuenca alta del río Nevado, delimitada en su parte más baja por la cota 3.000, de tal manera que hacia arriba los procesos glaciares operaron en apogeo durante la última glaciación, lo que Flórez (1997), considera la alta montaña, y donde la herencia morfoclimática es constitutiva (durante la última glaciación el borde inferior de los glaciares estaba alrededor de los 3000 ± 100 m). La unidad geológica más representativa del área de la formación Aguardiente, responsable de las laderas estructurales y escarpes de las zonas donde se acumula hielo, esta formación dada su litología predominante de areniscas cuarcíticas, es la responsable de las formas abruptas e imponentes que le confieren un alto grado de calidad escénica a la sierra.

Las formaciones de la base del terciario con litologías más del orden Margas y calizas afloran principalmente en la cuenca del río Cardenillo, razón por la cual las aguas pudieran ser un poco más duras en el resto de la zona de trabajo. Estructuralmente la zona de trabajo presenta algunos pliegues amplios con cabeceos al NE, los sistemas de fallas predominantes son E-W alineando algunas quebradas y expresando su trazo más allá de los escarpes nevados.

Las cuencas que comparten glaciar presentan una gran superficie dominada por la formación Aguardiente (más del 40%) y al menos un 10% en coberturas de nieve, dominan así mismo los depósitos glaciáricos y solo un pequeño porcentaje para otras formaciones, esto por sí

mismo garantiza una alta estabilidad de orden geotécnico dentro el A.P.

Las masas glaciares que más incidieron en la formación de valles amplios fueron las de Cardenillo, Corralitos y Lagunilla, las demás masas fueron tributarias de estas y la profundidad de su valle y el tamaño de sus morrenas son significativamente menores. Aunque los estudios de dataciones absolutas proponen 4 estadios por las alturas relativas de las morrenas es posible que existan fases intermedias aun no datadas como es el caso de las morrenas del Boquerón de San Pablín y las de la zona baja de la cuenca Casas viejas.

La fecha estimada para la desaparición del glaciar de la sierra nevada del Cocuy puede

estar a mediados de la presente centuria, sin embargo, las cuencas altas de Corralitos y Cardenillo serán las últimas en conservar nieve en sus cumbres mientras que los de Lagunillas y Cóncavo serán las primeras en las que desaparecerá.

Las microcuencas que mayor pérdida de suelos por erosión hídrica son Casas Viejas y Cardenillo así como las áreas intercuenca que se denomina directos al Río Nevado. Las dos cuencas mencionadas deben probablemente sus altas tasas de pérdida de suelos en primer lugar a la intervención y en segundo lugar a la litología subyacente de lutitas, limos y a veces calizas.

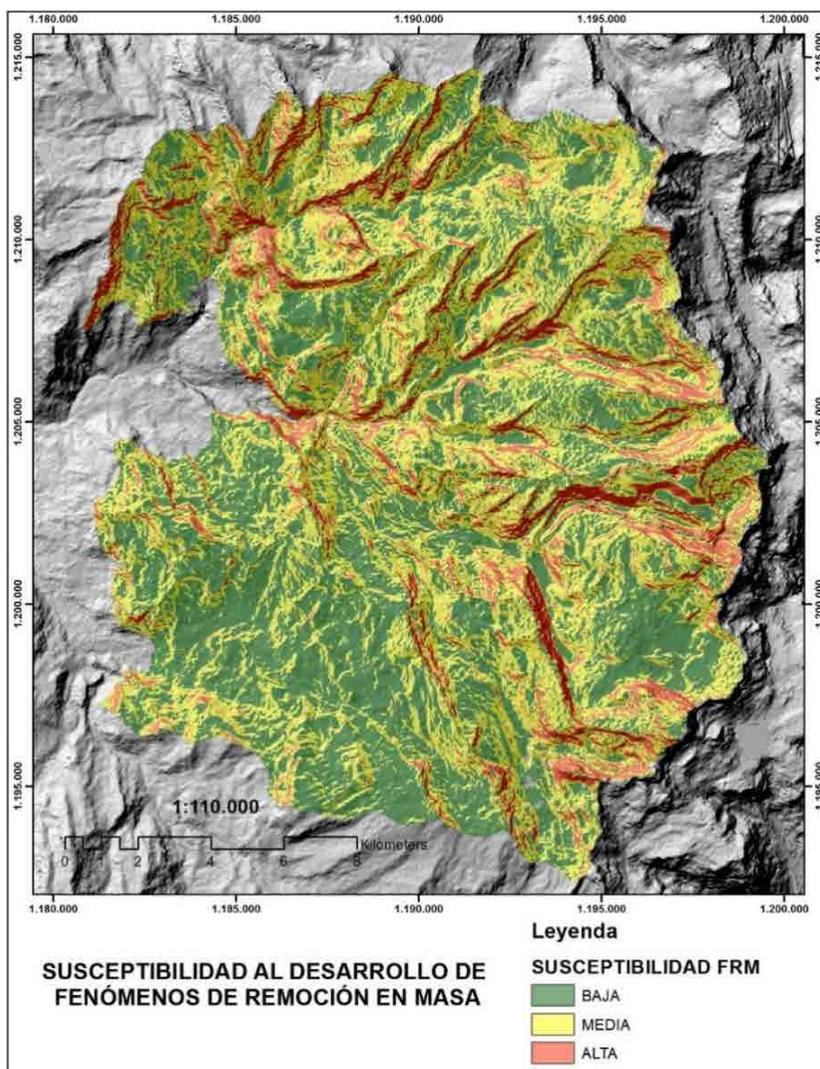


Figura 1.37 Mapa de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa

La situación en términos generales para toda la microcuenca está dominada por la pérdida de suelos en las cuencas de los Ríos Cardenillo y la quebrada Casas Viejas. Así como los directos al Río Nevado que aportan casi un 20% del total de pérdida de suelos del total de la cuenca donde se estarían perdiendo aproximadamente 1.158.000 Ton/año. Sumando las demás áreas la pérdida de suelos en las partes medias y altas no alcanzan a superar los 542.000 Ton/año.

BIBLIOGRAFÍA

- Baptiste, B. L. (2011 Vol 1.). Ecología del paisaje en los páramos. Colombia tiene páramos, 32-40.
- Brunnschweiler. D. (1981). Glacial and periglacial form systems of the Colombian Quaternary. Revista CIAF, 6(1 3): 53-56.
- Castaño, Carlos, (2002). Colombia alto andina y la significancia ambiental del ecosistema del bioma de páramo en el contexto de los andes tropicales: Una aproximación a los efectos futuros por el cambio climático global (Global climatic Tensor). Congreso mundial de páramos, 24-49.
- Eduardo, G. S. (2002). Cambios y transformaciones en el suelo del bioma de páramo por el cambio climático. Memorias Congreso mundial de páramos Tomo I, 72-79.
- Flórez, A. (2002). Movilidad altitudinal de páramos y glaciares en los Andes Colombianos. Memorias. Congreso Mundial de páramos, 80-97.
- Franco Vidal Lorena, D. J. (2013). Factores de vulnerabilidad de los humedales alto andinos de Colombia al cambio climático global. Cuadernos de geografía Vol. 22 No. 2.
- Franco Vidal Lorena, D. J. (2013). Factores de vulnerabilidad de los humedales alto andinos de Colombia al cambio climático Global. Cuadernos de geografía. Vol. 22 No. 2. Julio - Diciembre de 2013.
- González E., Van der Hammen, T. and Flint, R. F., (1966). Late Quaternary glacial and vegetational sequence in Valle de Lagunillas, Sierra Nevada del Cocuy, Colombia. Leidse Geol. Meded., 32: 157-182.
- Helmens, K. (1988). La sucesión glacial del Pleistoceno tardío en los alrededores del altiplano de Bogotá (Cordillera Oriental, Colombia). Amsterdam: Universidad de Amsterdam, Laboratorio Hugo de Vries.
- Herrera Germán, R. J. (2008). Retroceso glacial en la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá. 1986 – 2007. Perspectiva Geográfica Vol. 13.
- IDEAM. (2010). Sistemas morfogénicos del territorio colombiano. Bogotá, D.C.: IDEAM.
- IDEAM. (2012). Glaciares de Colombia. Más que montañas con hielo. Bogotá, D.C.: Comité de comunicaciones y publicaciones del IDEAM.
- IDEAM, P. M. (2017). Análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático en Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá, D.C.
- IGAC. (1992). Los nevados de Colombia. Glaciares y glaciaciones. Análisis geográficos.
- IGAC. (1995). Plioceno y Cuaternario del altiplano de Bogotá y alrededores. Análisis Geográficos No. 24.

IGAC. (2003). Neógeno y Cuaternario del altiplano de Bogotá y alrededores. Análisis Geográficos No. 26.

IPCC. (2013). Climate change 2013: The physical Science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on Climate Change. Cambridge - New York.

Ríos, Katherine, F. A. (1998). Las lagunas de Alta montaña. Cuadernos de Geografía Vol. VII No. 1-2 1998. Facultad de Ciencias Humanas Universidad Nacional de Colombia.

Rodríguez-Eraza N., P.-C. J.-S.-C. (2010). Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes Colombianos. . Bogotá D.C.: IAvH-Universidad Nacional de Colombia. Departamento administrativo de Ciencia, Tecnología.

Sarmiento, C. y. (2014). Aportes a la delimitación del páramo mediante la identificación de los límites inferiores del ecosistema a escala 1:25.000 y análisis del sistema social asociado al territorio: Complejo de Páramos Jurisdicciones – S. Bogotá D.C.: IAvH.

Servicio Geológico Colombiano. (2012). Documento inédito. Glosario de unidades y sub-unidades geomorfológicas de Colombia. Bogotá D.C.

Servicio Geológico Colombiano. (2012). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa. Escala 1/100.000. Bogotá, D.C.

Thomas, V. D. (2002). Páramos. Diagnóstico, cambio global y conservación. Tomo I congreso mundial de páramos, 60-71.

Van Der Hammen, T. E. (1980/1991). Glacial del Cocuy, Paleogeografía. Paleoclimatología, Paleoecología. Bogotá.