

LA CRQ N°. 003 DE 2019  
EL IGAC N°. 5125 DE 2019

ESTUDIO DE IDENTIFICACIÓN  
DE PROCESOS EROSIVOS  
EN LA UNIDAD HIDROGRÁFICA  
**DEL RÍO NAVARCO**  
EN EL DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO

## INFORME FINAL

Convenio Interadministrativo  
celebrado entre La Corporación  
Autónoma Regional del Quindío -  
CRQ y El Instituto Geográfico  
Agustín Codazzi - IGAC

*Diciembre de 2019*



El futuro  
es de todos

Gobierno  
de Colombia



## CONSEJO DIRECTIVO

**IVÁN DUQUE MÁRQUEZ**

*Presidente de la República de Colombia*

**OSCAR FELIPE MARLES MONJE**

*Directora General (E)*

*Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)*

**Dr. Juan Daniel Oviedo Arango**

*Director Departamento Nacional de Estadística (DANE)*

**Dr. Carlos Holmes Trujillo**

*Ministro de Defensa Nacional*

**Dr. Andrés Valencia Pinzón**

*Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural*

**Dr. Édgard Moncayo Jiménez**

*Representante Presidencia de la República*

**Dr. Luis Alberto Rodríguez**

*Director Departamento Nacional de Planeación*

**Dr. Ricardo José Lozano Picón**

*Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible*

**Dr. Emilio José Archila Peñalosa**

*Representante Presidencia de la República*

**Dr. Oscar Felipe Marles Monje**

*Directora General*

*Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)*

**Dr. German José Morales Santos**

*Secretario General (E)*

*Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)*

## COMITÉ DIRECTIVO

**Oscar Felipe Marles Monje**

*Director General*

**German José Morales Santos**

*Secretario General*

**Guillermo López Pérez**

*Subdirector de Agrología*

**Juan David Méndez Niño**

*Subdirector de Geografía y Cartografía*

**Adriana Emilcen Casas Fajardo**

*Subdirector de Catastro (E)*

**Diana Carolina Oviedo León**

*Jefe Oficina Asesora de Planeación*

**Julia Andrea Aranguren Peña**

*Jefe Oficina Asesora Jurídica*

**Alexánder Ariza**

*Jefe Oficina Centro de Investigación y Desarrollo  
de Información Geográfica (CIAF)*

**Jorge Armando Porras Buitrago**

*Jefe Oficina de Control Interno*

**Liliana Morales**

*Jefe Oficina de Informática y Telecomunicaciones*

**César Augusto Bóxiga Sánchez**

*Jefe Oficina Difusión y Mercadeo de Información (E)*

## SUBDIRECCIÓN DE AGROLOGÍA

<i>Subdirector de Agrología</i>	<b>Guillermo López Pérez</b>
<i>Gestión Administrativa y Financiera</i>	<b>Janeth González Nivia</b>
<i>Coordinador GIT Suelos</i>	<b>Napoleón Ordoñez Delgado</b>
<i>Coordinador GIT Modernización</i>	<b>Diego Leonardo Cortes Delgadillo</b>
<i>Coordinador GIT Laboratorio</i>	<b>Jaime Álvarez Herrera</b>

## AUTORES DEL ESTUDIO

<i>Supervisión General</i>	<b>Wilson Fernando Vargas Hernández</b>
<i>Coordinación Técnica</i>	<b>Héctor Jaime López Salgado</b>
<i>Componente Suelos</i>	<b>Wilson Fernando Vargas Hernández</b> <b>Miguel Aponte</b> <b>Héctor Jaime López Salgado</b>
<i>Geomorfología</i>	<b>Jhon Fredy Gutiérrez García</b>
<i>Erosión y Movimientos en Masa</i>	<b>Seiry Soleny Vargas Tejedor</b>
<i>Cobertura de la Tierra</i>	<b>Rubén Darío Romero Hernández</b> <b>Juan Ricardo Mancera Flórez</b>
<i>Clima</i>	<b>Mauricio Mesa Caro</b>
<i>Hidrología</i>	<b>Lina Patricia Bonilla Pérez</b>
<i>Modelamiento y Mapeo Digital</i>	<b>Camilo Andrés Camacho Hilarión</b> <b>Joan Sebastián Gutiérrez Díaz</b> <b>Edwin Francisco Grisales Camargo</b> <b>Héctor Jaime López Salgado</b>

## AUTORES DEL ESTUDIO

*Geomática*

**Claudia Ximena Ospina Torres**  
**Carlos Alberto Zarate Mateus**

*Aplicaciones para Campo*

**Carlos Eduardo Gómez Rico**

*Gestión y Apoyo Documental*

**Lady Marcela Rodríguez Jiménez**  
**Andrea Pilar Sintura Huertas**  
**Edwin Niño Casas**

*Laboratorio de Suelos*

**Juan Gómez Gómez**  
**Harold Eduardo Sabogal Barbosa**  
**Gladys Velandia**  
**Luis Alfredo Lesmes Toro**  
**David Leonardo Cáceres Puentes**  
**María Paula Cruz Bedoya**  
**Francisco Sebastián Guerrero Vivas**  
**Carlos Eduardo Pulido Roa**  
**Marco Antonio Ruiz Gómez**  
**Beatriz Elena Pérez Gallego**  
**Ricardo Antonio Arboleda Montoya**  
**Gregory Steven Puentes Monsalve**  
**Paulina Teresa Villamil Salchar**  
**Guerthy Adriana Stefanía Moreno Sánchez**  
**Jaime Álvarez Herrera**  
**Kevin Alexander Sierra Briñez**  
**Johan Enrique Mercado Duran**  
**Ana María Vásquez Restrepo**  
**María Del Pilar Triana Novoa**  
**Sandra Lisbeth Castro Roa**  
**Gloria Estefany Sánchez Novoa**

# **ESTUDIO DE IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS EROSIVOS EN LA UNIDAD HIDROGRÁFICA DEL RÍO NAVARCO EN EL DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO**

## **INFORME FINAL**

*Convenio Interadministrativo celebrado  
entre La Corporación Autónoma Regional  
del Quindío – CRQ y El Instituto Geográfico  
Agustín Codazzi - IGAC*

**LA CRQ N°. 003 DE 2019  
EL IGAC N°. 5125 DE 2019**

*Diciembre de 2019*



## Tabla de Contenido

1.	PRESENTACIÓN. Proyecto Navarco .....	17
2.	GENERALIDADES. Proyecto Navarco .....	20
2.1	LOCALIZACIÓN Y CONTEXTO GEOGRÁFICO.....	21
3.	CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS PROCESOS EROSIVOS. Proyecto Navarco .....	23
3.1.	INTERPRETACIÓN GEOMORFOLOGÍA. Proyecto Navarco .....	24
3.1.1.	CONTEXTO GEOLÓGICO .....	25
3.1.1.1.	Configuración Tectónica.....	25
3.1.1.2.	Origen y disposición de materiales geológicos .....	25
3.1.2.	MARCO GEOMORFOLÓGICO.....	28
3.1.2.1.	Paisaje de Montaña (M) .....	29
3.1.2.1.1	Ambiente morfogénético denudacional en el paisaje de montaña.....	29
	Loma (ML) .....	29
-	Lomas en alteritas de rocas volcanosedimentarias (MLv) .....	30
-	Lomas en alteritas de rocas metasedimentarias (MLz).....	30
3.1.2.1.2.	Ambiente morfogénético estructural en paisaje de montaña.....	30
-	Fila y viga (MF).....	30
-	Filas y vigas en alteritas de rocas ígneas intrusivas félsicas e intermedias (MFi) .....	32
-	Filas y vigas en alteritas de rocas volcanosedimentarias (MFv).....	32
-	Filas y vigas en alteritas de metamórficas de protolito sedimentario (MFm) .....	32
-	Filas y vigas en alteritas de rocas metamórficas de protolito ígneo-metamórfico (MFg) .....	33
-	Filas y vigas en alteritas de rocas metasedimentarias (MFz) .....	33
3.1.2.1.3.	Ambiente morfogénético deposicional en paisaje de montaña .....	34
-	Abanico terraza (MQ).....	34
-	Terraza fluviovolcánica (MH) .....	35
-	Manto coluvial (MJP).....	36
-	Cono de deyección (MD).....	38
-	Glacis de acumulación (MGP) .....	39
-	Valle estrecho (MV).....	40
-	Vallecito (MZV).....	42
3.2.	CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS. Proyecto Navarco .....	43

SUELOS .....	44
3.2.1. Suelos de la cuenca alta del río Navarco .....	45
3.2.2. Suelos de la cuenca media del río Navarco .....	50
3.2.3. Suelos de la cuenca baja del río Navarco .....	53
3.3 INTERPRETACIÓN MOVIMIENTOS EN MASA Y EROSIÓN. Proyecto Navarco.....	56
3.3.1. MARCO CONCEPTUAL .....	58
3.3.1.1. Componente temático. ....	58
3.3.1.2. Movimientos en masa (MVM).....	58
- Inventario de movimientos en masa.....	58
3.3.1.3. Erosión.....	60
- Erosión Hídrica. ....	61
- Erosión Eólica .....	62
3.3.1.4. Componente metodológico .....	63
- Preprocesamiento de imágenes.....	63
- Interpretación visual de imágenes de sensores remotos. ....	63
- Propiedades pictóricas morfológicas (PPM) aplicadas la identificación de MVM y Erosión.....	64
- Captura de la información (Topología) .....	66
3.3.1.5. Metodología - Interpretación Movimientos en Masa y Erosión .....	67
- Zona de estudio.....	68
- Recopilación y análisis.....	69
- Obtención de insumos .....	73
- Preprocesamiento de imágenes.....	75
3.3.1.6. Generación de capas de MVM y Erosión. ....	77
- Movimientos en Masa.....	77
o Atributos Espaciales. ....	78
- Erosión.....	80
o Atributos Espaciales. ....	80
o Atributos Espaciales Base (Tipo y clase).....	81
o Atributos Espaciales Complementarios .....	81
3.3.1.7. Almacenamiento y calidad de la información.....	82
3.3.1.8. Control de campo.....	83
.....	86

3.3.1.9.	Resultados - Interpretación Movimientos en Masa y Erosión .....	86
3.4	INTERPRETACIÓN COBERTURA DE LA TIERRA. Proyecto Navarco .....	99
3.4.1.	Metodología .....	100
3.4.2.	Insumos .....	100
3.4.3.	Interpretación. ....	102
3.4.4.	Control de Calidad .....	103
3.4.5.	Trabajo de Campo .....	104
3.4.6.	Resultados .....	107
3.4.6.1.	Cobertura de la Tierra Año 2009 .....	107
3.4.6.2.	Cobertura de la Tierra Año 2019 .....	109
3.4.6.3.	Análisis de Cambio. Temporalidad 2010-2019 .....	112
4.	MODELO DE PÉRDIDA DE SUELO. EROSIÓN POTENCIAL / USLE - MUSLE. Proyecto Navarco	119
-	Estimación de la Perdida de Suelos por Erosión Hídrica .....	120
-	Modelo Conceptual .....	120
-	Estimación de la Perdida de Suelos por Erosión Hídrica .....	120
4.1.	MODELO DE PÉRDIDA DE SUELO. FACTOR R – EROSIVIDAD DE LAS LLUVIAS. Proyecto Navarco .....	123
4.1.1.	Introducción .....	124
4.1.2.	Procedimiento .....	126
4.1.3.	Estimación del factor R .....	129
4.1.4.	Resultados .....	129
4.2.	MODELO DE PÉRDIDA DE SUELO. FACTOR LS – PENDIENTE: LONGITUD E INCLINACIÓN. Proyecto Navarco .....	134
4.2.1.	Introducción .....	135
4.2.2.	Factor Longitud de Pendiente, L .....	135
4.2.3.	Metodología General .....	136
4.2.4.	Parámetros de terreno y su relación .....	137
4.2.5.	Metodología .....	138
4.2.6.	RESULTADOS .....	140
4.3.	MODELO DE PÉRDIDA DE SUELO. FACTOR K – ERODABILIDAD DE LOS SUELOS. Proyecto Navarco .....	141
4.3.1.	Factor K (erodabilidad de los suelos) .....	142
4.3.2.	Mapeo Digital de Suelos .....	146

4.3.3.	Desarrollo Modelo K-Cuenca Río Navarco .....	148
4.3.3.1.	Análisis del Factor K por Subcuenca.....	148
4.4.	MODELO DE PÉRDIDA DE SUELO. FACTOR C – COBERTURA DE LA TIERRA Y SU GRADO DE PROTECCIÓN. Proyecto Navarco.....	153
4.4.1.	FACTOR C (Coberturas y su grado de protección).....	154
4.4.1.1.	Aspectos conceptuales a considerar .....	154
4.4.1.2.	Desarrollo Metodológico.....	157
4.4.1.3.	Obtención y Procesamiento de la Información Digital .....	158
4.4.1.4.	NDVI o EVI .....	159
4.4.1.5.	Reclasificación NDVI .....	161
4.4.1.6.	Interpretación De Coberturas De La Tierra .....	163
4.4.1.7.	Cruce Temático Coberturas Vs NDVI.....	164
4.4.1.8.	Estadísticas Zonales.....	164
4.4.1.9.	Resultados .....	167
4.4.1.10.	Limitaciones y Alcances del Modelo .....	169
4.5.	MODELO DE PÉRDIDA DE SUELO. FACTOR P – PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN. Proyecto Navarco .....	172
4.5.1.	Factor P (prácticas de conservación).....	173
5.	ANÁLISIS PROCESOS EROSIVOS. Proyecto Navarco .....	174
5.1.	ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA POTENCIAL DE SUELO POR EROSIÓN (USLE) POR SUBCUENCA 175	
5.2.	ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA POTENCIAL DE SUELO POR EROSIÓN (USLE) POR CLASE DE EROSIÓN .....	176
6.	BIBLIOGRAFIA.....	183

## Lista de Figuras

Figura 1.	Cuenca del río Navarco. Fuente: IGAC, (2019).....	21
Figura 2.	Materiales geológicos de la cuenca del río Navarco. Fuente: IGAC, (2019). .....	27
Figura 3.	Ladera coluvial en alteritas de rocas volcanosedimentarias (MFvG). Vía Calarcá – La Línea. Fuente: Gutiérrez, J. (2019). .....	31
Figura 4.	Filas y vigas en alteritas de rocas metasedimentarias (MFzL) y terraza de valle estrecho nivel 1 (MVP1). Inmediaciones de Canaán. Fuente: Gutiérrez, J. (2019).....	34
Figura 5.	Vista general de la terraza fluviovolcánica (MHP-MHT). Inmediaciones del casco urbano del municipio de Salento. Fuente: Gutiérrez, J. (2019).....	36
Figura 6.	Manto coluvial (MJP). Cuenca media del río Navarco. Fuente: Aponte, M. (2019).....	37
Figura 7.	Cono de deyección (MDP), en contacto con terrazas de valle estrecho (MVP1) y discurriendo desde filas y vigas en alteritas de rocas volcanosedimentarias (MVP1). Cuenca baja del río Navarco. Fuente: Gutiérrez, J. (2019). .....	38
Figura 8.	Glacis de acumulación (MGP) en contacto con terrazas de valle estrecho (MVP1). Cuenca baja del río Navarco. Fuente: Gutiérrez, J. (2019).....	39
Figura 9.	Valle estrecho de montaña con niveles de terraza (MVP1), sobrevega (MVS), en contactos con conos de deyección (MDP), y filas y vigas en alteritas de rocas metasedimentarias (MFzL). Cuenca baja del río Navarco. Fuente: Gutiérrez, J. (2019).....	40
Figura 10.	Contacto entre terraza de valle estrecho nivel 1 y 2 (MVP1 - MVP2). Cuenca baja del río Navarco. Fuente: Gutiérrez, J. (2019). .....	42
Figura 11.	Perfil de suelo 63D0015 Typic Fulvudands, familia cenizal, mezclada, isomésica .....	46
Figura 12.	Ladera cóncava con frecuentes terracetas en la vereda Santa Helena, sector de Ventiaderos	46
Figura 13.	Perfil de suelo 63D0019 Typic Hapludands, familia cenizal, mezclada, isomésica .....	48
Figura 14.	Laderas convexas con pocas terracetas en la vereda La Palmera.....	48
Figura 15.	Cajuela MA-078 Thaptic Hapludands, familia cenizal, isomésica .....	49
Figura 16.	Manto coluvial con micro-relieve ondulado en la vereda La Palmera.....	49
Figura 17.	Perfil de suelo 63D0017 Andic Humudepts, familia francosa gruesa, mezclada, isomésica	50
Figura 18.	Laderas cóncavas con frecuentes terracetas en la vereda El Castillo, finca El Brillante	50

Figura 19.	Perfil de suelo 63D0020 Pachic Humudepts, familia francosa fina, mezclada, isomésica	52
Figura 20.	Figura 20. Taludes de las terrazas fluvio-volcánicas en la vereda Navarco Bajo. ....	52
Figura 21.	Perfil de suelo 63D0021 Typic Humudepts, familia francosa fina, mezclada, isotérmica	54
Figura 22.	Laderas convexas con algunas terracetas en la vereda Navarco Bajo, finca La Rivera.	54
Figura 23.	Corte de suelo que muestra la depositación selectiva de materiales aluvio-coluviales.	55
Figura 24.	Terrazas aluviales del valle estrecho del río Navarco con pedregosidad superficial y al interior del suelo. ....	55
Figura 25.	Factores que intervienen en la interpretación de imágenes de sensores remotos. Elaboración propia con base en (Westen, 2013) .....	64
Figura 26.	Diagrama metodológico .....	68
Figura 27.	Localización área de estudio .....	69
Figura 28.	Planchas geológicas Escala 1:100000 que cubren la zona de estudio. ....	70
Figura 29.	Capa de geomorfología aplicada a levantamiento de suelos Metodología (IGAC, 2017)	71
Figura 30.	Leyenda Geomorfológica aplicada a levantamiento de suelos Metodología (IGAC, 2017).	71
Figura 31.	Capa de coberturas. Metodología Corine Land Cover .....	72
Figura 32.	Capa de Suelos. (IGAC, 2013) .....	73
Figura 33.	Detalle Insumos principales empleados en la captura de MVM y Erosión .....	74
Figura 34.	Insumos apoyo empleados en la captura de MVM y Erosión.....	75
Figura 35.	Estación de trabajo para la captura de información con estereoscopia digital.....	76
Figura 36.	Esquema ilustrativo de los bloques fotogramétricos empleados para la interpretación estereoscópica digital.....	76
Figura 37.	Parte de un MVM tipo deslizamiento. Fuente (PMA:GCA, 2007) .....	77
Figura 38.	Partes de un MVM tipo flujo. Fuente: elaboración propia con base (SGC, 2017) .....	78
Figura 39.	Estructura de almacenamiento de la información capturada. Proyecto Navarco.....	83
Figura 40.	Formato de captura de información de movimientos en masa y erosión. Proyecto Navarco	85

Figura 41. Puntos geográficos donde fue capturada la información en campo. Proyecto Navarco. 86

Figura 42. Inventario de movimientos en masa en la Zona de estudio. .... 88

Figura 43. Numero de Movimientos en masa por edad relativa. Zona de estudio ..... 89

Figura 44. MVM antiguos identificados en los periodos de tiempo interpretados (Años 2009 y 2019). Zona de estudio..... 89

Figura 45. .MVM antiguo. Zona de estudio. a) Fotografía zona de estudio- MVM antiguo b) Imágenes Cámara Vexcel - Composición en Verdadero color. Fotografías: Seiry Vargas 2019..... 89

Figura 46. MVM recientes identificados en los periodos de tiempo interpretados (Años 2009 y 2019). Zona de estudio. Fotografías aéreas- Cámara Vexcel años 2009 y 2019. Composición en Verdadero color. .... 90

Figura 47. MVM Reciente, identificado en los insumos del periodo 2019. Zona de estudio. a) Fotografía zona de estudio- MVM Reciente b) Imágenes Cámara Vexcel - 2019 - Composición en Verdadero color. Fotografías: Seiry Vargas 2019..... 90

Figura 48. MVM Relictos identificados en los periodos de tiempo interpretados (Años 2009 y 2019). Zona de estudio. Fotografías aéreas- Cámara Vexcel años 2009 y 2019. Composición en Verdadero color. .... 91

Figura 49. Distribución de los MVM por edad relativa y asociación. Zona de estudio. .... 91

Figura 50. Porcentaje (%) de distribución de atributos base y complementarios para los años 2009 y 2019. Zona de estudio. .... 93

Figura 51. Ejemplo atributos complementarios sin evidencia. Zona de estudio. Atributo complementario: Sin evidencia a) Fotografías zona de estudio donde se observan Bosques y Vegetación secundaria b) Imágenes Cámara Vexcel - Composición en Verdadero color. Fotografías: Jaime López 2019 ..... 93

Figura 52. Porcentaje (%) de distribución por clase de erosión para los años 2009 y 2019. Zona de estudio. 95

Figura 53. Zonificación de la erosión para los años 2009 y 2019. Zona de estudio. .... 96

Figura 54. Ejemplos clases únicas en erosión. Zona de estudio..... 97

Figura 55. Ejemplos clases combinadas de erosión. Zona de estudio. .... 98

Figura 56. Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Fuente. Insumos suministrados por la Subdirección de Cartografía IGAC, 2019..... 101

Figura 57. Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Fuente. Insumos suministrados por la Subdirección de Cartografía IGAC, 2019..... 102

Figura 58. Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Adaptado y modificado de: (Ministerio de Ambiente, IDEAM & Cormagdalena, 2008)..... 104

Figura 58. Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019. .... 105

Figura 59. Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019. .... 106

Figura 60. Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019. .... 107

Figura 61. Porcentaje de cubrimiento de coberturas año 2009. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019..... 108

Figura 62. Mapa de coberturas de la tierra año 2019. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019..... 110

Figura 63. Porcentaje de cubrimiento de coberturas año 2019. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019..... 110

Figura 64. Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019. .... 112

Figura 65. Dinámica de cambio coberturas representativas 2010-2019. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019. .... 113

Figura 66. Modelo de pérdida potencial de suelos por erosión. .... 121

Figura 67. Distribución decadiaria de la precipitación en 8 estaciones meteorológicas de la microcuenca del río Navarco y sus alrededores. .... 131

Figura 68. Distribución del factor R de erosividad en la microcuenca de Río Navarco ..... 133

Figura 69. Modelo Digital de Elevación (DEM) sobre la cuenca del Río Navarco. .... 137

Figura 70. Modelo físico para la estimación del Factor LS en Model Builder. .... 140

Figura 71. Representación de la distribución del factor LS sobre la cuenca del Río Navarco..... 140

Figura 72. Textura de los suelos en laboratorio..... 143

Figura 73. Textura de los suelos Hapludands en campo..... 143

Figura 74. Estabilidad de agregados vs tipo de estructura de campo. .... 144

Figura 75. Triangulo textural y permeabilidad. Fuente..... 146

Figura 76. La validación del modelo se realizó empleando el algoritmo de árboles de regresión por cuantiles (Vaysse y Lagacherie, 2017). La correlación entre valores observados y predichos fue de 73%. 148

Figura 77. Histograma de erodabilidad de suelo por subcuenca del área de estudio..... 150

Figura 78. Clasificación de subcuencas con relación a factor K modelado. Las letras iguales representan subcuencas que no difieren estadísticamente en sus valores de K. .... 151

Figura 79. Distribuciones de las observaciones de suelos de campo ..... 152

Figura 80. Flujo de proceso para la obtención del factor C. .... 157

Figura 81. ModelBuilder de ArcGis para calcular NDVI. Fuente. Esri, 2019..... 160

Figura 82. NDVI de la cuenca del Río Navarco. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019..... 160

Figura 83. Flujo de proceso para cálculo de NDVI de la cuenca del Río Navarco Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019..... 161

Figura 84. Flujo de proceso para cálculo de NDVI de la cuenca del Río Navarco. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019..... 163

Figura 85. Flujo de trabajo para la generación del mapa de coberturas de la tierra. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019..... 163

Figura 86. Flujo de trabajo estadísticas zonales. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019..... 164

Figura 87. Flujo de toma de la información con la app Canopeo. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019. .... 166

Figura 88. Valores de factor C para el periodo 2009. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019..... 167

Figura 89. Correlación Factor C – NDVI. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019..... 169

Figura 90. Correlación Factor C teórico Vs Ajustado..... 170

Figura 91. Valores de factor C para el periodo 2009. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019..... 171

Figura 92. Clasificación de subcuencas con relación a pérdida potencial de suelo por erosión. Las letras iguales representan subcuencas que no difieren estadísticamente..... 176

Figura 93. Pérdida potencial de suelo por erosión 2019. .... 181

## Lista de Tablas

Tabla 1.	Actividades propuestas para el cumplimiento del objeto. ....	19
Tabla 2.	Agrupación de materiales geológicos presentes en la cuenca del río Navarco, según metodología IGAC y basada en la cartografía geológica del SGC. (*Los símbolos son los mismos que se encuentran plasmados en la cartografía geológica).....	26
Tabla 3.	Leyenda de unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio. ....	28
Tabla 4.	Distribución del ambientes morfogénéticos de montaña en la cuenca en la cuenca del río Navarco.	29
Tabla 5.	Tipos de inventarios de movimientos en masa. Elaboración propia con base en (SGC, 2017)	59
Tabla 6.	Principales atributos de los inventarios de movimientos en masa. Elaboración propia con base en (SGC, 2017).....	59
Tabla 7.	Consideraciones para establecer la edad relativa de un movimiento en masa según (SGC, 2017)	60
Tabla 8.	Clases de erosión hídrica. Elaboración propia con base en (IDEAM, U.D.C.A, 2015) ...	61
Tabla 9.	Clases de erosión eólica. Elaboración propia con base en (IDEAM, U.D.C.A, 2015). ....	62
Tabla 10.	Grados de erosión. Elaboración propia con base en (IDEAM, U.D.C.A, 2015). ....	62
Tabla 11.	Propiedades pictórico - morfológicas para interpretación visual de sensores remotos.	64
Tabla 12.	.Reglas de interpretación de asociación para identificar movimientos en masa. (Chang & Liu, 2005)	65
Tabla 13.	Reglas de interpretación de asociación para identificar erosión. Elaboración propia construido a partir de (Bergsma, 1989), (Varela, 1982) e (IDEAM, U.D.C.A, 2015) .....	65
Tabla 14.	Reglas topológicas aplicadas a las capas de erosión y MVM. Proyecto Navarco. Elaboración propia Construido a partir de (ESRI).....	67
Tabla 15.	Características Imágenes de sensores remotos plataformas aerotransportadas utilizadas en el proyecto Navarco .....	74
Tabla 16.	Características Imágenes de sensores remotos plataformas satelitales utilizadas en el proyecto Navarco .....	74
Tabla 17.	Leyenda para la captura de MVM en el proyecto Navarco.....	78

Tabla 18.	Leyenda para la captura de erosión en el proyecto Navarco.....	81
Tabla 19.	Reglas topológicas aplicadas a las capas de MVM y Erosión. Proyecto Navarco.....	83
Tabla 20.	Información mínima para el diseño del formulario de captura de información de campo. Fuente: elaboración propia con base en (IDEAM, U.D.C.A, 2015).....	84
Tabla 21.	Numero de eventos registrados en el SIMMA para el municipio de Salento. Fuente: Elaboración propia con base en (SGC) .....	86
Tabla 22.	Información del inventario de MVM reportado en el área de estudio de acuerdo al SIMMA. Fuente: Elaboración propia con base en (SGC) .....	87
Tabla 23.	Distribución por los atributos establecidos para el inventario de MVM para los años 2009 y 2019. Zona de estudio. ....	91
Tabla 24.	Distribución de los atributos establecidos para la capa de erosión para los años 2009 y 2019. Zona de estudio.....	92
Tabla 25.	.Distribución de las clases de erosión para los años 2009 y 2019. Zona de estudio....	94
Tabla 26.	Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. ....	103
Tabla 27.	Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. ....	104
Tabla 28.	Coberturas de la tierra del Departamento del Quindío (Metodología CLC-Colombia). Esc 1:10.000. Año 2009. ....	108
Tabla 29.	Coberturas de la tierra del Departamento del Quindío (Metodología CLC-Colombia). Esc 1:10.000. Año 2019. ....	111
Tabla 30.	Leyenda de coberturas de la tierra para el departamento del Quindío. ....	114
Tabla 31.	Estaciones meteorológicas consideradas para el cálculo de la erosividad y la variación temporal de las lluvias en la microcuenca Río Navarco, municipio de Salento región nororiental del departamento de Quindío.....	125
Tabla 32.	Clasificación de la erosividad de las lluvias .....	127
Tabla 33.	Valores de referencia del Índice de Fournier (IF) para áreas montañosas tropicales	127
Tabla 34.	Calificación del índice modificado de Fournier (IMF).....	128
Tabla 35.	Clasificación del Índice de concentración de la precipitación (ICP), Fuente: (UNESCO, 2006)	128
Tabla 36.	Clasificación de la erosividad de las lluvias propuesta para la zona cafetera colombiana.	129

Tabla 37. Valores promedios del Índice de Fournier Anual (IFA), Índice Modificado de Fournier (IMF) e Índice de Concentración de las Precipitaciones (ICP) en 8 estaciones meteorológicas en la microcuenca del río Navarco y su área de influencia. ....	130
Tabla 38. Precipitación media mensual y anual en 8 estaciones de la microcuenca del río Navarco y sus alrededores. ....	131
Tabla 39. Valor del Índice de Concentración de la Precipitación (ICP) promedio mensual y anual en las ocho estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.....	132
Tabla 40. Valores del factor R anual en MJ . mm . ha-1, estimado utilizando el Índice Modificado de Fournier (IMF ) promedio mensual, en 8 estaciones meteorológicas de la microcuenca del río Navarco y sus alrededores.....	132
Tabla 41. Ecuaciones para la estimación del factor LS .....	136
Tabla 42. Descripción de Herramientas de Geoprosesamiento en Arcgis. ....	138
Tabla 43. Estadísticas zonales del factor K por subcuencas delimitadas en el área de estudio. ....	149
Tabla 44. Lista de insumos principales empleados.....	158
Tabla 45. Coeficientes de efecto de suelo desnudo Wissemeyer y Foster, (1982) .....	170
Tabla 46. Valores de P. Fuente Wischmeyer (1978), citado por Mancilla 2008 .....	173
Tabla 47. Estadísticas zonales de la pérdida potencial de suelo por erosión por subcuencas delimitadas en el área de estudio. ....	175
Tabla 48. Pérdida potencial de suelo por erosión de acuerdo a clases determinadas mediante fotointerpretación.....	177
Tabla 49. Pérdida potencial de suelo por erosión de acuerdo a clases determinadas mediante fotointerpretación, en cada subcuenca de la zona de estudio. ....	178
Tabla 50. Calificación de la pérdida potencial de suelos. Sector río Navarco .....	181

---

## 1. PRESENTACIÓN. Proyecto Navarco

---

Subdirección de Agrología

---

---

---

La Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ), es un ente corporativo de carácter público, creado por la Ley 66 de 1964, modificado por la Ley 99 de 1993; la cual por la misma Ley 99 de 1993, delegó funciones a las Corporaciones Autónomas Regionales, entre otras, de promover actividades y programas de protección ambiental, de desarrollo sostenible y de manejo adecuado de los recursos naturales con la participación comunitaria, ejecutar, administrar, operar y mantener en coordinación con las entidades territoriales, proyectos programas de desarrollo sostenible y actividades de infraestructura, cuya realización sea necesaria para la defensa y protección, o para la descontaminación o recuperación del medio ambiente.

El Plan de Gestión Ambiental Regional (PGAR 2012 - 2019) tiene dentro de sus líneas estratégicas la línea estratégica 1: denominada: “Gestión Integral del Recurso Hídrico”, cuyo objetivo General es: garantizar la oferta hídrica en cantidad y calidad suficientes para la satisfacción de las necesidades sociales, económicas y naturales, maximizando en forma equilibrada los beneficios de la disponibilidad del recurso.

La Corporación Autónoma Regional del Quindío - CRQ, incluyó en la formulación del Plan de Acción Institucional PAI para el período 2016-2019, el proyecto 1, denominado: Planificación para la gestión integral del recurso hídrico, el cual tiene dentro de sus metas (meta 4) Ejecutar el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico del río Quindío (PORH-Río Quindío).

En la fase diagnóstica para la formulación del PORH – Río Quindío, al realizar las evaluaciones de calidad físicoquímica de la corriente en diferentes tramos, se detectó que la unidad hidrográfica del río Navarco presenta altas concentraciones de sólidos suspendidos totales SST, muy posiblemente debida a las actividades antrópicas que se desarrollan en dicha unidad hidrográfica, y que pueden estar generando procesos erosivos que aportan los sedimentos a la corriente; motivo por el cual se consideró necesario incluir dentro del componente programático del PORH Río Quindío, la realización de un estudio de evaluación de áreas de suelos degradados, producción y transporte de sedimentos.

Considerando lo anterior se hizo necesario realizar un estudio de identificación, caracterización y especialización cartográfica a escala apropiada (1:10.000) de los procesos erosivos en la unidad hidrográfica del Río Navarco en el municipio de Salento, departamento del Quindío.

En esa medida, y atendiendo la necesidad que tiene la Corporación Autónoma Regional del Quindío, se realizó un convenio interadministrativo con una institución con idoneidad y experticia en la elaboración de este tipo de estudios y en la elaboración de cartografía básica, como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), que permita aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para levantar el ortofotomosaico y realizar el estudio de procesos erosivos en la unidad hidrográfica del Río Navarco, jurisdicción del municipio de Salento en el Departamento del Quindío.

El objeto consiste en “Aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, para realizar un estudio de identificación de procesos erosivos en la unidad hidrográfica del Río Navarco en el Departamento del Quindío”; y el alcance del objeto es elaborar un estudio de los procesos erosivos en la cuenca del río Navarco, municipio de Salento del departamento del Quindío a escala 1:10.000 requeridos

como insumo para la línea base, el diagnóstico y ordenamiento en los diferentes instrumentos de planificación y ordenamiento integral del territorio.

Las actividades realizadas para el cumplimiento del objeto se indican en la Tabla 1:

Tabla 1. **Actividades propuestas para el cumplimiento del objeto.**

ACTIVIDAD	SUBACTIVIDAD	PROCESO
1. Generar el ortofoto mosaico de la unidad hidrográfica del Río Navarco.	Toma o adquisición de fotografía aérea o imagen satelital	Imágenes par estéreo
	Control terrestre	Imágenes fotográficas con entidades geográficas (puntos) con relación de coordenadas.
	Aerotriangulación	Aerofotografías ajustadas
2. Realizar un estudio de identificación de procesos erosivos	Fotointerpretación de imágenes aéreas	Geomorfología 2019
		Movimientos en masa 2009 2019
		Erosión 2009 2019
		Cobertura y Uso 2009 2019
	Salidas de campo	Diseño muestreo campo suelos
		Socialización
		Suelos y calicatas
		Geomorfología, Erosión y Movimientos en Masa
		Cobertura y Uso
	Análisis muestras en laboratorio	Análisis
	Modelación de procesos erosivos con base en la ecuación universal de la erosión	R (clima)
		LS (longitud y grado inclinación de la pendiente)
		K (suelos, movimientos en masa, erosión y geomorfología)
		P (prácticas de manejo)
		C (cobertura y uso)
		Modelación $R * LS * K * C * P$
Mapas e informe final		
Entrega a la CRQ		

---

## 2. GENERALIDADES. Proyecto Navarco

---

Subdirección de Agrología

---

---

## 2.1 LOCALIZACIÓN Y CONTEXTO GEOGRÁFICO

La cuenca del río Navarco se ubica sobre la vertiente occidental de la Cordillera Central, cuenta con una extensión aproximada de 8.422 hectáreas y cubre principalmente territorios del municipio de Salento en el departamento de Quindío (Figura 1).

El área de estudio se distribuye sobre altitudes que varían desde los 1.670 m.s.n.m., en cercanías de la desembocadura del río Navarco sobre las aguas del río Quindío, hasta los 4.100 m.s.n.m. en límites entre los municipios de Salento (Quindío) y Cajamarca (Tolima). La cuenca se encuentra en su totalidad sobre el paisaje de montaña y presenta un clima predominantemente frío húmedo, con transiciones desde templado húmedo hasta muy frío húmedo, IDEAM (2014).

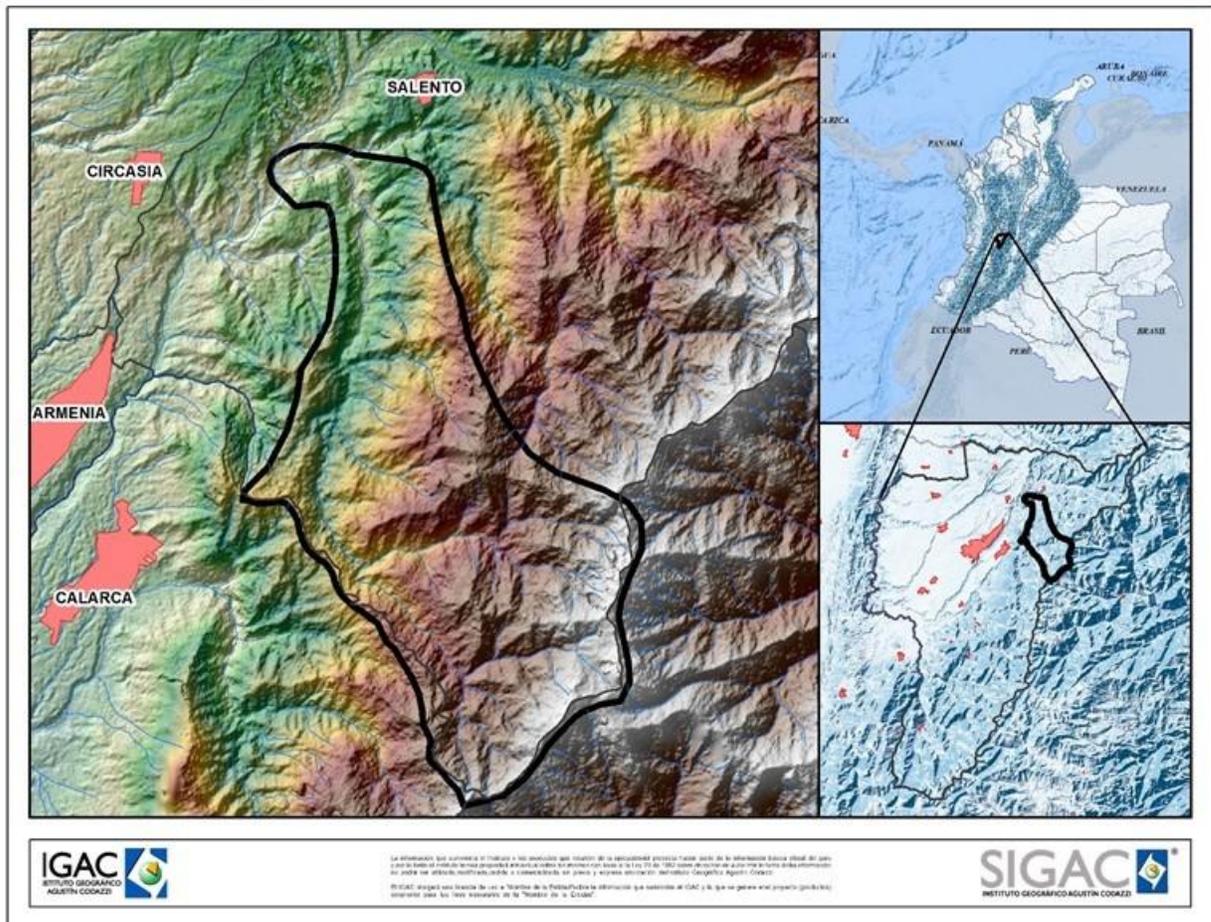


Figura 1. Cuenca del río Navarco. Fuente: IGAC, (2019).

Los principales afluentes del río Navarco son las quebradas La Mina, La Vaca, Los Patos, Manizales, San Julián, Santa Librada, Venus y el río Boquerón. Estas corrientes son

captadas por el río Navarco hasta desembocar en el río Quindío en inmediaciones del sector conocido como Canaán.

La cuenca del río Navarco se encuentra conformada mayoritariamente por relieves estructurales tallados sobre materiales volcanosedimentarios, metamórficos de origen sedimentario, metasedimentarios, intrusivos félsicos y en menor medida sobre metamórficos de origen ígneo-metamórfico, relacionados con las dinámicas internas de la tierra que dieron origen al levantamiento de la Cordillera Central. Sobre estos materiales, fueron ejercidos procesos de compresión, fractura y plegamiento originando tipos de relieve característicos como las filas y vigas, y otros de carácter denudacional como las lomas.

Los relieves deposicionales, se distribuyen de manera heterogénea sobre el área de estudio, y están asociados a procesos aluviales, coluviales, fluviovolcánicos y torrenciales, relacionados directamente a las dinámicas externas de la tierra, como la precipitación, gravedad y fusión de masas glaciares producto de las erupciones de los cuerpos volcánicos de la Cordillera Central, así como a los deshielos producidos por el fin del último periodo glacial hace aproximadamente 11.000 años.

En general, sobre la cuenca se distribuyen de manera irregular mantos discontinuos de ceniza volcánica de distinto espesor, generando en ocasiones el suavizado del relieve preexistente.

---

### **3. CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS PROCESOS EROSIVOS. Proyecto Navarco**

---

Subdirección de Agrología

---

---

---

### **3.1. INTERPRETACIÓN GEOMORFOLOGÍA. Proyecto Navarco**

---

Subdirección de Agrología

---

Jhon Fredy Gutiérrez García

---

### 3.1.1. CONTEXTO GEOLÓGICO

La configuración tectónica, origen y disposición de los materiales geológicos que componen la cuenca del río Navarco, están ligados a los procesos de formación de la Cordillera Central, los cuales involucran la formación de corteza terrestre debido al emplazamiento de arcos volcánicos, la unión de fragmentos de corteza oceánica al continente, eventos volcánicos, ascenso de material magmático y procesos de sedimentación marina y continental, que originaron diversos materiales, que a su vez fueron transformados por plegamiento, fractura, presión y altas temperaturas.

Para la descripción tectónica, el origen y disposición de estos materiales, se tomó como insumo principal la cartografía geológica de escala 1:100.000 elaborada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), con sus respectivas memorias explicativas, entre otros.

#### 3.1.1.1. Configuración Tectónica

El territorio colombiano se encuentra ubicado sobre un margen convergente, en el cual las placas tectónicas de Nazca (oceánica) y Suramericana (continental) convergen o chocan entre sí, formando una zona de subducción en la que la placa de Nazca al ser más densa y pesada, se dobla y se hunde por debajo de la placa Suramericana hacia el interior de la tierra donde es fundida.

Esta zona de subducción facilitó la formación de la Cordillera Central, pues a través de la creación de arcos volcánicos y ascensos de grandes cantidades de magma, permitieron la formación y engrosamiento de la corteza terrestre. Estos cuerpos volcánicos aportaron materiales que se mezclaron con las rocas preexistentes y en formación, generando gran diversidad de materiales durante la evolución de la cordillera.

Este choque de placas tectónicas (Nazca con desplazamiento hacia el oriente y Suramericana hacia el occidente), generó esfuerzos horizontales que deformaron, fracturaron y plegaron la corteza terrestre, mientras las altas temperaturas y la fuerte presión producida en el proceso de fusión de las placas, transformaron la composición física y química de las rocas preexistentes.

Evidencia de estos esfuerzos son las fallas de Aranzazu – Manzanares, Campanario, Navarco, Palestina, San Jerónimo y Silvia – Pijao, la mayoría con orientación general noreste (NE) y perpendicular a los esfuerzos compresivos producidos por la convergencia de las placas. En algunos casos, estas fallas o fracturas de la corteza terrestre representan límites claros en la disposición de los materiales geológicos.

#### 3.1.1.2. Origen y disposición de materiales geológicos

Como se mencionó anteriormente, la variedad de materiales geológicos en la cuenca del río Navarco es bastante importante, debido a la evolución misma de la Cordillera Central, a la actividad volcánica y a los cambios climáticos desde el Pleistoceno.

El origen, disposición y composición de los materiales geológicos es un aspecto muy importante en la elaboración de estudios de suelos, ya que son estas características litológicas junto con otros factores (clima, relieve, tiempo y organismos), los que permiten la formación de diferentes tipos de suelos; es decir, aquellos formados sobre alteritas de rocas extrusivas máficas, no tendrán las mismas propiedades físicas y químicas de los originados a partir de alteritas de rocas volcanosedimentarias, o metamórficas de protolito sedimentario.

De esta manera la metodología IGAC (M40700-02 de 2017) “Elaboración de cartografía geomorfológica aplicada a levantamientos de suelos” y la guía IGAC (G4700-04 de 2018) “Interpretación de materiales geológicos a partir de sensores remotos para la cartografía geomorfológica aplicada a los levantamientos de suelos”, permitieron la descripción y agrupación de los materiales geológicos según la composición y origen de las rocas presentes en el área de estudio.

Una vez agrupados los materiales geológicos, se le asignó como información adicional un campo que denota la dominancia de la roca tipo de cada formación, junto con un atributo que permite diferenciar en la capa de geomorfología los tipos de relieve según su material.

La Tabla 2 muestra la agrupación de materiales hechas para los levantamientos de suelos según metodología IGAC, desde las unidades geológicas recientes hasta las más antiguas, tomando como referencia las planchas geológicas del Servicio Geológico Colombiano 224 Pereira (1984), 243 Armenia (1985) y 244 Ibagué (1982), junto con sus respectivas memorias explicativas.

Tabla 2. **Agrupación de materiales geológicos presentes en la cuenca del río Navarco, según metodología IGAC y basada en la cartografía geológica del SGC. (\*Los símbolos son los mismos que se encuentran plasmados en la cartografía geológica)**

SÍMBOLO*	FORMACIÓN	MATERIAL GEOLÓGICO	SÍMBOLO MATERIAL GEOLÓGICO	ORIGEN	EDAD	DOMINANCIA
<b>Qto - Qp</b>	Depósitos Piroclásticos	Sedimentos clásticos aluviales		Sedimentación fluvial, volcánica, fluviovolcánica y glaciovolcánica	Cuaternario	Materiales aluviales de todos los tamaños
<b>Qflv</b>	Flujos de Lodo Volcánico	Sedimentos clásticos aluviales				
<b>Tqa</b>	Formación Armenia	Sedimentos clásticos aluviales				
<b>Ta</b>	Pórfido Andesítico	Alteritas de rocas ígneas intrusivas félsicas e intermedias	<b>i</b>	Intrusiones magmáticas	Neógeno	Dacitas y andesitas
<b>Tad</b>	Rocas Hipoabisales				Paleógeno	
<b>Tkcd - Ktcd</b>	Complejo Ígneo del Río Navarco				Cretácico	Cuarzodioritas y dioritas
<b>Kis - Ksc - Kq</b>	Formación Quebradagrande (Miembro sedimentario)	Alteritas de rocas metasedimentarias	<b>Z</b>	Rocas sedimentarias marinas transformadas por efectos cataclásticos	Cretácico	Grawacas, chert, limolitas y lutitas
<b>Kv - Kvc - Kqv - Kqs</b>	Formación Quebradagrande (Miembro volcánico)	Alteritas de rocas volcanosedimentarias	<b>V</b>	Intercalación de rocas sedimentarias marinas con basaltos, diabasas	Cretácico	Basaltos, diabasas y rocas metasedimentarias

SIMBOLO	FORMACIÓN	MATERIAL GEOLÓGICO	SIMBOLO MATERIAL GEOLÓGICO	ORIGEN	EDAD	DOMINANCIA
<b>Pin</b>	Intrusivo Néisico de La Línea	Alteritas de rocas metamórficas de protolito ígneo - metamórfico	<b>g</b>	Rocas ígneas intrusivas transformadas por presión y temperatura	Pérmico - Triásico	Cuarzodioritas y granodioritas con orientación y estructura néisica
<b>ev</b>	Grupo Cajamarca (Esquistos verdes)	Alteritas de rocas metamórficas de protolito sedimentario	<b>m</b>	Sedimentos marinos, rocas ígneas básicas y ceniza volcánica transformada por de baja presión y temperatura	Pérmico - Triásico	Esquistos verdes
<b>es</b>	Grupo Cajamarca (Esquistos y filitas)			Sedimentos pelíticos carbonosos y areniscas cuarcíticas transformados por baja presión y temperatura		Esquistos y filitas
<b>PCAa</b>	Neises y Anfibolitas de Tierradentro	Alteritas de rocas metamórficas de protolito ígneo - metamórfico	<b>g</b>	Areniscas intruídas por rocas ígneas básicas y transformadas por temperatura y baja presión	Precámbrico	Neises y anfibolitas

La cuenca del río Navarco está compuesta en su mayoría por alteritas de rocas volcanosedimentarias, con cerca del 34% del área, mientras las alteritas de rocas metamórficas de protolito sedimentario, de rocas metasedimentarias e ígneas intrusivas félsicas ocupan cerca del 16% cada una. Las alteritas de rocas metamórficas de protolito ígneo-metamórfico ocupan cerca del 6% y los depósitos en general ocupan el 11% del área.

Estos materiales (Figura 2) se encuentran orientados en fajas con orientación noreste (NE); y sus contactos están definidos por numerosos sistemas de fallas en esta misma dirección; mientras los depósitos se distribuyen de manera heterogénea en la cuenca, los de mayor extensión y expresión geomorfológica se encuentran asociados principalmente a los ríos Navarco y Quindío.

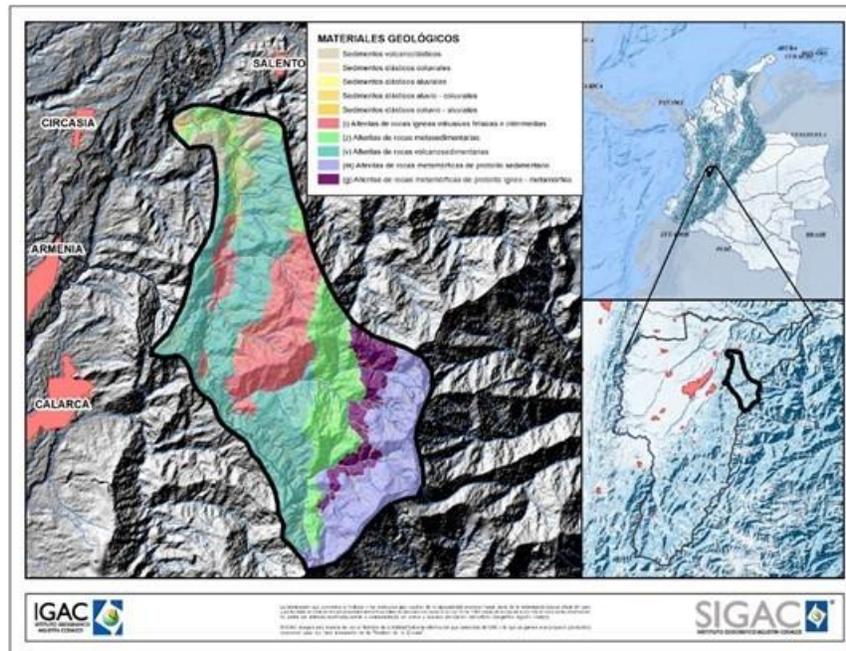


Figura 2. **Materiales geológicos de la cuenca del río Navarco. Fuente: IGAC, (2019).**

### 3.1.2. MARCO GEOMORFOLÓGICO

La cuenca del río Navarco se encuentra en su totalidad sobre el paisaje de montaña, asociado directamente a la formación de la Cordillera Central, desde Triásico - Jurásico (hace más o menos 250 millones de años), producto del emplazamiento de arcos volcánicos, ascenso de material magmático, acreción de terrenos de corteza oceánica y sedimentación marina (Flórez, 2003), que configuraron a través de procesos estructurales y denudacionales un relieve quebrado a ondulado con diversos materiales geológicos, que han sido recubiertos en algunos sectores por depósitos de origen torrencial, coluvial, fluvivolcánico y mantos discontinuos de ceniza volcánica, provenientes de los cuerpos volcánicos de la Cordillera Central.

Teniendo en cuenta estos aspectos conceptuales, por medio de la metodología IGAC “Elaboración de cartografía geomorfológica aplicada a levantamientos de suelos”, la cual consiste en un sistema taxonómico jerarquizado, en niveles categóricos que van de menor a mayor detalle, se logró determinar los distintos tipos de relieve, materiales geológicos y formas de terreno que componen las áreas de estudio (Tabla 3), siempre apoyados en la guía "Glosario de términos geomorfológicos aplicados a levantamientos de suelos", y la “Leyenda nacional de interpretación geomorfológica aplicada a levantamientos de suelos”.

Tabla 3. **Leyenda de unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio.**

PAISAJE	AMBIENTE MORFOGENÉTICO	TIPO DE RELIEVE	MATERIALES GEOLÓGICOS	FORMA DE TERRENO	SÍMBOLO
Montaña	Denudacional	Loma	Alteritas de rocas volcanosedimentarias	Ladera	MLvL
			Alteritas de rocas metasedimentarias	Ladera	MLzL
	Estructural	Fila y viga	Alteritas de rocas ígneas intrusivas félsicas e intermedias	Ladera	MFIL
				Ladera coluvial	MFIG
			Alteritas de rocas volcanosedimentarias	Ladera	MFvL
				Ladera coluvial	MFvG
			Alteritas de rocas metamórficas de protolito sedimentario	Ladera	MFmL
			Alteritas de rocas metamórficas de protolito ígneo - metamórfico	Ladera	MFgL
	Alteritas de rocas metasedimentarias	Ladera	MFzL		
		Ladera coluvial	MFzG		
	Deposicional	Abanico terraza	Sedimentos clásticos aluviales	Cuerpo	MQP
				Talud	MQT
		Terraza fluvivolcánica	Sedimentos volcánoclasticos	Plano de terraza ondulado	MHO
				Talud	MHT
		Manto coluvial	Sedimentos clásticos coluviales	Cuerpo	MJP
		Cono de deyección	Sedimentos clásticos aluviales	Cuerpo	MDP
		Glacis de acumulación	Sedimentos clásticos coluvio - aluviales	Cuerpo	MGP
		Valle estrecho	Sedimentos clásticos aluvio - coluviales	Vega	MVV
Sobrevega	MVS				
		Barra longitudinal	MVB		

			Plano de terraza 1	MVP1
			Plano de terraza 2	MVP2
		Vallecito	Bajo	MVPD
			Vega	MZV

### 3.1.2.1. Paisaje de Montaña (M)

Es aquella porción de la superficie terrestre de topografía elevada y quebrada, constituida por una gran diversidad de materiales geológicos, que fueron deformados, plegados, fracturados y levantados hasta miles de metros con relación a los paisajes adyacentes.

Una vez constituido el paisaje de montaña (Tabla 4) gracias a las dinámicas internas de la tierra, sobre este empezaron a actuar dinámicas externas como la denudación, transporte y sedimentación, configurando ambientes morfogenéticos denudacionales, estructurales y deposicionales que dieron origen a los tipos de relieve característicos del área de estudio.

Tabla 4. *Distribución del ambientes morfogenéticos de montaña en la cuenca en la cuenca del río Navarco.*

AMBIENTE MORFOGENÉTICO	AREA CUENCA (ha.)	%
Estructural	7.415	88
Deposicional	990	11
Denudacional	16	1

#### 3.1.2.1.1 Ambiente morfogenético denudacional en el paisaje de montaña

El ambiente denudacional corresponde al medio biofísico en el cual las geoformas son el resultado de la acción principal de los procesos de meteorización, erosión y remoción de materiales por efecto del agua, el hielo, el viento y la gravedad. Los tipos de relieve que componen el ambiente denudacional en el paisaje de montaña serán descritos a continuación.

##### ➤ Loma (ML)

Tipo de relieve que corresponde a una elevación natural de terreno con altura menor a 100 metros con respecto a su nivel de base local, que presenta una configuración alargada, cimas amplias y redondeadas. El patrón de la red de drenaje varía en función del tipo de material geológico sobre el cual se desarrolla la unidad, aunque es el patrón dendrítico el más característico.

Su origen está relacionado con la acción prolongada de los procesos denudacionales (meteorización, erosión y remoción en masa), sobre el paisaje de montaña durante periodos prolongados de estabilidad tectónica y climática, iniciando así un proceso de nivelación del relieve preexistente por medio de la erosión.

Se reconoció la ladera de loma como única forma de terreno en este tipo de relieve.

**Ladera (MLL):** forma de terreno constituida por una superficie inclinada que corresponde a la parte intermedia o flanco de la loma. Presenta perfil topográfico rectilíneo-cóncavo, de forma compleja y longitud corta.

Este tipo de relieve ocupa una extensión aproximada de 16 *ha* y se encuentra sobre dos materiales geológicos que serán descritos a continuación.

- **Lomas en alteritas de rocas volcanosedimentarias (MLv)**

Fueron identificadas en la cuenca baja del río Navarco, ocupando una extensión aproximada de 7 *ha*. Este tipo de relieve fue modelado sobre materiales de alteración de basaltos, diabasas y rocas metasedimentarias de la formación Quebradagrande, producto de la compactación de sedimentos marinos y aportes volcánicos durante la formación de la Cordillera Central. Presentan cimas cortas-convexas no cartografiables y laderas moderadas de forma irregular con las siguientes pendientes:

- Ladera fuertemente inclinada (12 - 25%); MLvLd.

- **Lomas en alteritas de rocas metasedimentarias (MLz)**

Fueron identificadas en la cuenca baja del río Navarco, ocupando una extensión aproximada de 9 *ha*. Se encuentran sobre materiales de alteración de grawacas, chert, limolitas y lutitas de la Formación Quebradagrande, y son producto de la transformación por efectos cataclásticos de sedimentos marinos. Presentan cimas cortas-convexas no cartografiables y laderas cortas de forma irregular con las siguientes pendientes:

- Ladera fuertemente inclinada (12 - 25%); MLzLd.
- Ladera moderadamente escarpada (25 - 50%); MLzLe.

**3.1.2.1.2. Ambiente morfogenético estructural en paisaje de montaña**

Este ambiente es caracterizado principalmente por las dinámicas internas de la tierra que esculpieron sobre materiales ígneos intrusivos, ígneos extrusivos, volcanosedimentarios, metamórficos y metasedimentarios, relieves masivos como las filas y vigas, tipos de relieve asociados al ambiente estructural en el paisaje de montaña serán descritos a continuación:

- **Fila y viga (MF)**

Tipo de relieve que corresponde a elevaciones naturales del terreno con altura media mayor a 200 metros respecto al nivel de base local. Su expresión morfológica obedece a la estructura de un techo, con un eje axial principal (fila) y elementos transversales (vigas), perpendiculares al anterior y separados por drenajes.

La fila la compone una cresta longitudinal, generalmente con un flanco más abrupto que el otro, mientras la viga constituye una cresta transversal más corta y separada de las otras vigas por vallecitos de montaña. Dependiendo del material geológico sobre el que se encuentre, las cimas generalmente son alargadas y agudas mientras que las laderas son largas a muy largas, configurando de manera frecuente una red de drenaje dendrítica y paralela a subparalela.

Las filas y vigas fueron identificadas en toda la cuenca y se reconocieron las siguientes formas de terreno:

**Ladera (MFL):** forma de terreno que corresponde a una superficie inclinada que surge desde la cima hasta la base del relieve de fila y la viga. Generalmente presenta un perfil topográfico convexo-rectilíneo-cóncavo, con forma compleja y longitud moderada a muy larga.

**Ladera coluvial (MFG):** superficie inclinada de perfil cóncavo-convexo que se extiende hasta la base del relieve de fila y viga, y se caracteriza por la presencia de acumulaciones irregulares y discontinuas de material detrítico no consolidado proveniente de procesos de remoción en masa. Está constituida por fragmentos rocosos heterométricos angulares, en matriz de suelo, producto de deslizamientos superficiales y acumulaciones de materiales de caída (Figura 3).



Figura 3. *Ladera coluvial en alteritas de rocas volcanosedimentarias (MFvG). Vía Calarcá – La Línea.*  
Fuente: Gutiérrez, J. (2019).

Este tipo de relieve ocupa una extensión aproximada de 7.415 ha y se encuentra sobre diversos materiales geológicos que serán descritos a continuación.

- **Filas y vigas en alteritas de rocas ígneas intrusivas félsicas e intermedias (MFi)**

Este tipo de relieve fue identificado en la cuenca media del río Navarco, ocupando una extensión de 1.294 ha. Se encuentra sobre materiales de alteración de dacitas, andesitas, Cuarzodioritas y dioritas de la Formación Complejo Ígneo del Río Navarco, Pórfidos Andesíticos y Rocas Hipoabisales presentes en el área. Estos materiales son producto de pequeñas intrusiones que afloraron en superficie a través de fisuras de la corteza. Las filas y vigas en este material presentan cimas estrechas y agudas no cartografiables y laderas cortas de forma recta-convexa con las siguientes pendientes:

- Ladera fuertemente inclinada (12 - 25%); MFiLd.
- Ladera moderadamente escarpada (25 - 50%); MFiLe.
- Ladera escarpada (50 - 75%); MFiLf.
- Ladera coluvial fuertemente inclinada (12 - 25%); MFiGd.
- Ladera coluvial moderadamente escarpada (25 - 50%); MFiGe.

- **Filas y vigas en alteritas de rocas volcanosedimentarias (MFv)**

Fueron identificadas en toda la cuenca ocupando una extensión aproximada de 2.865 ha y es el tipo de relieve más frecuente en el área de estudio pues ocupa cerca del 34% del área.

Fueron modeladas sobre materiales de alteración de basaltos, diabasas y rocas metasedimentarias de la formación Quebradagrande, producto de la compactación de sedimentos marinos y aportes volcánicos durante la formación de la Cordillera Central. Presentan cimas cortas-convexas no cartografiables y laderas moderadas a largas, de forma recta con las siguientes pendientes:

- Ladera fuertemente inclinada (12 - 25%); MFvLd.
- Ladera moderadamente escarpada (25 - 50%); MFvLe.
- Ladera escarpada (50 - 75%); MFvLf.
- Ladera muy escarpada (> 75%); MFvLg.
- Ladera coluvial fuertemente inclinada (12 - 25%); MFvGd.
- Ladera coluvial moderadamente escarpada (25 - 50%); MFvGe.
- Ladera coluvial escarpada (80 - 75%); MFvGf.

- **Filas y vigas en alteritas de metamórficas de protolito sedimentario (MFm)**

Este relieve fue identificado en la cuenca alta de la cuenca del río Navarco, en inmediaciones del sector conocido como La Línea, ocupando una extensión aproximada de 1.397 ha.

Se ubican sobre materiales de alteración de esquistos verdes y filitas de la Formación Cajamarca, producto de la transformación por presión y temperatura de rocas sedimentarias marinas. En general presentan cimas estrechas-convexas no cartografiables, laderas largas a muy largas, de forma recta e irregular, con las siguientes pendientes:

- Ladera fuertemente inclinada (12 - 25%); MFmLd.
- Ladera moderadamente escarpada (25 - 50%); MFmLe.
- Ladera escarpada (50 - 75%); MFmLf.
- Ladera muy escarpada (> 75%); MFmLg.

- **Filas y vigas en alteritas de rocas metamórficas de protolito ígneo-metamórfico (MFg)**

Este relieve fue identificado en la cuenca alta del río Navarco, ocupando una extensión aproximada de 513 ha. Se ubican sobre materiales de alteración de neises, anfibolitas y cuarzodioritas y granodioritas con orientación y estructura neisítica de las formaciones Neises y Anfibolitas de Tierradentro y el Intrusivo Neísico de la Línea. Estos materiales son el producto de la transformación por presión y temperatura de rocas ígneas intrusivas. En general presentan cimas estrechas-convexas no cartografiables, laderas largas a muy largas, de forma recta e irregular con las siguientes pendientes:

- Ladera moderadamente escarpada (25 - 50%); MFgLe.
- Ladera escarpada (50 - 75%); MFgLf.
- Ladera muy escarpada (> 75%); MFgLg.

- **Filas y vigas en alteritas de rocas metasedimentarias (MFz)**

Fueron identificadas principalmente de las cuenca alta y baja del río Navarco, ocupando una extensión aproximada de 1.332 ha. Se encuentran sobre materiales de alteración de grawacas, chert, limolitas y lutitas de la Formación Quebradagrande, y son producto de la transformación por efectos cataclásticos de sedimentos marinos. Presentan cimas estrechas y agudas no cartografiables y laderas largas a muy largas, de forma irregular que presentan las siguientes pendientes (Figura 4):

- Ladera fuertemente inclinada (12 - 25%); MFzLd.
- Ladera moderadamente escarpada (25 - 50%); MFzLe.
- Ladera escarpada (50 - 75%); MFzLf.
- Ladera coluvial fuertemente inclinada (12 - 25%); MFzGd.
- Ladera coluvial escarpada (50 - 75%); MFzGf.



Figura 4. *Filas y vigas en alteritas de rocas metasedimentarias (MFzL) y terraza de valle estrecho nivel 1 (MVP1). Inmediaciones de Canaán. Fuente: Gutiérrez, J. (2019).*

#### 3.1.2.1.3. Ambiente morfogenético deposicional en paisaje de montaña

Al interior del paisaje de montaña existen relieves asociados a procesos de acumulación de materiales detríticos, arrastrados por las corrientes o acción de la gravedad. Estos procesos modelan formas de origen aluvial, coluvial, fluviovolcánico y torrencial, relacionados directamente a las dinámicas externas de la tierra, como la precipitación, gravedad, fusión de masas glaciares producto de las erupciones de los cuerpos volcánicos de la Cordillera Central, así como a los deshielos producidos por el fin del último periodo glacial hace aproximadamente 11.000 años.

Los tipos de relieve que componen el ambiente deposicional en el paisaje de montaña serán descritos a continuación.

##### - **Abanico terraza (MQ)**

Tipo de relieve constituido por un depósito de materiales aluviales y fluvioglaciares, caracterizado por presentar una superficie de longitud corta a muy larga y forma alargada que está limitada por taludes de pendiente escarpada, generalmente de gran espesor.

Generalmente está compuesto por depósitos heterométricos de matriz lodosa, originados por flujos torrenciales que produjeron el llenado de valles de montaña y pueden alcanzar un espesor superior a varias decenas de metros.

Estos depósitos han sido sometidos a procesos de levantamiento tectónico y la posterior incisión de la red de drenaje y del cauce principal, permitieron la formación de taludes de pendiente escarpada en el borde del abanico terraza.

Los abanicos terraza fueron identificados en la cuenca baja del río Navarco ocupando una extensión aproximada de 10 *ha* y presentan las siguientes formas de terreno:

**Cuerpo (MQP):** se refiere a la superficie alargada y conservada del abanico terraza, la cual está limitada por el talud y las laderas de las demás geoformas de montaña. Presenta un perfil topográfico rectilíneo-irregular y una pendiente fuertemente inclinada (12 - 25%); MQPd.

**Talud (MQT):** forma de terreno que corresponde a una superficie de perfil topográfico rectilíneo, de longitud muy corta a corta, configuración alargada y pendiente escarpada; se encuentra ubicada al borde de la superficie del abanico terraza y define el límite con las geoformas circundantes o con los drenajes que rodean y enmarcan este tipo de relieve. Se identificaron taludes con las siguientes pendientes:

- Talud moderadamente escarpado (25 - 50%); MQTe.
- Talud escarpado (50 - 75%); MQTf.

#### - **Terraza fluviovolcánica (MH)**

Tipo de relieve que corresponde a un depósito de lodo volcánico con fragmentos de otros materiales litológicos, caracterizado por presentar una superficie con perfil topográfico rectilíneo a irregular, longitud larga a muy larga y pendiente fuertemente inclinada; la forma predominante es alargada, limitada por taludes de pendiente escarpada y generalmente de gran espesor.

La unidad corresponde a relictos de antiguos depósitos formados por flujos de lodo volcánico que produjeron el rápido llenado de áreas confinadas como vallecitos de montaña, valles estrechos y artesas. El origen de los flujos está relacionado erupciones del Volcán Nevado del Quindío que género la fusión de las masas glaciares que cubrían las cumbres de las Cordillera Central.

El depósito está compuesto por fragmentos de rocas y aglomerados embebidos en una matriz limoarenosa que contiene lodos y ceniza volcánica. Los fragmentos tienen formas angulares, subredondeadas y redondeadas, de tamaño variable que va desde grava hasta bloque. Las rocas fragmentadas que componen el depósito van desde lavas, ígneas intrusivas, metasedimentarias hasta metamórficas, mientras los aglomerados generalmente son de escoria y pumita (Figura 5).



Figura 5. Vista general de la terraza fluviovolcánica (MHP-MHT). Inmediaciones del casco urbano del municipio de Salento. Fuente: Gutiérrez, J. (2019).

Las terrazas fluviovolcánicas fueron identificadas en la cuenca baja del río Navarco ocupando una extensión aproximada de 285 *ha* y están conformadas por las siguientes formas de terreno:

**Plano de terraza ondulado (MHO):** forma de terreno que corresponde a una superficie localizada en la parte superior de la terraza fluviovolcánica, caracterizada por presentar perfil topográfico rectilíneo-irregular y que presenta las siguientes pendientes:

- Plano de terraza ondulado fuertemente inclinado (12 - 25%); MHOd.
- Plano de terraza ondulado moderadamente escarpado (25 - 50%); MHOe.

**Talud (MHT):** forma de terreno que corresponde a una superficie de perfil topográfico rectilíneo, de longitud muy corta a corta, configuración alargada y pendiente moderadamente inclinada a muy escarpada; se encuentra ubicada al borde de la superficie de la terraza fluviovolcánica y define el límite con las geoformas circundantes o con los drenajes que rodean y enmarcan este tipo de relieve. Se identificaron taludes con las siguientes pendientes:

- Talud moderadamente escarpado (25 - 50%); MHTe.
- Talud escarpado (50 - 75%); MHTf.

- **Manto coluvial (MJP)**

Tipo de relieve que corresponde a un depósito de material detrítico no consolidado de espesor variable y perfil topográfico irregular, localizado en la parte media y baja de las

laderas donde se originó y que puede recubrir un área que va de uno a varios Km<sup>2</sup>. El depósito se caracteriza por tener configuración y contorno irregulares.

El manto coluvial está constituido por un conjunto de fragmentos rocosos heterométricos angulares, combinados con una matriz de suelo y material de alteración de las rocas provenientes de la parte alta de las laderas que conforman el paisaje de montaña. Este conjunto de materiales detríticos es depositado por acción de la gravedad, de manera caótica, constituyendo un relieve que carece de una forma geométrica característica y generalmente con presencia de depresiones, en las cuales el encharcamiento puede dar origen a posteriores procesos de remoción en masa debido a la infiltración de agua y con presencia frecuente de fragmentos de rocas en superficie (Figura 6).



Figura 6. **Manto coluvial (MJP). Cuenca media del río Navarco. Fuente: Aponte, M. (2019).**

Los mantos coluviales fueron identificados predominantemente en la cuenca media del río Navarco, ocupando una extensión aproximada de 19 *ha* y presentando como única forma de terreno el cuerpo de manto coluvial, el cual será descrito a continuación.

**Cuerpo (MJP):** superficie masiva que comprende la parte superior del manto coluvial, caracterizada por tener perfil topográfico irregular, así como configuración y contorno también irregulares. La pendiente general es inclinada pero presenta pendientes locales ampliamente contrastantes, desde muy suave hasta escarpada. Su origen está relacionado con la ocurrencia de diversos procesos de remoción en masa que depositaron materiales detríticos heterométricos en las áreas de ladera donde la pendiente disminuye. Se identificaron cuerpos de manto coluvial con las siguientes pendientes:

- Cuerpo de manto fuertemente inclinado (12 - 25%); MJPd.
- Cuerpo de manto moderadamente escarpado (25 - 50%); MJPe.
- Cuerpo de manto escarpado (50 - 75%); MJPf.

#### - Cono de deyección (MD)

Tipo de relieve que corresponde a un depósito de materiales coluvio-aluviales con forma de semi radial o cónica, que presenta una zona estrecha hacia la parte más alta del depósito y se hace amplia hacia la base en la parte baja. El perfil topográfico longitudinal de la unidad es rectilíneo-convexo y el transversal convexo.

Se encuentran confinados en espacios de poca amplitud en medio de las laderas de alta pendiente y están constituidos por una acumulación de materiales detríticos heterométricos que provienen de la montaña alta o media, formados a partir de procesos de erosión y movimientos en masa que afectan a las laderas adyacentes.

Su medio de transporte son los drenajes torrenciales, que reciben y transportan los detritos hasta llegar a una zona de menor pendiente y mayor amplitud, donde los depositan de forma caótica (Figura 7).



**Figura 7.** *Cono de deyección (MDP), en contacto con terrazas de valle estrecho (MVP1) y discurriendo desde filas y vigas en alteritas de rocas volcanosedimentarias (MVP1). Cuenca baja del río Navarco. Fuente: Gutiérrez, J. (2019).*

Fueron identificados en la cuenca media y baja del río Navarco, ocupando una extensión aproximada de 20 *ha* y presentando como única forma de terreno el cuerpo de cono, unidad que será descrita a continuación.

**Cuerpo (MDP):** forma de terreno constituida por una superficie que comprende la parte superior del cono de deyección, caracterizado por tener perfil topográfico rectilíneo-

convexo, de longitud corta a muy corta, configuración triangular y contorno arqueado, que presenta las siguientes pendientes:

- Cuerpo de cono de cono de deyección moderadamente inclinado (7 - 12%); MDPc.
- Cuerpo de cono de cono de deyección fuertemente inclinado (12 - 25%); MDPd.
- Cuerpo de cono de cono de deyección moderadamente escarpado (25 - 50%); MDPe.

- **Glacis de acumulación (MGP)**

Tipo de relieve que corresponde a un depósito de material detrítico no consolidado situado en la base de las laderas en denudación, caracterizado por el perfil topográfico rectilíneo-cóncavo y configuración alargada de extensión corta, la cual no supera los 200 metros.

El origen de la unidad está relacionado con los procesos de escurrimiento superficial difuso en laderas y por la acción de la gravedad, que a través de la erosión pluvial y laminar desprende y transporta, de manera gradual, detritos de los relieves que presentan pendiente más fuerte hasta las áreas de acumulación localizadas en la base de la ladera. Generalmente está compuesto por fragmentos rocosos tamaño guijarro y detritos de textura fina, con espesor que puede alcanzar varios metros (Figura 8).



Figura 8. *Glacis de acumulación (MGP) en contacto con terrazas de valle estrecho (MVP1). Cuenca baja del río Navarco. Fuente: Gutiérrez, J. (2019).*

Este tipo de relieve fue identificado en la cuenca baja del río Navarco, cubriendo una extensión aproximada de 26 ha y presentando como única forma de terreno el cuerpo de glacis de acumulación (MGP). Se identificaron cuerpos de glacis con las siguientes pendientes:

- Glacis de acumulación moderadamente inclinado (7 - 12%); MGPc.

- Glacis de acumulación fuertemente inclinado (12 - 25%); MGPd.
- Glacis de acumulación moderadamente escarpado (25 - 50%); MGPe.

#### - Valle estrecho (MV)

Tipo de relieve que corresponde a una porción de terreno estrecha y de configuración alargada, ubicada entre dos áreas de relieve más alto y caracterizada por la formación dos niveles de terraza de carácter discontinuo en cualquiera de las márgenes del río, presentando una longitud que varía de unos pocos cientos de metros a varios kilómetros.

Su origen está determinado por el entalle de una corriente de agua sobre la superficie terrestre, generado por el descenso en el nivel de base local o por el levantamiento tectónico del terreno adyacente. El valle estrecho comprende una corriente mayor que recibe caudal y sedimentos de fuentes tributarias menores como quebradas y riachuelos (Figura 9).



Figura 9. Valle estrecho de montaña con niveles de terraza (MVP1), sobrevega (MVS), en contactos con conos de deyección (MDP), y filas y vigas en alteritas de rocas metasedimentarias (MFzL). Cuenca baja del río Navarco. Fuente: Gutiérrez, J. (2019).

Este tipo de relieve fue asociado a la cuenca baja de los ríos Navarco y Boquerón, ocupando una extensión aproximada de 138 ha y está compuesto por las siguientes formas terreno:

**Vega (MVV):** forma de terreno que corresponde a una superficie de perfil topográfico plano-cóncavo localizada en la posición más baja del valle estrecho, constituida por los depósitos heterométricos aluviales acumulados por la corriente hídrica. La unidad recibe y cede

aluviones por acción del ascenso y descenso del nivel del caudal del río, que periódicamente la inunda. La vega de valle estrecho presenta una pendiente plana a ligeramente plana que no supera el 3% (MVVa).

**Sobrevega (MVS):** forma de terreno que corresponde a un depósito de materiales aluviales de configuración alargada y estrecha, de perfil topográfico plano-cóncavo, pendiente plana a ligeramente plana que no supera el 3% (MVSa), mal drenada y localizada hacia los márgenes de la vega de forma discontinua. Su origen está relacionado con la acumulación longitudinal de sedimentos medios y finos del propio río durante crecidas excepcionales, por lo cual presenta una altura relativa ligeramente más alta que la vega.

**Barra longitudinal (MVB):** forma de terreno constituida por un depósito aluvial de configuración alargada y estrecha y perfil topográfico plano-convexo, que está localizado al interior del cauce con orientación paralela a la dirección de la corriente hídrica. Su origen está relacionado con los materiales acumulados en el lecho (tamaño arena, grava o bloque), que sobresalen del nivel medio de las aguas del río y en algunas ocasiones presentan cobertura vegetal de bajo porte como arbustos y herbazales; generalmente estas geoformas no son estables y su presencia puede ser temporal y sujeta a los cambios naturales de caudal determinado por la temporada de lluvias o a la modificación antrópica del mismo.

**Plano de terraza 1 (MVP1):** superficie discontinua de perfil topográfico plano, extensión corta y configuración alargada y estrecha, que se ubica de forma adyacente a la vega. Su origen está relacionado con la sedimentación sectorizada y de forma longitudinal de materiales aluviales heterométricos por acción del río y por la acumulación de aportes laterales hacia esta superficie. Se identificaron planos de terraza con pendientes planas a ligeramente planas que no superan el 3% (MVP1a) (Figura 10).

**Plano de terraza 2 (MVP2)** superficie discontinua de perfil topográfico plano, extensión corta y configuración alargada y estrecha, que está localizada adyacente a la vega o al plano de terraza nivel 1. Su origen está relacionado con la sedimentación sectorizada y de forma longitudinal de materiales aluviales heterométricos por acción del río, por la acumulación de aportes laterales hacia esta superficie y por la incisión del cauce que deja aislados estos depósitos y en posición relativa superior a la del plano de terraza 1. Se identificaron planos de terraza con pendientes planas a ligeramente planas que no superan el 3% (MVP2a).



Figura 10. *Contacto entre terraza de valle estrecho nivel 1 y 2 (MVP1 - MVP2). Cuenca baja del río Navarco. Fuente: Gutiérrez, J. (2019).*

#### - Vallecito (MZV)

Tipo de relieve que corresponde a una incisión de configuración alargada y estrecha, intercalada entre dos áreas de relieve más alto, con una pequeña corriente de agua como eje principal y una longitud que varía de unos pocos cientos de metros a varios kilómetros. El reducido caudal del drenaje permite la formación principalmente de vegas constituidas por detritos heterométricos, con frecuentes aportes laterales de materiales de tipo coluvial, los cuales deposita en sentido longitudinal.

Debido al elevado potencial hidrogravitatorio que se presenta en los sistemas montañosos, los vallecitos en este paisaje suelen presentarse como incisiones profundas, de carácter torrencial y con una gran carga de sedimentos. Los vallecitos son en esencia corrientes menores de agua, que funcionan como tributarios de cauces colectores y en ocasiones, dependiendo del clima de la zona, pueden comportarse como corrientes intermitentes.

La vega, como única forma de terreno identificable en el vallecito, corresponde a una superficie de perfil topográfico plano-cóncavo, de pendientes inferiores al 3% y localizada en la posición más baja del vallecito. Este tipo de relieve se identificó en toda la cuenca del río Navarco ocupando una extensión aproximada de 491 *ha* y se dispone en distintos patrones de drenaje, que discurren hacia los valles estrechos de montaña y demás relieves deposicionales que conforman el área de estudio.

---

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS. Proyecto Navarco

---

Subdirección de Agrología

---

Miguel Aponte

---

## SUELOS

El suelo es un recurso natural que ofrece diferentes servicios ecosistémicos en relación con el almacenamiento de agua para alimentar las fuentes hídricas, el secuestro y fijación de carbono orgánico para impedir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y la alta capacidad de soporte de las distintas actividades productivas del ser humano.

Los suelos de la cuenca hidrográfica del río Navarco han evolucionado a partir de los depósitos de cenizas volcánicas y otros piroclastos emitidos por los distintos volcanes de la cordillera Central durante el período Holoceno, en especial los volcanes Machín, Santa Isabel y Ruiz. Los materiales piroclásticos recubrieron las formaciones geológicas de la cordillera Central, suavizando el relieve y propiciando la llegada de los microorganismos y la mesofauna al suelo, causantes de la transformación de los materiales inertes y creadores de condiciones favorables para el desarrollo de las plantas y animales superiores.

La ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica del río Navarco en la zona ecuatorial de Colombia, con temperaturas cálidas y lluvias constantes a través del año, ha permitido el desarrollo de procesos de alteración y transformación de los materiales volcánicos, muy significativos y en corto tiempo dentro de la escala del tiempo geológico. Las cenizas volcánicas contienen abundantes minerales ferromagnesianos que se sintetizan en minerales de arcilla más complejos (feldespatos, cristobalita, cuarzo, anfíboles, micas, intergrados 2:1-2:2) mediante los procesos de hidrólisis y oxidación del hierro.

La materia orgánica producida por la vegetación genera cantidades significativas de ácidos fúlvicos y húmicos que impregnan colores negros a la parte superficial del perfil de suelo, mientras que en profundidad se conservan los colores y las texturas de los materiales volcánicos con bajo grado de alteración.

Los nuevos productos formados como resultado del proceso intempérico de los materiales piroclásticos se denominan "*materiales de rango corto*"; ejemplo de ellos son la alófana y los complejos metal-humus. Estos nuevos elementos le imprimen al suelo las siguientes características que, en conjunto, se denominan "*propiedades ándicas*": 1) una densidad aparente, medida a una retención de agua de 33kPa, menor o igual a 0,90 g/cm<sup>3</sup>; 2) una retención de fosfatos de 85% o más; 3) un contenido de Al más ½Fe (por oxalato de amonio) igual o mayor a 0,4% en los suelos de texturas arenosas (tierra fina entre 0,02 y 2,0 mm) ó igual o mayor a 2,0% en los suelos de texturas no arenosas (USDA, 2018).

Las propiedades ándicas son evidentes en los suelos de las partes más altas de la cuenca (clima frío y muy frío); sin embargo, a medida que se incrementa la temperatura ambiental y edáfica dichas propiedades se desvanecen paulatinamente lo cual incide en la clasificación taxonómica de los suelos que varía del orden Andisol al orden Inceptisol por presentar alteraciones o transformaciones mucho más fuertes en los materiales de origen de los suelos.

La descripción de los suelos de la cuenca hidrográfica del río Navarco se realiza en forma sectorizada partiendo del clima muy frío y frío hacia el clima templado para lo cual se ha dividido la cuenca en tres sectores: cuenca alta, cuenca media y cuenca baja. Si bien es cierto que las geoformas de origen denudacional ocupan el mayor porcentaje de participación dentro de la cuenca, en igual forma se han caracterizado los suelos de las principales geoformas de origen agradacional.

### 3.2.1. Suelos de la cuenca alta del río Navarco

En la cuenca alta del río Navarco predominan los suelos que cumplen con los parámetros establecidos en el rango de propiedades ándicas, razón por la cual se clasifican dentro del orden de los Andisoles. A nivel de suborden se clasifican como "Udands" por presentar un régimen de humedad "údic" que se caracteriza porque el perfil de suelo, entre 20 y 60 cm de profundidad, permanece húmedo por un período mayor o igual a 270 días acumulativos en el año; es decir, permanece seco por un período igual o menor a 90 días acumulativos en el año.

A nivel de gran grupo taxonómico, en la zona de estudio solamente se presentan dos clases: 1) Los Fulvudands, definidos por un horizonte o capa superficial de al menos 30 cm de espesor, con colores oscuros (value y chroma menor o igual a 2) y contenidos de carbón orgánico de 4% o más. 2) Los Hapludands, que corresponden al concepto central y no presentan alguna característica en particular.

La siguiente categoría de clasificación taxonómica es el subgrupo, dentro del cual se presentan los siguientes tipos: 1) Los Thaptic Hapludands, caracterizados por presentar entre 25 y 100 cm de profundidad, una capa de color oscuro (value menor o igual a 3) con espesor igual o mayor a 10 cm y con contenido de carbono orgánico mayor a 3,0%. 2) El subgrupo Typic, bien sea en los Fulvudands o en los Hapludands, con significado de "típicos", es decir, los más comunes dentro de su clase.

La familia taxonómica corresponde a la categoría más detallada de clasificación empleada en el presente estudio. El parámetro a evaluar dentro de los Andisoles es la retención de humedad, dentro de los 100 cm del suelo y a una tensión de 1500 kPa, debido a su estrecha relación con las texturas de los materiales piroclásticos y con la estabilidad de los complejos arcillo-húmicos producto de la unión de la materia mineral y la materia orgánica. Los andisoles de la zona de estudio pertenecen a la familia taxonómica cenizal debido a que la retención de humedad a 1500 kPa es menor de 30% en todo el perfil de suelo.

De acuerdo con la temperatura del suelo, se presentan dos familias taxonómicas: 1) Isomélica, para identificar los suelos con temperatura media anual que varía entre 8 y 15°C. 2) Isotérmica, para caracterizar los suelos con temperatura media anual que oscila entre 15 y 22°C.

Al nivel de familia taxonómica también se tiene en cuenta la composición mineralógica de la fracción arcilla de los suelos (< 0,002 mm). En la zona de estudio solamente se presenta la familia mineralógica "mezclada" en razón a que ningún mineral domina en más del 50%

sobre los demás sino que, por el contrario, todos se presentan en proporciones más o menos similares.

En la cuenca alta del río Navarco se presentan dos clases de suelos pertenecientes al orden de los *Andisoles* con características morfológicas algo diferentes en cuanto a las clases texturales, los contenidos de carbón orgánico y los colores del perfil de suelo que permiten diferenciarlos a nivel taxonómico y por ende, en cuanto al manejo sostenible de las tierras. La línea de separación de las dos clases de suelos corresponde, en forma aproximada, a la línea divisoria que separa las tierras de clima muy frío de las tierras de clima frío, ambos pertenecientes a la provincia de humedad muy húmeda.

- Suelos de clima muy frío, muy húmedo

Se localizan en las cumbres altas de la parte suroriental de la cuenca, en altitudes superiores a los 3000 msnm sobre la divisoria de aguas que separa los departamentos de Quindío y Tolima en el denominado Alto de La Línea.

Los suelos de esta condición climática están representados por el perfil modal 63D0015. Presentan una morfología de tipo A/C con capas superficiales gruesas de 45 cm de espesor y color negro a gris muy oscuro debido a los altos contenidos de carbono orgánico (4,34%). Las capas superficiales de color oscuro se mezclan paulatinamente con las capas arenosas más profundas para conformar horizontes transicionales que comparten características tanto de uno como de otro. A partir de los 60 cm de profundidad se presentan capas de texturas arenosas y color pardo amarillento con tendencia a colores pardo oliva claros. (Figura 11 y Figura 12)



**Figura 11.** *Perfil de suelo 63D0015 Typic Fulvudands, familia cenizal, mezclada, isomésica*



**Figura 12.** *Ladera cóncava con frecuentes terracetas en la vereda Santa Helena, sector de Ventiaderos*

Desde el punto de vista físico los suelos han desarrollado, en las capas superficiales, agregados de tamaño muy fino y fino (< 1 cm de lado) moderadamente estables debido a los enlaces moleculares entre los ácidos húmicos poco polimerizados y la fracción mineral. En profundidad los suelos no tienen estructura (grano suelto) en razón a que los procesos de formación están ausentes por falta de actividad biológica y de macroorganismos.

Las texturas de los suelos varían desde moderadamente gruesas (franco arenosa) en superficie hasta gruesas (arenosa) en profundidad. El horizonte superficial presenta un índice de plasticidad de 9,74% lo cual significa que la capa vegetal del suelo presenta un intervalo de humedad muy bajo dentro del cual el material se encuentra en estado plástico.

En los primeros 60 cm los suelos presentan muy baja densidad aparente ( $0,92 \text{ g/cm}^3$ ) y, en consecuencia, alta porosidad total (50 a 60%) la cual está representada por macro y microporos en proporciones similares. La prueba de la conductividad hidráulica para medir la velocidad del flujo de agua indica que ésta es lenta (0,3 cm/hora) en el horizonte superficial, moderadamente lenta (0,88 cm/hora) en el horizonte transicional y muy rápida (205,38 cm/hora) en las capas arenosas. La retención de humedad a capacidad de campo es muy alta (52,99%) en el horizonte superficial, alta (32,97%) en el horizonte transicional y moderada (20,29%) en las capas más profundas.

Con relación a las características químicas los suelos son fuertemente ácidos en superficie (pH 5,1 a 5,5) y moderadamente ácidos en profundidad (pH 5,6 a 6,0), de moderada capacidad de intercambio catiónico en superficie (10 a 20 me/100 g) y baja en las capas arenosas (< 10 me/100 g), baja saturación de bases en todo el perfil con valores inferiores al 5% y con niveles bajos de fósforo disponible en la superficie (9,86 mg/Kg) los cuales se incrementan con la profundidad (70 a 100 mg/Kg). El anterior cuadro de resultados permite establecer que los suelos son de fertilidad muy baja.

El análisis mineralógico de la fracción arena hasta 125 cm señala una variada composición de minerales que corroboran la procedencia de los mismos de tipo piroclástico. Entre los minerales dominantes se presentan feldespatos (35%), hornblenda (23%), vidrio volcánico (12%), fragmentos tobáceos (9%), cuarzo (6%), dióxido (5%), magnetita (5%), lamprobolita (3%) e hiperstena (2%). En la fracción arcilla predominan los minerales de cuarzo (30 a 50%) seguidos por materiales no cristalinos o amorfos (15 a 30%) y en menor proporción los feldespatos, los intergradados 2:1-2:2 y los anfíboles (5 a 15%).

- Suelos de clima frío, muy húmedo

Se localizan en las cumbres altas de la cuenca hidrográfica, en altitudes que oscilan entre 2200 y 3000 msnm, donde nacen la mayoría de quebradas que alimentan el cauce del río Navarco tales como las quebradas La Mina y San Julián pertenecientes a la vereda Santa Helena del municipio de Salento.

Los suelos de las laderas denudacionales de esta condición climática están representados por el perfil modal 63D0019. Presentan una morfología de tipo A/Bw/C con capas superficiales gruesas que varían entre 30 y 35 cm de espesor y colores negro a gris muy

oscuro debido a los altos contenidos de carbono orgánico (5,3%). El horizonte B profundiza hasta 105 cm y el color predominante es pardo amarillento. En profundidad el horizonte C presenta color amarillo pardusco (Figura 13 y Figura 14).



**Figura 13. Perfil de suelo 63D0019**  
*Typic Hapludands, familia cenizal, mezcla, isomésica*



**Figura 14. Laderas convexas con pocas terracetas en la vereda La Palmera**

Desde el punto de vista físico los suelos han desarrollado, en las capas superficiales, agregados de tamaño fino (< 1 cm de lado) moderadamente estables debido a los enlaces moleculares entre los ácidos húmicos poco polimerizados y la fracción mineral. En el horizonte cámbico (Bw) los agregados de suelo varían de medios a gruesos (2 a 5 cm de lado) pero son ligeramente estables ya que se destruyen al realizar ligeras presiones con los dedos. El horizonte o capa C no presenta desarrollo estructural por ser de grano suelto.

Las texturas de los suelos varían desde moderadamente gruesas (franco arenosa) en las capas superficiales hasta gruesas (arenosa franca y arenosa) en profundidad. Las distintas capas del perfil del suelo reportan índices de plasticidad nulos lo cual significa que presentan un intervalo de humedad muy bajo dentro del cual el material se encuentra en estado plástico.

En la capa vegetal los suelos presentan valores muy bajos de densidad aparente ( $0,75 \text{ g/cm}^3$ ) y, en consecuencia, alta porosidad total (50 a 70%) la cual está representada por macro y microporos con una mayor proporción de microporos. La prueba de la conductividad hidráulica para medir la velocidad del flujo de agua indica que ésta es rápida (15,1 cm/hora) en la capa superficial y lenta (0,1 a 0,2 cm/hora) en el horizonte Bw. La retención de humedad a capacidad de campo es muy alta (> 50%) en el horizonte superficial y alta (30 a 50%) en el horizonte Bw

Con relación a las características químicas los suelos de las laderas son moderadamente ácidos (pH 5,6 a 6,0) en las capas superficiales y ligeramente ácidos (pH 6,1 a 6,6) en profundidad, de alta capacidad de intercambio catiónico (> 20 me/100 g) en superficie y moderada (10 a 20 me/100 g) hasta el horizonte C, muy baja saturación de bases en todo el perfil con valores inferiores al 5% y con niveles bajos de fósforo disponible en la superficie (< 15 mg/Kg) los cuales se incrementan con la profundidad (> 30 mg/Kg). El anterior cuadro de resultados permite establecer que los suelos son de fertilidad baja.

El análisis mineralógico de la fracción arena hasta 150 cm señala una variada composición de minerales que corroboran la procedencia de los mismos de tipo piroclástico. Entre los minerales dominantes se presentan feldspatos (45%), vidrio volcánico (17%), hornblenda (13%), fragmentos tobáceos (12%), cuarzo (6%), fragmentos líticos (3%), hiperstena (3%) y magnetita (1%). En la fracción arcilla predominan los minerales de cuarzo (30 a 50%) seguidos por materiales no cristalinos o amorfos y feldspatos (15 a 30%) y en menor proporción los intergrados 2:1-2:2 y los anfíboles (5 a 15%).

En el piso térmico frío de la cuenca hidrográfica han tenido lugar diferentes desprendimientos de materiales que conforman geformas de tipo agradacional denominadas "mantos coluviales" las cuales se caracterizan por presentar capas alternas de diferentes colores y texturas producto de la evolución truncada de los suelos a causa de los distintos eventos deposicionales (Figura 15 y Figura 16).



**Figura 15. Cajuela MA-078 Thaptic Hapludands, familia cenizal, isomésica**



**Figura 16. Manto coluvial con micro-relieve ondulado en la vereda La Palmera**

Los suelos de los mantos coluviales presentan epipedones muy delgados (< 18 cm) de color pardo oscuro que recubren otras capas de colores claros y oscuros con texturas que varían

desde medias (franco limosa) hasta moderadamente finas (franco arcillo arenosa), características que permiten clasificar los suelos dentro del subgrupo "Thaptic" debido a la presencia de capas oscuras ("enterradas") entre 25 y 100 cm de profundidad

### 3.2.2. Suelos de la cuenca media del río Navarco

Se localizan en la parte central de la cuenca hidrográfica, en altitudes que oscilan entre 1900 y 2200 msnm y están representados por el perfil modal 63D0017.

Los suelos de este sector se clasifican dentro del orden de los Inceptisoles debido a que no cumplen en forma total los requisitos de propiedades ándicas. A nivel de suborden se clasifican como "Udepts" ya que se encuentran dentro de un régimen de humedad "údic" que se caracteriza porque el perfil de suelo, entre 20 y 60 cm de profundidad, permanece húmedo por un período mayor o igual a 270 días acumulativos en el año; es decir, permanece seco por un período igual o menor a 90 días acumulativos en el año.

A nivel de gran grupo taxonómico se clasifican como Humudepts por presentar epipedones úmbricos que se caracterizan por ser gruesos, de colores oscuros y por tener la saturación de bases inferior al 50%. El subgrupo taxonómico corresponde a los Andic Humudepts ya que dentro de los 75 cm superficiales presentan una capa igual o mayor a 18 cm de espesor con las siguientes características: una densidad aparente menor o igual a 1,0 g/cm<sup>3</sup> y un contenido de Al más ½Fe (por oxalato de amonio) mayor a 1,0. La familia taxonómica por clase de tamaño de partículas corresponde a francosa gruesa debido al contenido de arcilla menor de 18% en la fracción tierra fina (Figura 17 y Figura 18).



**Figura 17.** *Perfil de suelo 63D0017  
Andic Humudepts, familia francosa  
gruesa, mezclada, isomésica*



**Figura 18.** *Laderas cóncavas con frecuentes terracetos en  
la vereda El Castillo, finca El Brillante*

Presentan una morfología de tipo A/Bw con epipedones que varían entre 30 y 40 cm de espesor, con colores negro a gris muy oscuro debido a los altos contenidos de carbono

orgánico (5%). El horizonte Bw profundiza hasta 150 cm y el color predominante varía de pardo amarillento oscuro a pardo oscuro.

Desde el punto de vista físico los suelos han desarrollado, en las capas superficiales, agregados de tamaño medio y fino (< 2 cm de lado) moderadamente estables debido a los enlaces moleculares entre los ácidos húmicos poco polimerizados y la fracción mineral. En los horizontes cámbicos (Bw) los agregados de suelo alcanzan a ser gruesos (2 a 5 cm de lado) pero son menos estables ya que se destruyen al realizar ligeras presiones con los dedos.

Las texturas de los suelos de la cuenca media varían desde moderadamente gruesas (franco arenosa) en las capas superficiales hasta gruesas (arenosa franca) en profundidad. Las distintas capas del perfil del suelo reportan índices de plasticidad nulos lo cual significa que presentan un intervalo de humedad muy bajo dentro del cual el material se encuentra en estado plástico.

En los primeros 60 cm los suelos presentan valores bajos de densidad aparente (0,98 a 1,0 g/cm<sup>3</sup>) y, en consecuencia, alta porosidad total (56 a 60%) la cual está representada por macro y microporos con una mayor proporción de microporos. La prueba de la conductividad hidráulica para medir la velocidad del flujo de agua indica que ésta varía de moderadamente lenta (0,76 cm/hora) a moderadamente rápida (5,95 cm/hora) a través del perfil. La retención de humedad a capacidad de campo es alta (40 a 50%) hasta 110 cm y muy alta (82,8%) en las capas más profundas.

Con relación a las características químicas los suelos son moderadamente ácidos en las capas superficiales (pH 5,6 a 6,0) y ligeramente ácidos en profundidad (pH 6,1 a 6,5), de moderada capacidad de intercambio catiónico en los horizontes superficiales (10 - 20 me/100g) y alta (> 20 me/100g) en profundidad, de baja saturación de bases en todo el perfil con valores inferiores al 3% así como niveles bajos de fósforo disponible (< 10 mg/Kg). El anterior cuadro de resultados permite establecer que los suelos son de fertilidad baja.

El análisis mineralógico de la fracción arena hasta 150 cm señala una variada composición de minerales que corroboran la procedencia de los mismos de tipo piroclástico. Entre los minerales dominantes se presentan feldespatos (41%), hornblenda (22%), vidrio volcánico (15%), fragmentos tobáceos (4%), cuarzo (4%), magnetita (3%), lamprobolita (3%), hiperstena (3%), diópsido (3%) y biotita (2%). En la fracción arcilla predominan los minerales de cuarzo (30 a 50%) seguidos por materiales no cristalinos o amorfos (15 a 30%) y en menor proporción los feldespatos, los intergradados 2:1-2:2 y los anfíboles (5 a 15%).

En la parte norte de la cuenca del río Navarco se presentan algunas geoformas de origen agradacional producto de la depositación de materiales volcanoclásticos en el período Holoceno. Una de las geoformas más representativas son las terrazas fluvio-volcánicas que están conformadas por amplios planos de terraza enmarcados por abruptos taludes. Los suelos del talud de las terrazas se caracterizaron mediante la descripción del perfil 63D0020 y se clasifican como Pachic Humudepts debido a la presencia de un epipedón úmbrico con

espesor mayor a 50 cm. La familia taxonómica por clase de tamaño de partículas corresponde a francosa fina debido al contenido de arcilla de 18 a 35% en la fracción tierra fina.

Presentan una morfología de tipo A/Bw con epipedones muy gruesos con espesores mayores a 50 cm y colores negro a gris muy oscuro debido a los altos contenidos de carbono orgánico (4,8%). El horizonte Bw profundiza hasta 140 cm y el color predominante es pardo amarillento. (Figura 19 y Figura 20).

<p><b>Figura 19.</b> <i>Perfil de suelo 63D0020 Pachic Humudepts, familia francosa fina, mezclada, isomésica</i></p>	<p><b>Figura 20.</b> <i>Figura 20. Taludes de las terrazas fluvio- volcánicas en la vereda Navarco Bajo.</i></p>

Desde el punto de vista físico los suelos han desarrollado, en las capas superficiales, agregados de tamaño fino (< 1 cm de lado) moderadamente estables debido a los enlaces moleculares entre los ácidos húmicos poco polimerizados y la fracción mineral. En los horizontes cámbicos (Bw) los agregados de suelo tienden a ser medianos (1 a 2 cm de lado) e igualmente son moderadamente estables.

Las texturas de los suelos de los taludes son medias (franca) en las capa superficial y alternan, en profundidad, de moderadamente finas (franco arcillo arenosa) a moderadamente gruesas (franco arenosa). Las distintas capas del perfil del suelo reportan índices de plasticidad intermedios (10 a 12%) lo cual significa que estos suelos presentan un intervalo de humedad bajo dentro del cual el material se encuentra en estado plástico.

En los primeros 90 cm los suelos presentan valores bajos de densidad aparente (1,0 a 1,2 g/cm<sup>3</sup>) y, en consecuencia, alta porosidad total (50 a 57%) la cual está representada por macro y microporos con una mayor proporción de microporos. La prueba de la conductividad hidráulica para medir la velocidad del flujo de agua indica que ésta es rápida (16,8 cm/hora) en la capa superficial y lenta a muy lenta (< 0,2 cm/hora) en profundidad. La retención de humedad a capacidad de campo es alta (30 a 50%) en todo el perfil.

En cuanto a las características químicas los suelos de los taludes son ligeramente ácidos en las capas superficiales (pH 6,1 a 6,5) y neutros en profundidad (pH 6,6 a 7,3), de alta capacidad de intercambio catiónico en los horizontes superficiales (> 20 me/100g) y baja (> 10 me/100g) en profundidad, de baja saturación de bases (< 35%) en el epipedón y moderada (35 a 50%) en profundidad y con niveles bajos de fósforo disponible (< 10 mg/Kg) en todo el perfil. El anterior cuadro de resultados permite establecer que los suelos son de fertilidad baja.

El análisis mineralógico de la fracción arena hasta 140 cm señala una variada composición de minerales que corroboran la procedencia de los mismos de tipo piroclástico. Entre los minerales dominantes se presentan feldspatos (45%), hornblenda (25%), vidrio volcánico (10%), fragmentos tobáceos (6%), cuarzo (3%), lamprobolita (3%), magnetita (3%), hiperstena (2%), diópsido (2%) y fragmentos líticos (1%). En la fracción arcilla predominan los materiales no cristalinos o amorfos (30 a 50%), seguidos por caolinita e intergrados 2:1-2:2 (15 a 30%) y, en menor proporción, minerales de cuarzo (5 a 15%).

### **3.2.3. Suelos de la cuenca baja del río Navarco**

Forman parte de la cuenca baja los sectores aledaños al cauce principal del río Navarco, en altitudes que varían entre 1650 y 1900 msnm. En este sector de la cuenca se presentan las laderas inferiores de la montaña, de ambiente denudacional, las cuales enmarcan los depósitos aluvio-coluviales que rellenan el valle estrecho del río Navarco.

Los suelos de las laderas denudacionales están representados por el perfil modal 63D0021 y se clasifican dentro del orden de los Inceptisoles debido a que no cumplen en forma total con los requisitos de propiedades ándicas. A nivel de suborden se clasifican como "Udepts" ya que se encuentran dentro de un régimen de humedad "údic" que se caracteriza porque el perfil de suelo, entre 20 y 60 cm de profundidad, permanece húmedo por un período mayor o igual a 270 días acumulativos en el año; es decir, permanece seco por un período igual o menor a 90 días acumulativos en el año.

A nivel de Gran grupo taxonómico se clasifican como Humudepts por presentar epipedones úmbricos gruesos, de colores oscuros y con saturación de bases inferior al 50%. El subgrupo taxonómico corresponde a los Typic Humudepts, es decir, los más comunes dentro de su clase. La familia taxonómica por clase de tamaño de partículas corresponde a francosa fina debido al contenido de arcilla de 18 a 35% en la fracción tierra fina.

Presentan una morfología de tipo A/Bw/C con epipedones que no superan los 35 cm de espesor, de colores negro a gris muy oscuro debido a los moderados contenidos de carbono orgánico (2,3%). El horizonte Bw profundiza hasta 105 cm, presenta fragmentos de roca tamaño cascajo y piedra en porcentajes cercanos al 35% y el color predominante varía de pardo amarillento oscuro a pardo amarillento. En profundidad se presenta el horizonte C con características similares al Bw salvo la ausencia de estructura de suelo (Figura 21 y Figura 22).



**Figura 21.** *Perfil de suelo 63D0021  
Typic Humudepts, familia francosa  
fina, mezclada, isotérmica*



**Figura 22.** *Laderas convexas con algunas terracetras en la  
vereda Navarco Bajo, finca La Rivera*

Desde el punto de vista físico los suelos han desarrollado, en las capas superficiales, agregados de tamaño medio y fino (< 2 cm de lado) moderadamente estables debido a los enlaces moleculares entre los ácidos húmicos poco polimerizados y la fracción mineral. En los horizontes cámbicos (Bw) los agregados de suelo alcanzan a ser gruesos (2 a 5 cm de lado) pero son menos estables ya que se destruyen al realizar ligeras presiones con los dedos.

Las texturas de los suelos de las laderas son moderadamente finas (franco arcillo arenosa) en las capa superficial, medias (franca) a moderadamente gruesas (franco arenosa) en la parte intermedia del perfil y moderadamente finas (franco arcillosa) en profundidad. Las distintas capas del perfil del suelo reportan índices de plasticidad intermedios (10 a 16%) lo cual significa que estos suelos presentan un intervalo de humedad mediano dentro del cual el material se encuentra en estado plástico.

En los primeros 60 cm los suelos presentan valores bajos de densidad aparente (1,1 a 1,4 g/cm<sup>3</sup>) y, en consecuencia, alta porosidad total (50%) la cual está representada por macro y microporos con una mayor proporción de microporos. La prueba de la conductividad hidráulica para medir la velocidad del flujo de agua indica que ésta varía de moderadamente lenta (3,09 cm/hora) en la capa superficial a muy lenta (0,01 cm/hora) en profundidad. La retención de humedad a capacidad de campo es alta (30 a 50%) en todo el perfil.

En cuanto a las características químicas los suelos son moderadamente ácidos en las capas superficiales (pH 5,6 a 6,0) y ligeramente ácidos en profundidad (pH 6,1 a 6,5), de moderada capacidad de intercambio catiónico en los horizontes superficiales (10 a 20 me/100g) y alta (> 20 me/100g) en profundidad, de moderada saturación de bases en todo el perfil con valores entre 35 y 50% y con niveles muy bajos de fósforo disponible (< 1

mg/Kg). El anterior cuadro de resultados permite establecer que los suelos son de fertilidad baja.

El análisis mineralógico de la fracción arena hasta 150 cm señala una variada composición de minerales que corroboran la procedencia de los mismos de tipo piroclástico. Entre los minerales dominantes se presentan feldespatos (47%), hornblenda (18%), vidrio volcánico (12%), fragmentos tobáceos (6%), cuarzo (5%), hiperstena (5%), magnetita (4%) y fragmentos líticos (3%). En la fracción arcilla predominan los minerales de cuarzo (30 a 50%) seguidos por materiales no cristalinos o amorfos (15 a 30%) y en menor proporción los feldespatos, los intergrados 2:1-2:2 y los anfíboles (5 a 15%).

Los depósitos aluvio-coluviales que rellenan el valle estrecho del río Navarco conforman vegas, sobrevegas, terrazas aluviales, glacis de acumulación y algunos conos de deyección. Las texturas de los suelos de tipo agradacional son variadas y están muy relacionadas con la torrencialidad y magnitud de los eventos erosivos (Figura 23 y Figura 24).



**Figura 23.** Corte de suelo que muestra la depositación selectiva de materiales aluvio-coluviales.



**Figura 24.** Terrazas aluviales del valle estrecho del río Navarco con pedregosidad superficial y al interior del suelo.

En el análisis mineralógico de la fracción arena de la capa superficial de las terrazas aluviales se observa una variada composición de minerales que corroboran la procedencia de los mismos a lo largo de la cuenca hidrográfica. Entre los minerales dominantes se presentan feldespatos (43%), fragmentos líticos (10%), vidrio volcánico (10%), cuarzo (9%), hornblenda (9%), magnetita (5%), hiperstena (4%), biotita (3%), granos alterados (3%) y fragmentos tobáceos (1%).

---

### **3.3 INTERPRETACIÓN MOVIMIENTOS EN MASA Y EROSIÓN. Proyecto Navarco**

---

Subdirección de Agrología

---

Seiry Soleny Vargas Tejedor

---

## Introducción

Como parte de las actividades contempladas en el proyecto de investigación para la Cuenca del Río Navarco, realizado bajo el convenio entre la Corporación Autónoma Regional del Quindío-CRQ y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC cuyo objeto fue *"aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para la realización de un estudio para la identificación, caracterización y espacialización cartográfica a escala 1:10000 de los procesos erosivos en la unidad hidrográfica del Río Navarco en el municipio de Salento departamento del Quindío"*. Se plantearon diversas tareas para la realización de dicho estudio; dentro de estas, la interpretación de movimientos en masa y erosión por parte del grupo interno de *Modernización y administración de la información agrologica* de la Subdirección de Agrología del IGAC. Dicha interpretación se realizó a partir de insumos de sensores remotos (Fotografías aéreas digitales, Ortofotomosaicos, imágenes de satélite, Modelos digitales de elevación entre otros) usando técnicas de interpretación digital (Ambientes 2D y Estereoscopia digital) en un área de 84 Km<sup>2</sup> aproximadamente, para esto se diseñó una propuesta metodológica, que incluyera la recopilación y en algunos casos la realización de información temática necesaria para la caracterización biofísica del área (Geología, Geomorfología, Suelos, Coberturas entre otras), la definición de lineamientos de captura para la representación de la información, la cual fue realizada para dos tiempos (años 2009 y 2019), el uso de técnicas de interpretación digital y el control de campo. Por tanto en el presente documento se describen los aspectos conceptuales empleados para la identificación, los insumos, las técnicas y lineamientos seguidos para la caracterización y espacialización cartográfica así como los resultados obtenidos a partir de la información capturada.

### 3.3.1. MARCO CONCEPTUAL

#### 3.3.1.1. Componente temático.

En los siguientes párrafos se mostraran los lineamientos conceptuales tomados para la identificación, caracterización y espacialización de los movimientos en masa y la erosión en el proyecto Navarco, se describirán las definiciones tomadas como referencia para realizar los procesos de interpretación, así como la definición de los diferentes atributos que caracterizaron la información capturada.

#### 3.3.1.2. Movimientos en masa (MVM).

Según Cruden 1991, en (PMA:GCA, 2007) los movimientos en masa (MVM) son definidos como “movimientos ladera abajo de masas de roca, detritos o tierras por efecto de la gravedad”, son parte de los procesos denudativos que modelan el relieve de la tierra y pueden ser clasificados de diferentes formas, según (PMA:GCA, 2007) la mayoría de las clasificaciones que se realizan de los movimientos en masa se basan en el tipo de material, su grado de deformación y saturación así como los mecanismos del movimiento, entre otras. Una de las clasificaciones más ampliamente utilizadas fue definida por (Varnes DJ. R.L. Schuster, 1978) y (Varnes, 1958) en esta se dividen los movimientos en masa en cinco tipos: Caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones laterales y flujos; sin embargo en la literatura existen diversas clasificaciones, que en su mayoría están orientadas a brindar información necesaria para los estudios de amenazas por movimientos en masa. Para realizar estas clasificaciones se realizan inventarios, cuya definición se describe de manera general.

##### - **Inventario de movimientos en masa**

Los inventarios son un registro ordenados de la localización y las características individuales de una serie de movimientos ocurridos en un área. Según INGEOMINAS (2011) en (SGC, 2017) la elaboración de un inventario debe permitir entender la ocurrencia de los movimientos en masa y sus características más importantes, con base en el alcance y los recursos empleados.

Los inventarios de procesos se pueden clasificar en varios tipos de acuerdo a las fuentes de información, en la Tabla 5 se resumen los principales tipos de inventarios que se realizan para la caracterización de un movimiento en masa, con fines de evaluación de amenaza.

Tabla 5. ***Tipos de inventarios de movimientos en masa. Elaboración propia con base en (SGC, 2017)***

Tipo	Descripción	
Catálogo	Base de datos con información de fuentes secundarias (comunicados de prensa, reportes cruz roja defensa civil etc.)	
Inventario de información secundaria.	Incluye la información obtenida de literatura u otro tipo de reportes.	
Inventario Geomorfológico	A partir de la interpretación visual de imágenes de satélite y el trabajo de campo.	Históricos: Información espacial, sin información temporal.
		Basado en eventos: relación con la ocurrencia de algún evento detonante específico. Incluye información espacial.
		Multitemporales: Incluyen información espacio temporal, la fecha de ocurrencia del evento se obtiene por información de campo directamente después de su ocurrencia o por interpretación de imágenes de sensores remotos adquiridas de épocas consecutivas (Portilla 2014) en (SGC, 2017).

**a. Atributos de los inventarios de MVM.**

(SGC, 2017), propone varios atributos de información que deben contener los inventarios de movimientos en masa, estos se describen en la Tabla 6.

Tabla 6. ***Principales atributos de los inventarios de movimientos en masa. Elaboración propia con base en (SGC, 2017)***

Atributos	Descripción
Fuente de información	Se deben considerar todas las fuentes de información disponibles como: Medios de comunicación, habitantes, información secundaria de entidades públicas y privadas, interpretación de imágenes de sensores remotos y levantamiento en campo.
Representación geométrica.	En lo posible la representación espacial debe ser de tipo polígono.
Mapeo	El mapeo debe ser de forma individual y no como grupos
Atributos de la base de datos	Los campos diligenciados dependerán de la fuente de información de la cual provenga dicho movimiento, siendo la interpretación de imágenes de sensores remotos y el levantamiento de campo las fuentes que aportan mayor información.

Así mismo son numerosas las características que suelen utilizarse para la clasificación de los MVM, en el presente documento se describirán de manera general algunos de los conceptos considerados como base para la captura de MVM para el proyecto Navarco.

**b. Edad relativa MVM**

(McCalpin, 1984) Indica que es difícil conocer la edad absoluta de un movimiento en masa, ya que el tiempo transcurrido (considerándose en años) para observar cambios en la

morfología inicial del evento debido a procesos denudativos puede variar de una región a otra, estos cambios dependen de las condiciones propias de la zona que se esté estudiando, autores como (Vargas, 2000) plantea tres clases de edad relativa: Reciente/Antiguo y Fósil. Definidas con base en evidencias morfológicas que puedan ser observadas mediante la interpretación de imágenes de sensores remotos. Así mismo él (SGC, 2017), en la guía Metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa Escala 1:25000, propone considerar tres edades relativas, para la identificación de los MVM a partir de los sensores remotos en estudios multitemporales; cuya distinción se realiza con base en la identificación de rasgos o características morfológicas del movimiento y que permitirán deducir el efecto y la intensidad de los procesos denudacionales sobre esté a través del tiempo, lo que se evidencia en el grado de modificaciones sufridas en su morfología inicial.

En la Tabla 7 se describen los atributos de edad relativa de acuerdo a la guía de metodología para la zonificación de amenaza a movimientos en masa.

Tabla 7. **Consideraciones para establecer la edad relativa de un movimiento en masa según (SGC, 2017)**

EDAD RELATIVA		
Reciente (R)	Antiguo (A)	Relicto (S)
Movimientos en masa que han sido identificados mediante cambios morfológicos en imágenes cuyas fechas de adquisición son las más recientes dentro del intervalo de tiempo de la fotointerpretación multitemporal o que sus características morfológicas se encuentran frescas, de manera que faciliten la identificación de su mecanismo en campo.	Se considera a un movimiento en masa como antiguo si en el análisis multitemporal fue identificado en las imágenes más antiguas disponibles o es un movimiento en masa existente, incluso desde épocas anteriores a la fecha de la imagen más antigua disponible	Un movimiento en masa es relicto cuando sus características morfológicas son difusas, las condiciones geoambientales que lo originaron son diferentes a las actuales.

**c. Localización geográfica y documental del evento.**

En (PMA:GCA, 2007) se indica que a través de la información geográfica y documental se pretende tener la localización general del evento y plantea cuatro aspectos a tener en cuenta para los inventarios de estos: división política, Coordenadas, Referentes geográficos y Documentación. En esta información se debe indicar algún accidente geográfico cercano o del mismo lugar de ocurrencia, que permita localizar el movimiento con respecto a él.

Cabe anotar que un inventario de movimientos en masa puede contar con más información que la detallada en el presente documento, sin embargo es importante mencionar que autores como (Hung, Leroueil, & Picarelli, 2014) indican que la metodología a emplear y la información que contenga un inventarios de MVM depende del tipo de problema y por ende no es practico establecer un procedimiento único o una metodología estándar que sea aplicable a todos, por tanto los atributos que se han descrito anteriormente corresponden a las características definidas para el inventario desarrollado en el presente estudio.

**3.3.1.3. Erosión.**

Definida como el desgaste de la superficie terrestre por agentes externos, como el agua y el viento RAE 2010, en (IDEAM, U.D.C.A, 2015). Es originada por la combinación de factores tales como el clima (acción de lluvias, fuertes o periodos prolongados de sequía seguidos de fuertes lluvias), pendientes largas y pronunciadas, inadecuada utilización del suelo, escasa o ninguna cobertura vegetal entre otros, según (Ramirez, 2010) es un fenómeno natural que en gran medida es acelerada por el hombre, (Suarez, 1998) la define como el desprendimiento transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento, puede ser generada tanto por el agua como por el viento.

Según (IDEAM, U.D.C.A, 2015) la clasificación de este fenómeno se realiza de acuerdo a tres criterios relacionados con origen (Tipo), dominio de las manifestaciones (clase) y la intensidad del proceso (grado). A continuación se describen los tipos y clases que se contemplan en el protocolo de degradación de suelos por erosión realizado por el IDEAM.

- **Erosión Hídrica.**

Es un proceso de pérdida de la capa superficial del suelo por disgregación y transporte de las partículas debido a la acción del agua (gotas de lluvia y escurrimiento superficial), (IDEAM, U.D.C.A, 2015). Los principales factores que la controlan son: la precipitación, cobertura vegetal, la topografía y las propiedades del suelo. Con respecto a la precipitación las propiedades que afectan la erosividad son: cantidad, intensidad, distribución de la lluvia, velocidad y tamaños de la gota. (Rivera, 2007) Indica que el agua es el factor que más actúa en zonas tropicales como es el caso de Colombia.

(Rios, 2018) indica que la erosión hídrica se produce bajo dos condiciones: la primera cuando el impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo excede la capacidad de este para resistir el desprendimiento y la segunda cuando la escorrentía superficial ejerce un esfuerzo cortante mayor que el esfuerzo crítico admisible por las fuerzas cohesivas del suelo. En la Tabla 8 se presentan las principales clases de erosión hídrica.

Tabla 8. **Clases de erosión hídrica. Elaboración propia con base en (IDEAM, U.D.C.A, 2015)**

Clase	Descripción
Laminar	Es la remoción más o menos uniforme del suelo de un área sin el desarrollo de canales de agua conspicuos. Denominada comúnmente "calvas de erosión". (IDEAM, U.D.C.A, 2015). Es producida cuando la totalidad de la superficie del terreno se erosiona gradualmente de manera más o menos uniforme.
Surcos	Un surco es una depresión lineal o canal vacío en el suelo que acarrea agua, luego de las precipitaciones. Los surcos se alinean en general de forma perpendicular a la pendiente y se forman en series de líneas paralelas. LADA 2007, en (IDEAM, U.D.C.A, 2015). Se puede presentar en terrenos escarpados o casi planos.
Terraceo	Forma particular de erosión que se presenta en zonas de ganadería: es producida por el pisoteo del ganado que genera, sobre las laderas, una forma de sistemas de terrazas discontinuas y poco organizadas (IDEAM, U.D.C.A, 2015).
Cárcava	La cárcava es la forma producida por la socavación repetida sobre el terreno, debido al flujo incontrolado de los escurrimientos superficiales. (Anaya, 1991).

Clase	Descripción
Salpicadura	Erosión producida por las gotas de lluvia que golpean el suelo desnudo a alta velocidad, fragmentando los gránulos y agregados de suelo y desprendiendo las partículas de la masa del suelo. (IDEAM, U.D.C.A, 2015).

**- Erosión Eólica**

Es causada por el viento que levanta y transporta las partículas de suelo, produciendo acumulaciones. Entre sus causas se atribuyen una insuficiente protección del suelo por la cubierta vegetal, destrucción de la estructura del suelo y niveles bajos de humedad. (Rivera, 2007) la define como el evento mediante el cual se produce la remoción del material superficial, la selección y el transporte por medio del viento, Involucra la movilización o (deflación), el transporte, la abrasión, la selección y la deposición. En cuanto a las clases para este tipo de erosión, estas se describen de acuerdo con las características morfológicas de los sedimentos transportados y depositados (Tabla 9).

Tabla 9. **Clases de erosión eólica. Elaboración propia con base en (IDEAM, U.D.C.A, 2015).**

Clase	Descripción
Crestas y Ripples	Formas transversales y superficies rizadas que presentan una gran extensión lateral.
Dunas	Acumulaciones de arena de mayor envergadura y tamaño presentan formas longitudinales, transversales y equidimensionales.
Depresión de deflación	Cuencas que se originan en áreas desprovistas de vegetación en donde el suelo está expuesto a la acción del viento.
Pavimento desértico	Superficie cubierta únicamente con fragmentos de roca.

Según la intensidad del proceso, este es clasificado por su grado que se da de acuerdo a la estimación de pérdida superficial del suelo y se presenta en cuatro categorías descritas en la Tabla 10.

Tabla 10. **Grados de erosión. Elaboración propia con base en (IDEAM, U.D.C.A, 2015).**

Grado	Descripción	Características
Ligera	Alguna evidencia de daño a los horizontes superficiales del suelo La pérdida del suelo puede llegar hasta un 25 o 50% del horizonte A.	No se observan huellas visibles de surcos o inicios de cárcavas
Moderada	Evidencia clara de remoción de los horizontes superficiales del suelo Se presenta pérdida entre el 50 y 75% del espesor original del horizonte A.	Se aprecian manifestaciones de surcos, terracedos, y pequeñas cárcavas
Severa	Horizontes superficiales completamente removidos y horizontes subsuperficiales expuestos.	Se presentan surcos, calvas, o terracedos de formas frecuentes o cárcavas con moderada frecuencia
Muy severa	Pérdida total de los horizontes superficiales	Se presentan redes de surcos y cárcavas intrínsecas, vegetación rala o nula

Autores como (Varela, 1982) indica que la intensidad de erosión se expresa en pérdidas de suelo, y que las clasificaciones para estudios de clases de intensidad están basados en el porcentaje de suelo que se pierda en la capa superficial o de todo el perfil, este autor anota que este criterio no puede ser identificado en fotointerpretación. Para el caso del presente estudio el grado de la erosión no fue clasificado durante el proceso realizado.

#### **3.3.1.4. Componente metodológico**

Considerando que la metodología desarrollada se fundamenta en el uso de técnicas de interpretación visual de imágenes de sensores remotos, a continuación se presentan algunos conceptos fundamentales para la aplicación de dichas técnicas.

- **Preprocesamiento de imágenes**

Son todos aquellos procesos de manipulación, mejoramiento y extracción de la información de las imágenes crudas cuyo fin es la corrección de las distorsiones geométricas, radiométricas que permiten una mejor visualización de la imagen para el proceso de interpretación.

- **Interpretación visual de imágenes de sensores remotos.**

Algunos autores como (Chang & Liu, 2005) y (Westen, 2013) indican que la interpretación de imágenes de sensores remotos es un proceso empírico y subjetivo, se trata de un arte más que una ciencia y requiere de profesionales debidamente capacitados y experimentados, a su vez se requieren de reglas de interpretación y de asociación para la correcta identificación de los elementos de interés como los MVM, reglas que también se requieren para la interpretación de la erosión ya que de acuerdo con la metodología de FAO et al. (1979), Publicada en español (FAO, PNUMA, UNESCO, 1980) entre las técnicas para su detección se encuentra la percepción remota.

Es importante mencionar que autores como (Westen, 2013) indican que la correcta interpretación de temáticas como los movimientos en masa está basada en tres criterios nombrados en la Figura 25 y que son aplicables a cualquier tema que pueda extraerse a partir de interpretación visual de imágenes de sensores remotos.



Figura 25. Factores que intervienen en la interpretación de imágenes de sensores remotos. Elaboración propia con base en (Westen, 2013)

- **Propiedades pictóricas morfológicas (PPM) aplicadas la identificación de MVM y Erosión.**

Al conjunto de reglas y asociaciones para la interpretación visual de imágenes se les conoce como propiedades pictórico morfológicas o criterios de interpretación visual (Chuvieco, 2010). Dentro de estas propiedades se encuentran: forma, tono/color, textura, posición geográfica y patrón espacial (Tabla 11).

Tabla 11. **Propiedades pictórico - morfológicas para interpretación visual de sensores remotos.**

Propiedad	Descripción
Forma	Rasgos característicos inherentes a los objetos y que permiten la identificación en la imagen. (IGAC, 2005).
Tono	Brillantez con la cual la luz es reflejada y registrada en la foto imagen
Textura	Se refiere a la repetición de tonos en grupos de objetos que son demasiado pequeños para ser discriminados individualmente (Aguilar, M.A., 2002.)
Posición geográfica	Posición que ocupa un objeto con respecto a él o a otro objeto que permite su asociación e identificación. Es el resultado de una deducción y no una variable primaria permite la identificación y categorización del objeto.
Patrón	Arreglo espacial de un conjunto de objetos o asociaciones de objetos similares, repetición sistemática de formas. (Aguilar, M.A., 2002.)

Autores como (Chang & Liu, 2005) , describen estas reglas de interpretación para MVM que de acuerdo a autores como: (Metternicht, Hurni, & Gogu, 2005) y (Fausto Guzzetti, 2012), estos criterios definen los indicadores cualitativos y cuantitativos para su reconocimiento a partir de imágenes de sensores remotos. Para el caso de la erosión

(Bergsma, 1989) presento ciertas pautas en cuanto a estas reglas, en la Tabla 12 y Tabla 13 se mencionan los criterios para los MVM y la erosión junto con características adicionales, reunidas a partir de la información bibliográfica consultada en el presente estudio.

Tabla 12. *.Reglas de interpretación de asociación para identificar movimientos en masa. (Chang & Liu, 2005)*

Regla Clave	Contenido
Criterio de Tono-color	El color, junto con la forma, es responsable en gran medida de la identidad objetual, Tonos claros, cambios en tonos de vegetación.
Criterio de Localización	En las inmediaciones de líneas de crestas, bordes de caminos, al lado de cierre de un canal del río, en zonas de pendiente fuerte.
Criterio de Forma	Forma lenticular, golpe de cuchara o acumulada, forma de árbol en cuencas de ríos, forma rectangular o triangular cercanas a las riveras de ríos, coronas controladas en media luna, concavidades, ondulaciones y lóbulos bien definidos
Criterio de Dirección	El eje longitudinal está en dirección de la gravedad o perpendicular a las líneas de flujo.
Criterio de Sombras	Las sombras son aplicadas para asistir al intérprete a percibir anomalías en fondos de los ríos y caminos en imágenes 2D.

Tabla 13. *Reglas de interpretación de asociación para identificar erosión. Elaboración propia construido a partir de (Bergsma, 1989), (Varela, 1982) e (IDEAM, U.D.C.A, 2015)*

REGLAS	EROSIÓN LAMINAR	EROSIÓN EN SURCOS	EROSIÓN EN CÁRCAVAS
Tono y textura	Cambios de color en la superficie o un apreciable cambio en la vegetación (por lo general tonos más claros).  Como parte de los horizontes se han erosionado, causando el deterioro apreciable de la fertilidad, disminuyendo la capacidad de retención de humedad y profundidad efectiva las plantas no crecerán o lo harán con menor vigor lo que genera cambios en los	Cambios de color en la superficie o un apreciable cambio en la vegetación (por lo general tonos más claros)  Patrones de flujo (líneas) causados por el escurrimiento.	Cambios de color contrastante en la superficie o un apreciable cambio en la vegetación, por ejemplo paredes desnudas.  Como parte de los horizontes se han erosionado (en parte o en su totalidad), causando un deterioro drástico de la fertilidad, disminuyendo la capacidad de retención de humedad y profundidad efectiva las plantas no crecerán o la harán con menor vigor lo que genera cambios en los tonos y textura.
Patrón	Moteos debido a cambios de tonos o repetición de los mismos (más oscuro o más claro) que generan patrones y formas irregulares que se extienden a lo largo del contorno del relieve. pueden tener límites naturales, de uso o cobertura de la tierra.	Moteos que se extienden a lo largo del contorno del relieve, tiene límites naturales, límites de uso o cobertura de la tierra  Repetición de patrones elongados	Rasgos lineales contrastantes, con frecuencia ramificaciones que cruzan el contorno del relieve, principalmente con un patrón dendrítico o paralelo

		casi alineados y paralelos.	
Localización	En áreas cuya cobertura está asociada principalmente a Territorios agrícolas y Zonas desprovistas de vegetación Zonas convexas, cimas En zonas de Límites de parcelas, o en zonas abandonadas	En áreas cuya cobertura está asociada principalmente a Territorios agrícolas, Zonas desprovistas de vegetación, o donde no se realizan prácticas de manejo Zonas plano convexas, en laderas irregulares principalmente en la parte media.	En áreas cuya cobertura está asociada principalmente a Territorios agrícolas o en Zonas desprovistas de vegetación.  Con frecuencia en las partes más empinadas de las pendientes convexas, en las superiores de las cóncavas, en la exposición de drenajes de las vías, en los senderos producidos por animales, en las grietas ocasionadas por llantas de vehículos entre otros.  En los primeros estadios en laderas irregulares principalmente parte media e inferior, a medida que avanza su crecimiento pueden llegar hasta la cima.
Vegetación	Pobre o ausente cuando está activa	Pobre o ausente cuando está activa	Ausente en las cárcavas jóvenes; baja en cárcavas incipientes y maduras

**- Captura de la información (Topología)**

La información capturada por medio de la interpretación, se realiza bajo el modelo vectorial, donde es necesario validar ciertos procesos para garantizar su calidad. Dentro de estos se encuentra la topología, la cual expresa las relaciones espaciales entre características de vectores (puntos, poli líneas y polígonos) conectados o adyacentes que se encuentren bajo un sistema de información geográfica. Los datos topológicos o basados en la topología sirven para detectar y corregir errores de digitalización. (QGIS, 2017)

Dichos errores topológicos pueden presentarse de varias formas dependiendo de la geometría que se haya definido para la captura de la información, en el caso de las capas de MVM y erosión cuya geometría es tipo polígono, los errores pueden incluir polígonos abiertos, huecos en los bordes o superposición, estos errores rompen la relación entre elementos y afectan las información que se pudiera desprender de las capas interpretadas por tal razón y dado que la información fue capturada en el software ArcGis, en la Tabla 14 se describen las principales reglas topológicas aplicadas a las capas de MVM y erosión en este software.

Tabla 14. **Reglas topológicas aplicadas a las capas de erosión y MVM. Proyecto Navarco.**  
*Elaboración propia Construido a partir de (ESRI)*

Regla topológica	Descripción	
Must Not overlap	Superposición de polígonos: se crean errores de polígono desde las áreas donde estos se superponen	
Must Not Have Gaps	Vacíos dentro de la capa interpretada: Cuando las capas deben formar una estructura continua, sin áreas nulas ni espacios.	
Must Be Covered By Feature Class of	Cubrimiento exacto de la zona de estudio (interpretación realizada al polígono límite de la zona de estudio)	

### 3.3.1.5. Metodología - Interpretación Movimientos en Masa y Erosión

El proceso metodológico propuesto para la interpretación de erosión y movimientos en masa en el proyecto Navarco, se realizó con base en el objeto del convenio entre la CRQ y el IGAC que consistió en "aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para la realización de un estudio para la identificación, caracterización y espacialización cartográfica a escala 1:10000 de los procesos erosivos en la unidad hidrográfica del Río Navarco en el municipio de Salento departamento del Quindío", de esta manera se determinó la información temática y los insumos a utilizar en la espacialización tanto de la erosión como de los MVM, se definieron los lineamientos conceptuales que se tendrían en cuenta en el proceso de identificación y caracterización de la información, así como los periodos de tiempo en los cuales se realizaría la interpretación, finalmente se realizó el análisis de la información capturada. En la Figura 26 se observa el proceso metodológico seguido.

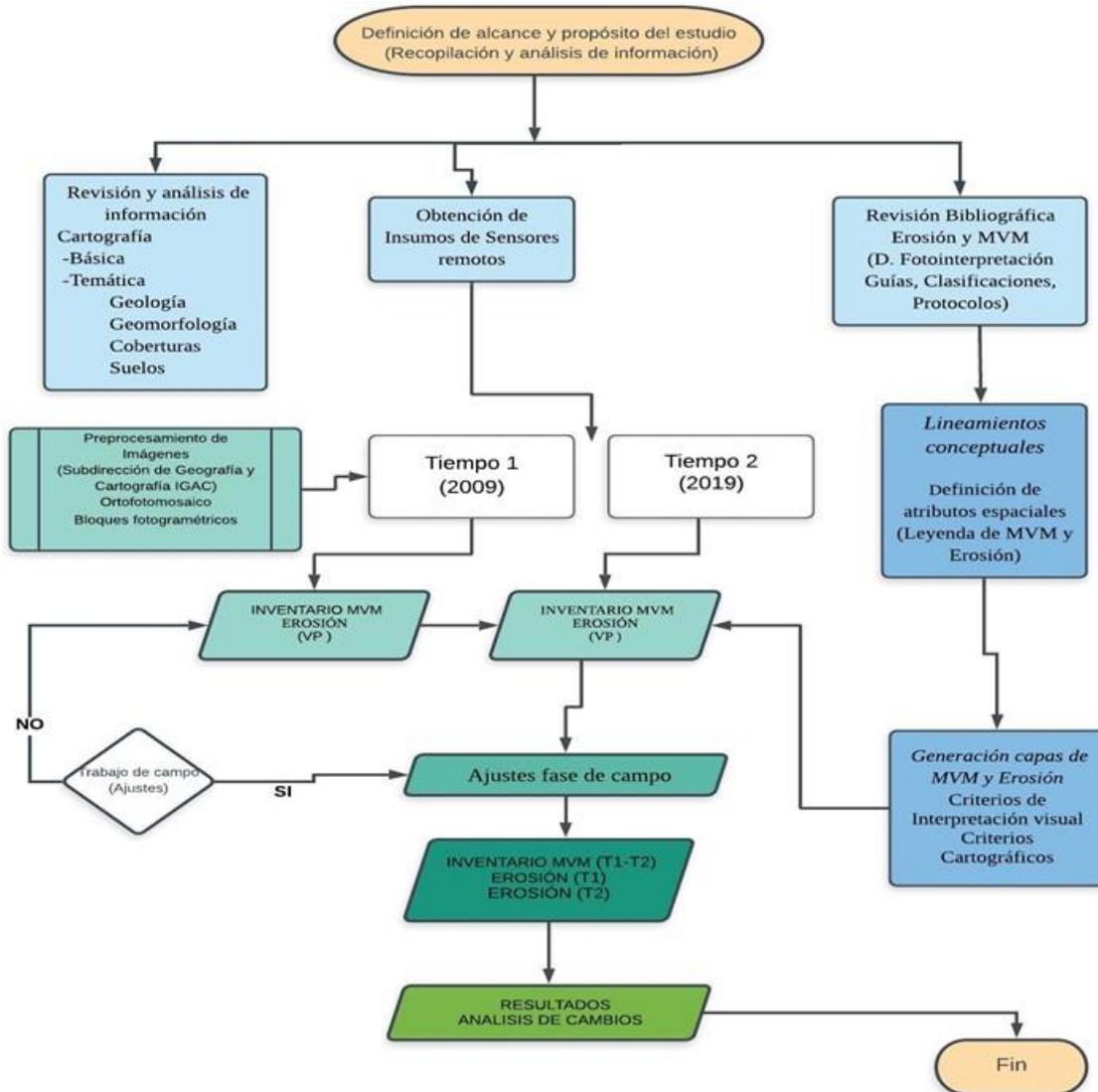


Figura 26. Diagrama metodológico

- Zona de estudio

El área de estudio se enmarca dentro de la cuenca del río Navarco. Ubicada en su totalidad en el municipio de Salento, departamento del Quindío, Limita hacia el sur con los municipios de Calarcá (Quindío) y Cajamarca (Tolima), Los centros poblados más cercanos son hacia el norte Salento y al occidente Circasia, Armenia y Calarcá. Entre los afluentes del río Navarco se encuentran las quebradas Manizales, Santa Librada y San Julián (Figura 27)

Las altitudes del área oscilan entre 1638 msnm en la parte más baja donde el río Navarco desemboca al río Quindío, mientras que la zona con mayores alturas se encuentra hacia el sur oriente con máximas de 3700 msnm. Según (IDEAM, 2014) la mayor parte del área se encuentra en clima húmedo y hacia la zona más oriental superhúmedo.

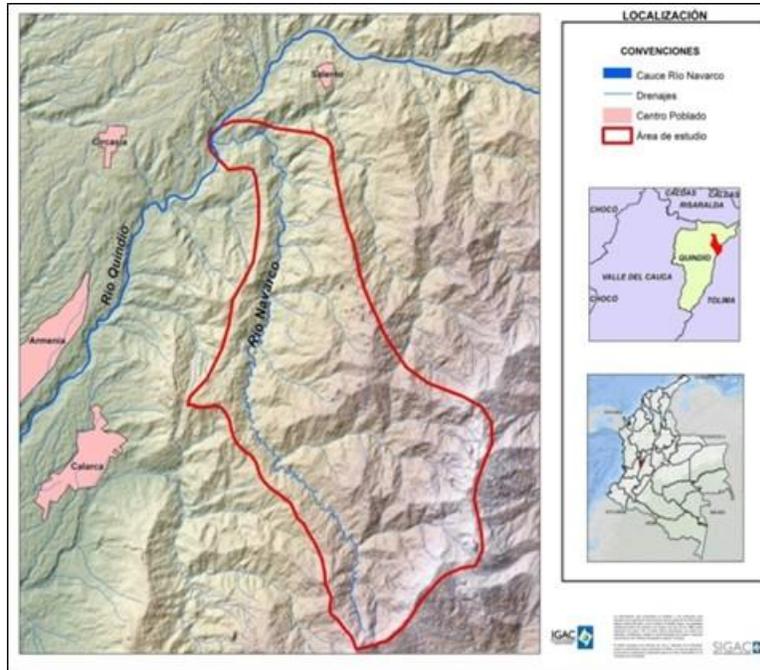


Figura 27. Localización área de estudio

- **Recopilación y análisis**

Con el fin de tener todos los elementos necesarios para la correcta contextualización y caracterización biofísica del área de estudio se revisó información básica y temática del área, esta información se describe brevemente a continuación.

Cartografía básica: Con respecto a la cartografía básica consultada en el área se tienen cartografía escala 1:10.000, 25.000 y 100.000.

Cartografía temática: Se consultaron varias capas de información, obtenidas tanto por el IGAC como por otras instituciones, entre esta se encuentran:

- Geología

La información geológica fue tomada de las planchas escala 1:100.000. 224-Pereira, 244-Ibague y 243-Armenia del Servicio Geológico Colombiano. En la Figura 28 se representa el cubrimiento de esta información en la zona de estudio.

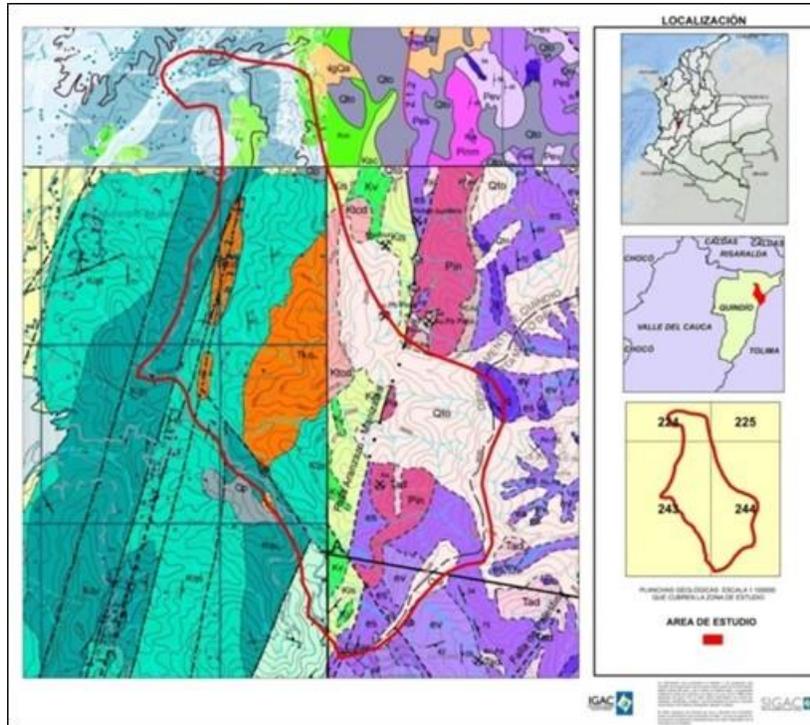


Figura 28. Planchas geológicas Escala 1:100000 que cubren la zona de estudio.

De acuerdo a la información geológica escala 1:100000 en el área se encuentran rocas Paleozoicas representadas por las unidades del Grupo Cajamarca donde predominan los esquistos cuarzo-Sericíticos y cloríticos con evidencias de metamorfismo regional. (SGC, 2009) y Rocas ígneas intrusivas representadas por el intrusivo de la línea de composición cuarzodiorita y granodiorita.

Hacia el occidente se encuentran rocas cretácicas representadas por la formación Quebradagrande la cual se compone de dos miembros que corresponden a intercalaciones de flujos volcánicos y estratos sedimentarios(SGC, 1982)

Con respecto a los depósitos cuaternarios, hacia el sector oriental se reportan depósitos piroclásticos de ceniza y lapilli los cuales cubren las unidades del Grupo Cajamarca y Quebradagrande; hacia el norte se presentan flujos de lodo de origen volcánico (SGC, 1984)

- *Geomorfología*

La información geomorfológica fue realizada a escala 1:10.000 por la Subdirección de Agrología siguiendo la Metodología (IGAC, 2017). En la Figura 29 y Figura 30 se observa el Mapa geomorfológico obtenido y la leyenda que lo acompaña.

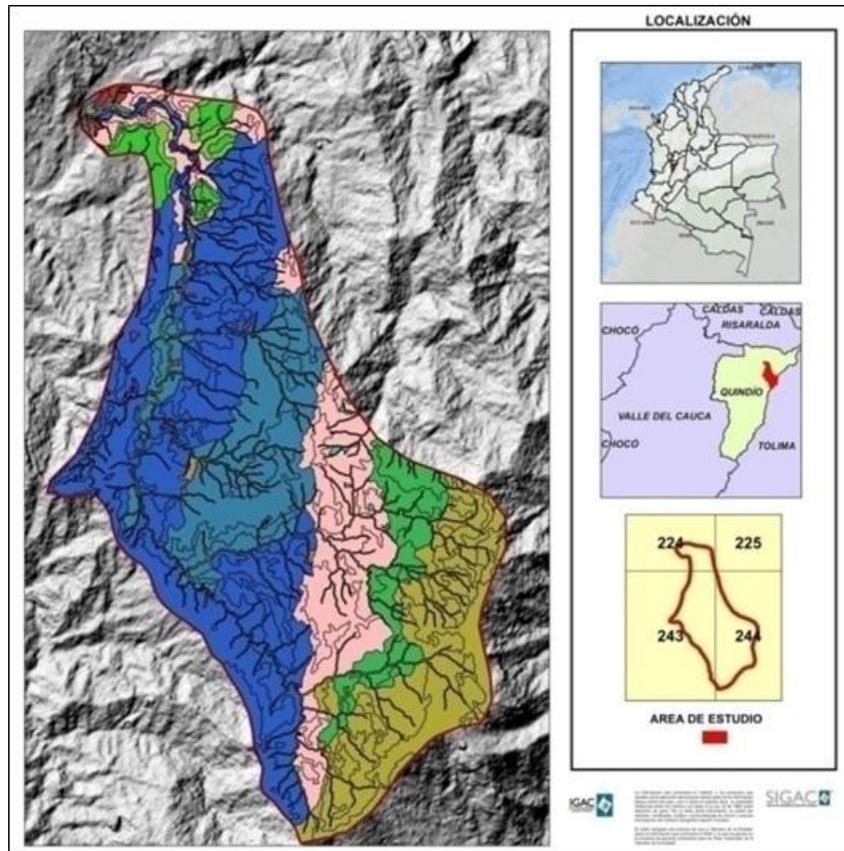


Figura 29. Capa de geomorfología aplicada a levantamiento de suelos Metodología (IGAC, 2017)

PAISAJE	AMBIENTE	TIPO DE RELIEVE	MATERIAL	FORMA DE TERRENO	SIMBOLO	COLOR	
MONTAÑA	Estructural	Fila y viga	Alteritas de rocas ígneas intrusivas félsicas e intermedias	Ladera	MFiL		
				Ladera coluvial	MFiG		
			Alteritas de rocas metamórficas de protolito ígneo - metamórfico	Ladera	MFgL		
				Ladera	MFmL		
		Alteritas de rocas metasedimentarias	Ladera	MFzL			
			Ladera coluvial	MFzG			
		Alteritas de rocas volcanosedimentarias	Ladera	MFvL			
			Ladera coluvial	MFvG			
	Denudacional	Loma	Alteritas de rocas Metasedimentarias	Ladera	MLzL		
				Ladera	MLvL		
	Deposicional	Abanico terraza	Sedimentos clásticos aluviales	Cuerpo	MQP		
				Talud	MQT		
			Cono de deyección	Sedimentos clásticos aluviales	Cuerpo	MDP	
					Cuerpo	MGP	
		Glacis de acumulación	Sedimentos clásticos coluvio - aluviales	Cuerpo	MJP		
				Cuerpo	MMP		
		Valle estrecho	Terraza fluviovolcánica	Sedimentos volcanoclásticos	Plano de terraza ondulado	MHO	
					Talud	MHT	
			Sedimentos clásticos aluvio - coluviales	Bajo	MVPD		
				Barra longitudinal	MVB		
Plano de terraza 1				MVP1			
Plano de terraza 2				MVP2			
Sobrevega	MVS						
Vega	MVV						
Vallecito	Sedimentos clásticos aluvio - coluviales	Vega	MZV				

Figura 30. Leyenda Geomorfológica aplicada a levantamiento de suelos Metodología (IGAC, 2017).

A nivel general el área está representada geomorfológicamente por el Paisaje de Montaña, conformado principalmente por relieves de ambiente estructural, asociados a las dinámicas internas propias del levantamiento de las cordillera Central, este ambiente está representado por el tipo de relieve de Filas y Vigas, que domina en las parte medias y altas de la cuenca, hacia el sector norte se presenta el ambiente deposicional, distribuido principalmente en las zonas aledañas al cauce del río Navarco (Conos de deyección, glacis de acumulación) y otros directamente relacionados al transporte de sedimentos clásticos aluviales por parte del río (Valle estrecho y Abanicos terrazas), también en el norte del área se presentan Terrazas Fluviovolcánicas productos de los eventos volcánicos ocurridos en el nevado del Quindío.

- *Cobertura*

La cobertura terrestre comprende los atributos de la tierra: cuerpos de agua, vegetación, vías, cuerpos rocosos, y superficies húmedas algunos de estos naturales y otros afectados y/o producto de las necesidades del hombre (CIAF, 1981). Esta información fue realizada por la subdirección de Agrología con la metodología Corine Land Cover a escala a 1:10.000 (Figura 31).

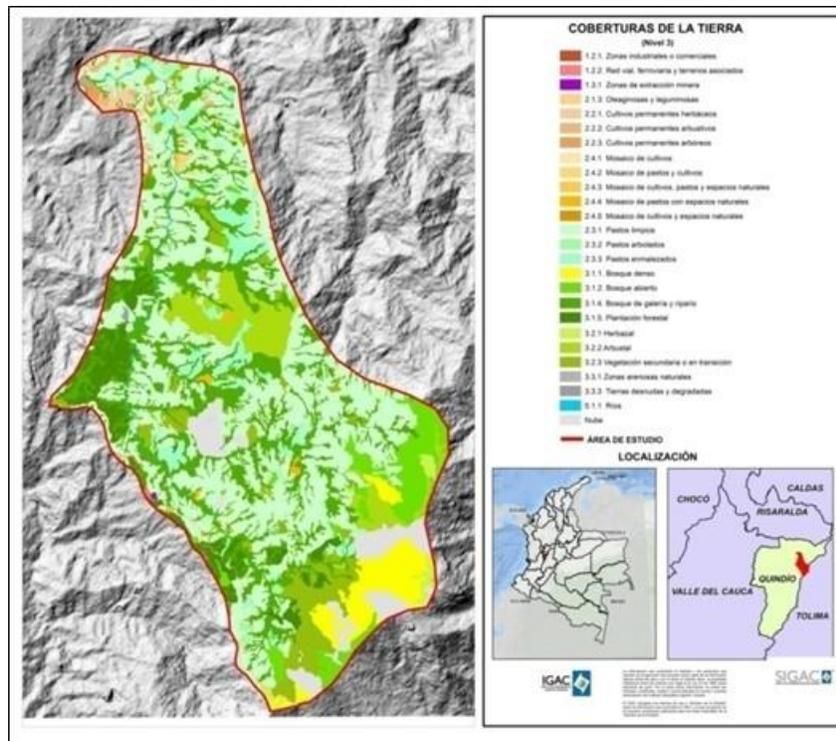


Figura 31. Capa de coberturas. Metodología Corine Land Cover

- *Suelos*

Esta información presenta las clases de suelo hasta nivel de familia, en los diferentes ambientes edafogénicos a escala 1:100000. Fue realizado de acuerdo con los métodos y procedimientos propuestos por el IGAC (Figura 32). (IGAC, 2013).

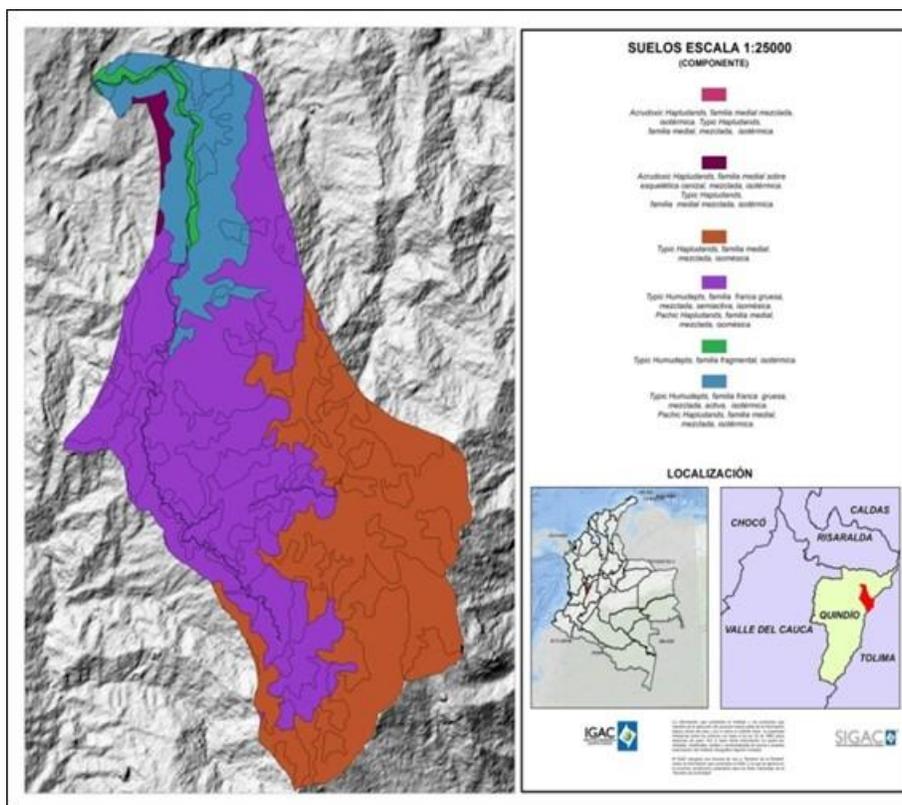


Figura 32. Capa de Suelos. (IGAC, 2013)

- **Obtención de insumos**

Los principales insumos utilizados fueron realizados por la Subdirección de Geografía y Cartografía del IGAC y consistieron en ortofotomosaicos y bloques fotogramétricos generados a partir de fotografías aéreas de la cámara Vexcel Ultracam D1, y ortofotomosaicos generados mediante la cámara multispectral Sequoia transportada en UAV (vehículo aéreo no tripulado) del IGAC, así mismo como insumos de apoyo se emplearon imágenes disponibles en el banco nacional de imágenes y en plataformas de libre acceso como Sentinels Scientific Data Hub o programas gratuitos de visualización y descarga de imágenes satelitales (SAS. Planet), de igual forma se utilizó el Modelo digital de elevación ALOS PALSAR con resolución espacial de 12 m y sus productos derivados (p.e. mapas de pendientes y sombras).

En la Tabla 15 y Figura 33 se describen las características y se muestran detalles de los principales insumos utilizados para la captura de información cartográfica de MVM y de

<sup>1</sup> Información adicional de la imágenes fuente del ortofotomosaico y bloques fotogramétricos empleados en la interpretación del año 2009 pueden ser consultadas en (IGAC, 2010)

erosión. De igual forma en la Tabla 16 y Figura 34 se muestran características así como ventanas de los insumos empleados como apoyo para los procesos realizados.

Tabla 15. **Características Imágenes de sensores remotos plataformas aerotransportadas utilizadas en el proyecto Navarco**

Sensores Aerotransportados					
Sensor	Resolución	No. Bandas	Res. Espacial (m)	Año toma de fotografía	Cubrimiento área de estudio (%)
Vexcel Ultracam	Muy Alta-Submétrica	Azul(B), Verde(G), Rojo(R) e Infrarrojo cercano(IR)	GSD 0.15 – 0.3	2009	100
				2019	76
Sequoia	Muy Alta-Submétrica	Verde(G), Rojo(R), Borde Rojo(Re), Infrarrojo Cercano(IR)	0.49	2019	47



MVM Visto en Cámara Vexcel  
Año: 2009.  
Composición en Verdadero color



MVM Visto en Cámara Sequoia  
Año: 2019.  
Composición en Falso color  
RGB: (IR,G,Re)



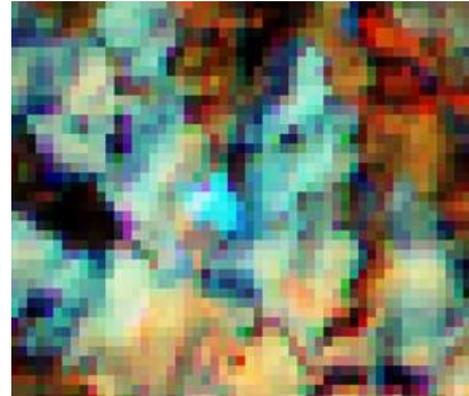
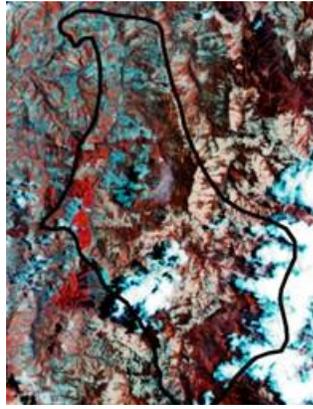
MVM Visto en Cámara Vexcel  
Año: 2019.  
Composición en verdadero color

Figura 33. **Detalle Insumos principales empleados en la captura de MVM y Erosión**

Tabla 16. **Características Imágenes de sensores remotos plataformas satelitales utilizadas en el proyecto Navarco**

Sensor	No. Bandas	Res. Espacial (m)	Años toma de imagen
RapidEye	Azul(B), Verde(G), Rojo(R), Borde Rojo(Re), Infrarrojo Cercano(IR)	MS: 5	2010

Sentinel 2	12 Bandas. Bandas empleadas en la interpretación. Azul(B), Verde(G), Rojo(R) e Infrarrojo cercano(IR)	10	2019
------------	---	----	------



*Imágenes Sentinel 2  
(Izq-Enero2019)(Der-Septiembre2019)  
Composición en falso color:  
RGB: IR,G,B*

*Imagen RapidEye  
Año 2010  
Composición en falso color  
RGB: IR, Re, R*

**Figura 34. Insumos apoyo empleados en la captura de MVM y Erosión**

**- Preprocesamiento de imágenes.**

Es importante indicar que la interpretación visual de la información requirió tanto de insumos en 2D como en 3D (estereoscopia digital), por lo que se requirió la generación de ortofotomosaicos y bloques fotogramétricos construidos a partir de las fotografías aéreas de la cámara Vexcel Ultracam (Figura 36). Se interpretaron aproximadamente 90 pares estereocópicos para el año 2009, y 71 para el 2019, así mismo para este año se emplearon 4 ortofotomosaicos de la cámara Sequoia (Verde, Rojo, Borde de Rojo, Infrarrojo Cercano), y un ortofotomosaico de la cámara Vexcel, insumos generados por la Sudirección de Geografía y Cartografía del IGAC, adicionalmente se generaron composiciones en falso color realizados a partir de los diferentes ortofotomosaicos del IGAC. En el caso de la interpretación con estereoscopia digital se utilizó la extensión Stereo Analyst, del software ArcGIS. En la Figura 35 se observa la estación de trabajo y los elementos empleados para la realización de la interpretación con estereoscopia digital.



Figura 35. Estación de trabajo para la captura de información con estereoscopia digital.

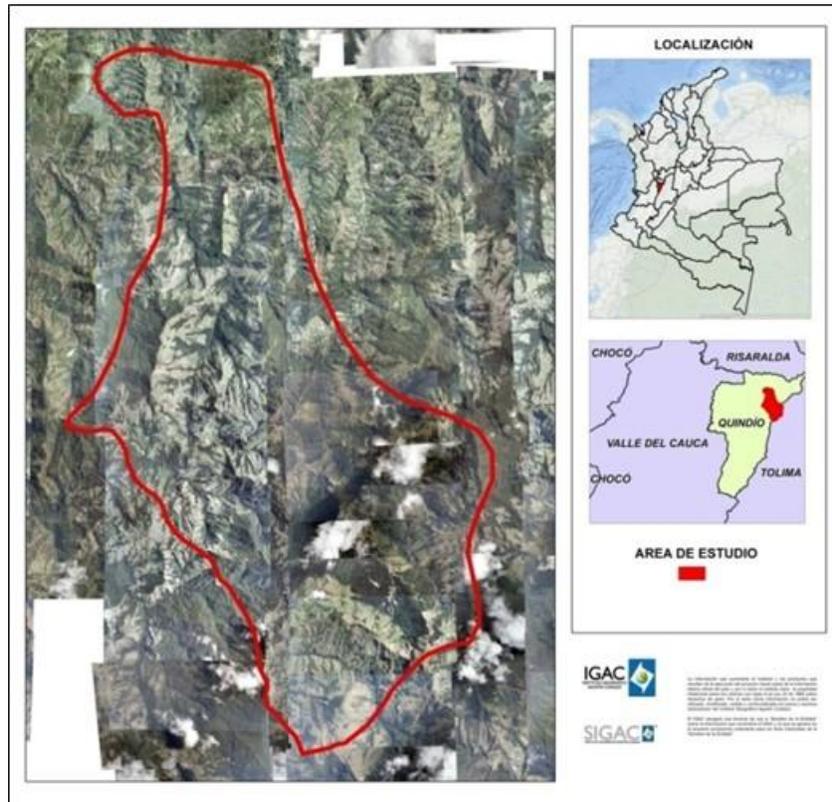


Figura 36. Esquema ilustrativo de los bloques fotogramétricos empleados para la interpretación estereoscópica digital.

### 3.3.1.6. Generación de capas de MVM y Erosión.

A continuación se describen los lineamientos seguidos para la interpretación y captura de información de MVM y erosión así como los atributos espaciales y unidades mínimas de mapeo que se utilizaron para su caracterización.

#### - Movimientos en Masa

Los MVM fueron capturados de acuerdo a su morfología típica, en el caso de los deslizamientos desde la corona hasta donde el perímetro y los flancos fueron claramente visibles (Figura 37). Para el caso de los flujos desde el escarpe (área de suministro), hasta el cuerpo (área de depósito) (Figura 38). Para los otros tipos (caídas de roca, reptación entre otros) donde la zona de depósito o de llegada fuera claramente identificada. La geometría bajo la cual se realizó la captura fue de tipo polígono y se representaron todos aquellos movimientos que fueron claramente identificados en el insumo empleado.

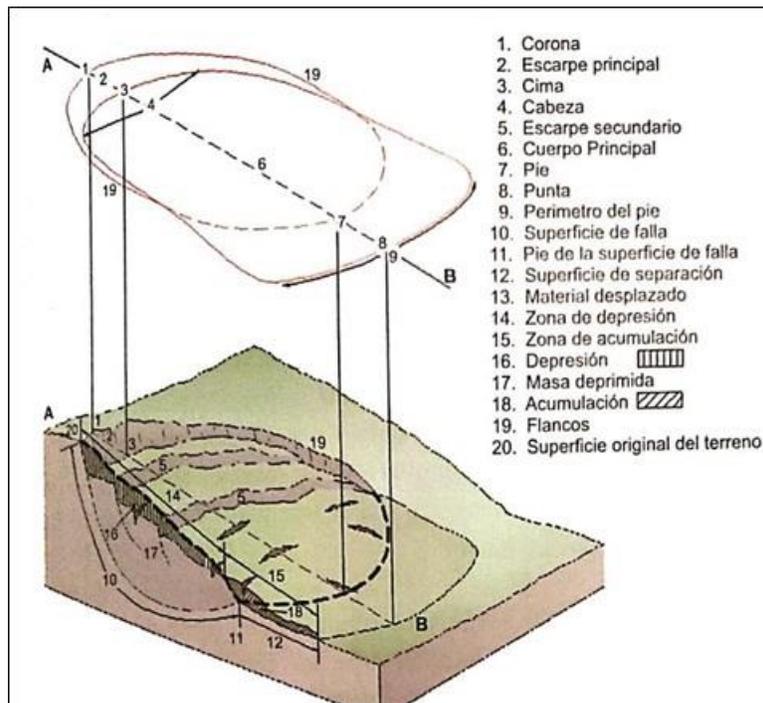


Figura 37. Parte de un MVM tipo deslizamiento. Fuente (PMA:GCA, 2007)

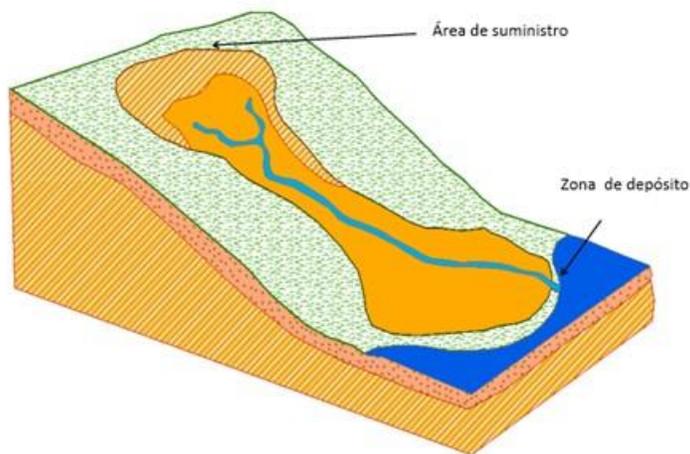


Figura 38. Partes de un MVM tipo flujo. Fuente: elaboración propia con base (SGC, 2017)

Como los movimientos en masa se presentan de forma aleatoria en el área de estudio, la capa generada fue de tipo discontinuo. Para esta captura no se tuvo una unidad mínima de mapeo, ya que como lo indica el Servicio Geológico Colombiano en la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000 (SGC, 2017) es necesario representar todos los movimientos en masa identificados en el área, incluso aquellos que tengan área menor a la mínima unidad cartografiable.

- **Atributos Espaciales.**

Los atributos que fueron utilizados para identificar los movimientos en masa y su posterior captura son listados en la Tabla 17.

Tabla 17. Leyenda para la captura de MVM en el proyecto Navarco

Edad relativa	Asociación	Fuente	Fecha	Área (ha)	Símbolo	Observación	Característica
Reciente	Aislado		T1 o T2		RAT1		
	Canalizado				RCT1		
	Aislado/vía				RAVT1		
	Canalizado/vía				RCVT1		
Antiguo	Aislado				AAT1		
	Canalizado				ACT1		
	Aislado/vía				AAVT1		
	Canalizado/vía				ACVT1		
Relicto	Aislado				SAT1		
	Canalizado				SCT1		
	Aislado/vía				SAVT1		
	Canalizado/vía				SCVT1		

a. **Edad relativa:** De acuerdo con la definición presentada en el marco conceptual, así como las características de las imágenes de sensores remotos disponibles, este atributo considero tres edades reciente, antiguo y relicto.

b. **Asociación:** Hace referencia a la posición geográfica del movimiento en masa con respecto a la red de drenaje del área de estudio y contemplo los siguientes atributos así:

Canalizado(C): Movimientos cuya masa desplazada se encuentra localizada sobre la red de drenaje.

Canalizado/Vía (CV): Movimientos cuya masa desplazada se encuentra localizada sobre la red de drenaje y a una vía primaria o secundaria.

Aislado(A): Movimiento cuya masa desplazada no se encuentra localizada directamente sobre la red de drenaje.

Aislado/Vía (AV): Movimiento cuya masa desplazada no se encuentra localizada directamente sobre la red de drenaje pero si se encuentre relacionado a la red vial de la zona de estudio.

c. **Fuente:** Corresponderá al insumo que se empleó para la captura de la morfología del movimiento en masa,

d. **Fecha:** Corresponderá al año de toma del insumo que se empleó para la captura de la morfología del movimiento en masa, para el caso de la zona de estudio se realizó para dos tiempos

T1: 2009

T2: 2019

e. **Área:** Corresponde al área en Hectáreas del movimiento en masa identificado

f. **Símbolo:** El símbolo para la representación del movimiento en masa se construyó en el siguiente orden

Edad Relativa + Asociación+ Año

g. **Observación:** Corresponderá a alguna característica relevante que se considere necesario incluir dentro de la información capturada.(Tipo de Movimiento, características en el insumo donde se capturo, entre otras)

h. **Característica:** Debido a que en algunos sectores los fenómenos de erosión y movimientos en masa coexisten se utilizara este atributo para señalar posibles asociaciones con los atributos de erosión.

Asociación Cárcava: si en el MVM coexisten cárcavas o si por definición corresponde a una cárcava que debido a su poca extensión no fue capturada dentro de la capa de movimientos en masa

Afloramiento Rocoso: Atributo para designar lugares donde la roca este expuesta pero no se evidencie desplazamiento de masa para la fecha del insumo que se esté interpretando.

- **Erosión**

La identificación de la erosión se basó principalmente en algunos de los aspectos referenciados en el protocolo para la identificación y degradación de suelos por erosión, realizado por (IDEAM, U.D.C.A, 2015) . En la interpretación se diferenciaron principalmente el Tipo de Erosión (origen) y la Clase (dominio de la manifestación).

Para las zonas donde no se observaron evidencias de erosión de suelos y que correspondían a otros atributos a capturar, estas se identificaron bajo atributos mencionados en la metodología Corine Land Cover.

La geometría bajo la cual se realizó la captura fue de tipo polígono. La unidad mínima cartografiada fue de 1 Ha atendiendo a la escala del estudio.

o **Atributos Espaciales.**

Los atributos que fueron utilizados para identificar la erosión y su posterior captura son listados en la Tabla 18. Se emplearon atributos base y complementarios los cuales se describen a continuación.

Tipo de Erosión	Clase	Fuente	Fecha	Área (ha)	Símbolo
Hídrica	Laminar				WL
	Cárcavas				WC
	Laminar y Surcos				WLS
	Terraceo				WT
	Terraceo y Laminar				WTL
	Terraceo y Cárcavas				WTC
Sin Evidencia					N
Afloramiento Rocoso					AF
Cuerpo de agua					CA
Zona de extracción minera					ZA

Territorios asociados a red vial				ZU
----------------------------------	--	--	--	----

Tabla 18. **Leyenda para la captura de erosión en el proyecto Navarco**

○ **Atributos Espaciales Base (Tipo y clase)**

Debido a las condiciones propias del área, el tipo de erosión fue clasificado como Hídrica. Con respecto a la clase o dominio de las manifestaciones para el caso de la zona de estudio se contemplaron las siguientes:

- a) Laminar
- b) Terraceo
- c) Cárcavas
- d) Clases combinadas

Con respecto a la clase (d), el (IDEAM, U.D.C.A, 2015), hace referencia a que clasificaciones únicas como combinadas pueden ser utilizadas para todas las escalas de análisis y estas deben ser complementadas por características específicas por medio de la cuantificación del número de rasgos o del área afectada entre otros. Por tanto dentro del proyecto de la cuenca del Río Navarco en aquellos sectores donde el proceso de individualización de la manifestación no pudo realizarse ya sea porque su extensión no supero la unidad mínima cartografiable o porque el patrón de distribución no puede ser representado de manera individual, en este sentido la zonificación se realizó bajo las siguientes unidades combinadas:

- **Laminar y Surcos:** zonas en cultivos o que han sido cultivadas en donde no se realizan prácticas de conservación de suelos y por lo general el surco de cultivo sigue la dirección de la pendiente.
- **Terraceo y laminar:** zonas donde se encuentran asociadas las dos manifestaciones en proporciones similares, sin que una domine sobre la otra o en zonas donde se presenten coberturas como pastos y bajo cultivos transitorios o permanentes.
- **Terraceo y cárcavas:** zonas donde se observaron cárcavas o indicadores del desarrollo de las mismas (exposición de drenajes en las vías, senderos producidos por animales grietas, entre otras) cuando se presentaron más de dos eventos en zonas aledañas, la zonificación se incluyó dentro de esta clase.

○ **Atributos Espaciales Complementarios**

- a) Sin evidencia: zonas donde no hay evidencia de erosión o donde la identificación del origen y dominio de la manifestación no se puede realizar con el sensor y el método utilizado.

- b) Afloramiento Rocoso: Definida como capas de rocas expuestas sin desarrollo de vegetación. (IDEAM, 2010)
- c) Cuerpo de agua: Bajo esta categoría se incluirán los cuerpos de agua relevantes para el estudio y que se encuentren dentro de las categorías referenciadas en la metodología Corine Land Cover 2010. Pueden ser permanentes, intermitentes, estacionales o cuerpos de agua en movimiento (lagos, lagunas, ciénagas, depósitos, y estanques naturales o artificiales, embalses, ríos y canales).
- d) Zona de extracción minera: se incluirán todas aquellas áreas definidas en la metodología Corine Land Cover 2010, las cuales comprenden zonas donde se extrae o acumula materiales asociados con actividades mineras, de construcción, producción industrial y vertimiento de residuos de diferente origen.
- e) Territorios asociados a red vial. Espacios artificializados con infraestructuras como carreteras autopistas y vías férreas; se incluye parqueaderos asociados con la infraestructura de transporte y áreas de almacenamiento de material de mantenimiento. (IDEAM, 2010)

#### **3.3.1.7. Almacenamiento y calidad de la información**

La información capturada se gestionó en una geodatabase (gdb), bajo la estructura mostrada en la Figura 39. Así mismo durante la captura y almacenamiento de la información tanto de MVM como de Erosión, se revisaron aspectos relacionados a posibles inconsistencias en los polígonos digitalizados, que incluyeron: concordancia entre los atributos espaciales definidos (leyenda de interpretación), y los atributos gestionados en la gdb, polígonos adyacentes con el mismo código, aspectos topológicos referenciados en el marco conceptual, así como áreas mínima de mapeo. En la Tabla 19 se observa las reglas topológicas aplicadas a las dos capas generadas.

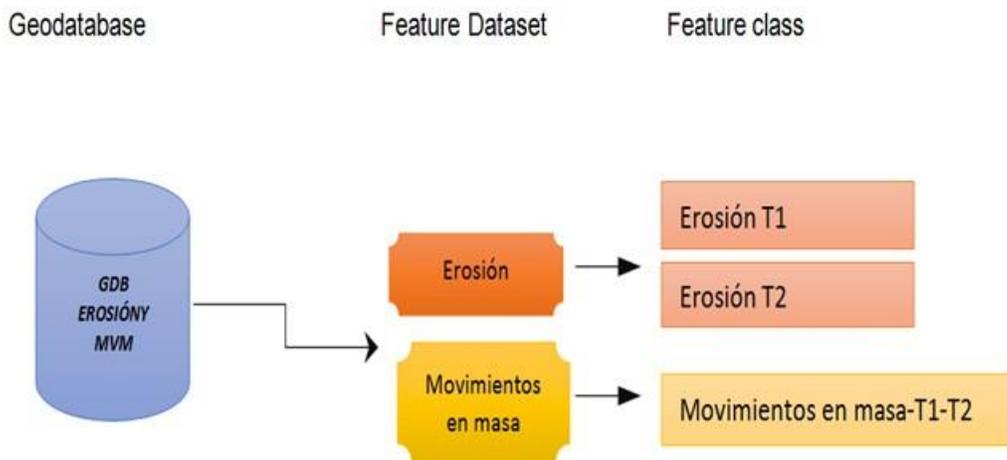


Figura 39. Estructura de almacenamiento de la información capturada. Proyecto Navarco

Tabla 19. Reglas topológicas aplicadas a las capas de MVM y Erosión. Proyecto Navarco.

Regla Topológica	Descripción	Capa
Must Not overlap	Superposición de polígonos	MVM y Erosión
Must Not Have Gaps	Vacios dentro de la capa interpretada	Erosión
Must Be Covered By Feature Class of	Cubrimiento exacto de la zona de estudio (interpretación realizada al polígono límite de la zona de estudio)	MVM y Erosión

### 3.3.1.8. Control de campo

Con el fin de verificar y ajustar tanto las delimitaciones como la caracterización de los MVM y la Erosión, se realizó una visita de campo en el mes de noviembre de 2019; para la captura de la información en campo se diseñó un formulario ágil y de fácil uso que permitiera recoger los aspectos más relevantes de las características del área con base en los atributos espaciales definidos para la interpretación de las dos temáticas.

Este formulario recogió parte de la información sugerida en (IDEAM, U.D.C.A, 2015) la cual es descrita en la Tabla 20. Cabe anotar que no toda la información descrita en el Protocolo fue tomada, ya que esta fue condensada de acuerdo a los lineamientos conceptuales que enmarcaron la interpretación en el presente estudio y que como el mismo protocolo indica es importante adaptar la información a recoger según las condiciones de cada región.

Tabla 20. **Información mínima para el diseño del formulario de captura de información de campo.**  
Fuente: elaboración propia con base en (IDEAM, U.D.C.A, 2015).

Información	Descripción
Información general del sitio	En este ítem se recogen la ubicación, características geomorfológicas, climáticas, uso de la tierra entre otras.
Información específica	Rasgos o manifestaciones de la erosión, dominio de los rasgos en el terreno, intensidad del proceso, cuantificación de los rasgos.
Espacios para observaciones	Información importante o relevante que no se consigne en el esquema general del formulario

En la Figura 40 se muestra el formulario diseñado, es importante mencionar que para el caso del campo Tipo en los Movimientos en masa, se tomaron los tipos más comunes en Colombia según (SGC, 2017), y para los atributos de clima ambiental se tomaron los contemplados en (IGAC, 2014). Así mismo en la Figura 41 se observan los puntos geográficos donde se capturo información de campo a partir del formato construido para tal fin. En el Anexo incluido en el DVD adjunto contenido en el DVD se muestra el formato de cada uno de los registros tomados en la fase de campo.

	<b>FORMATO CAPTURA DE INFORMACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA Y EROSIÓN</b>	<b>PROYECTO NAVARCO</b>
	<b>GESTIÓN AGROPECUARIA</b>	FECHA
		AAAA - MM - DD
		Formato Facilitativo V1

INFORMACIÓN GENERAL			
Describe Por	CODIGO OBSERVACION	Altitud	Fotografía N°
		Fecha	
Observación Fotografía			

GEOMORFOLOGÍA							
Paisaje		Tipo de Relieve		Forma del terreno		Pendiente (%)	Simbolo
Observación:							

LADERA							
% Pendiente Local	Longitud(m)		Forma				
	<50	100-300	Recta		Compleja		Irregular
	50-100	>300	Convexa		Cóncava		

CLIMA AMBIENTAL	
Tipos clima ambiental	Epoca
* Tabla 3 - Instructivo Código levantamiento de suelos	Seca <input type="checkbox"/> Lluviosa <input type="checkbox"/>
Observación:	

COBERTURA y USO - PRACTICA DE MANEJO	
Coberturas y Uso	Practica de manejo
	Mecanización y Laboreo (Azadón Machete entre otras)
	Fertilización
	Control de arvenses
	Siembras en contorno-Terrazas
	Acequias y canales
	Cultivos en Fajas
	Incorporación de residuos de cosecha
	Abonos orgánicos
Observación:	

EROSION			MOVIMIENTOS EN MASA			
Tipo	Clase	Grado	Tipo	Estado	Edad	Asociación
Hídrica	Laminar	Ligera	Caída	Activo	Antiguo	Aislado
	Surcos	Moderada	Deslizamientos			Canalizado
	Cárcavas					Reciente
	Terraceo	Severa	Volcamiento	Inactivo	Relicto	Canalizado/Vía
	Clases combinadas		Muy severa			
Sin Evidencia			Otro			
Profundidad (m) : Surco ( ) Cárcava( ) Deslizamiento ( )						
Ubicación						
Observación						

Elaboro: Selvy Vargas  
 Reviso: Jaime López

Figura 40. Formato de captura de información de movimientos en masa y erosión. Proyecto Navarco

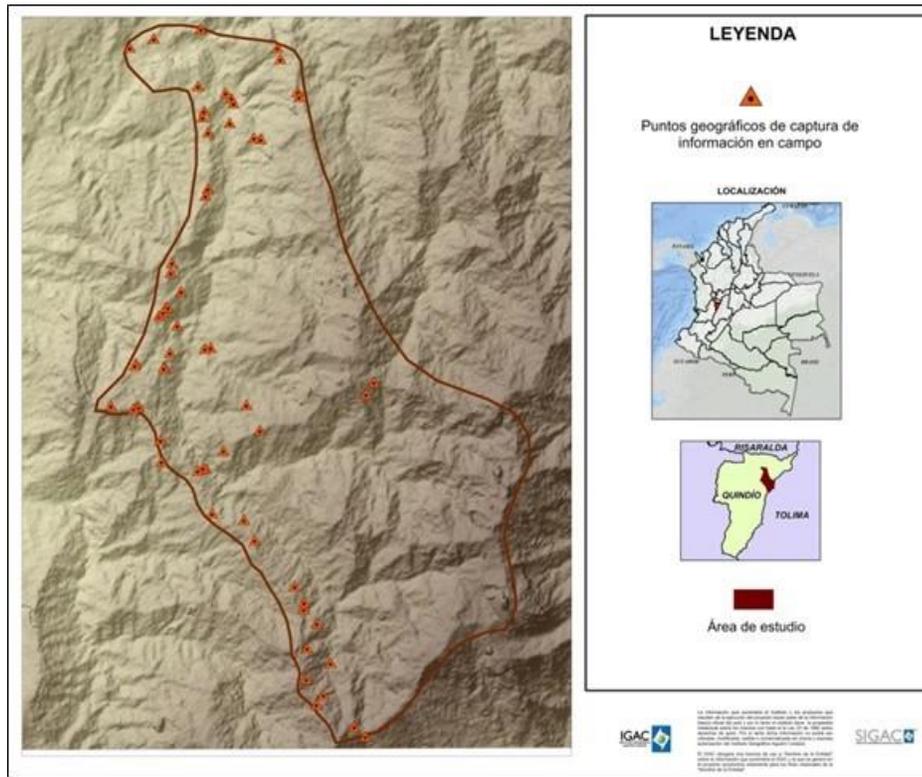


Figura 41. Puntos geográficos donde fue capturada la información en campo. Proyecto Navarco.

### 3.3.1.9. Resultados - Interpretación Movimientos en Masa y Erosión

De acuerdo al diseño metodológico planteado a continuación se describen los resultados alcanzados luego de las fases de interpretación para los años 2009 y 2019.

#### MVM

Como parte de las actividades para la realización del inventario de MVM en el área de estudio, se consultó el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del Servicio Geológico Colombiano (SGC) el cual registra, almacena, administra, procesa y visualiza información acerca de los movimiento en masa en Colombia, en la Tabla 21 se muestran los resultados arrojados para el municipio de Salento, cabe mencionar que una vez realizada la consulta solo un MVM se encuentra en el área objeto de estudio a la fecha de la consulta (Tabla 22)

Tabla 21. **Numero de eventos registrados en el SIMMA para el municipio de Salento. Fuente: Elaboración propia con base en (SGC)**

Tipo de Inventario	Municipio	N° Eventos
Catálogo	Salento	24

Inventario de información secundaria.	Salento	7
---------------------------------------	---------	---

Tabla 22. **Información del inventario de MVM reportado en el área de estudio de acuerdo al SIMMA.**  
**Fuente: Elaboración propia con base en (SGC)**

N° Eventos	Institución	Coordenadas		Fecha del evento
		Latitud	Longitud	
1	Unidad Departamental de Gestión de Riesgo de Desastres del departamento del Quindío	4° 36' 38"	-75° 34' 21.02"	23/05/2017

Con respecto al inventario multitemporal llevado a cabo en el presente estudio, se identificaron 463 MVM, de estos 355 ya se encontraban en el periodo 2009 y 108 corresponden a MVM identificados en el periodo 2019, en este último número también se incluyen las áreas donde los MVM incrementaron su extensión (43) y 65 corresponden a MVM identificados en el 2019 y que fueron caracterizados como de edad reciente. En la Figura 42 se observa la distribución de MVM en el área.

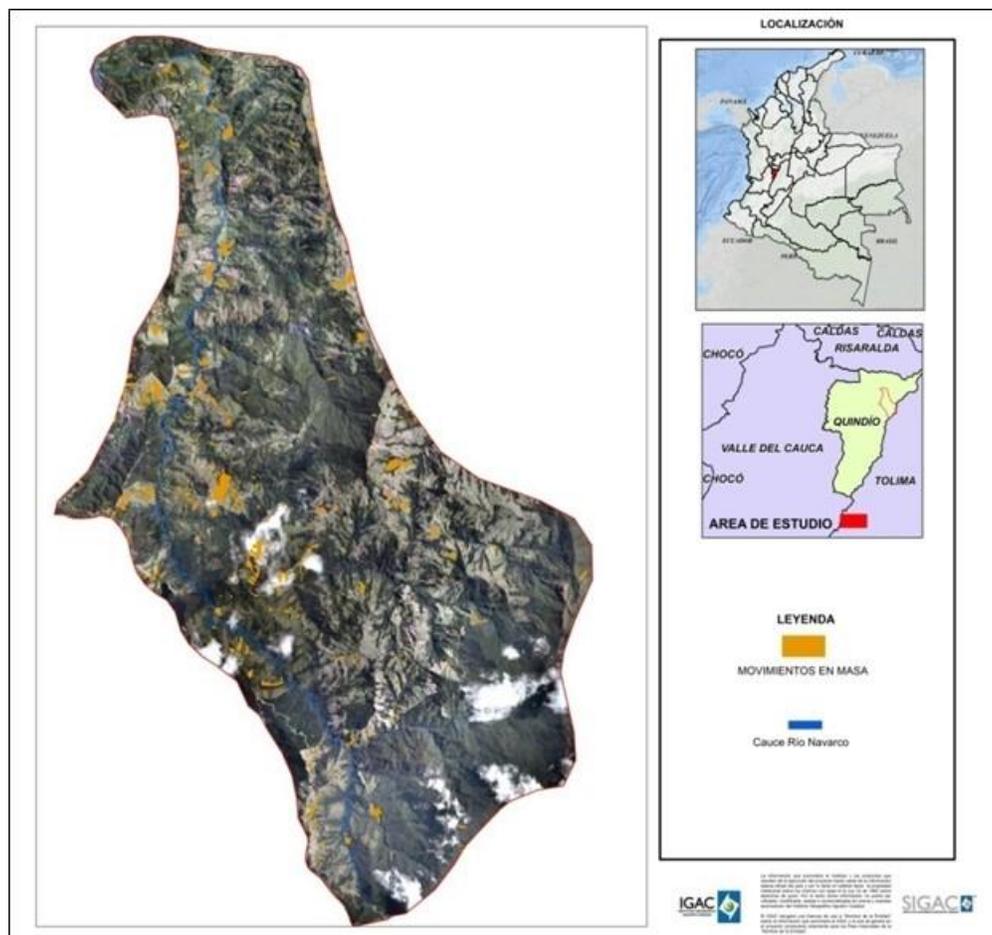


Figura 42. *Inventario de movimientos en masa en la Zona de estudio.*

De acuerdo al inventario realizado, se puede observar que varios de los MVM se encuentran localizados sobre rocas de la unidad geológica Quebradagrande, que de acuerdo a la clasificación de materiales geológicos (IGAC, 2018) es una unidad volcanosedimentaria compuesta principalmente por areniscas, calizas, lutitas y rocas volcánicas de composición intermedia a básica. Según (SGC, 1985) y (SGC, 2004) las rocas de esta unidad presentan intensa cataclasis y se encuentra afectadas por el sistema de fallas de Córdoba, Navarco, El Salado.

Así mismo se presentan MVM en la unidad geológica Complejo Rio Navarco y en las zonas de contacto donde este cuerpo ígneo intruye las rocas del complejo Cajamarca. Según él (SGC, 1985) las rocas del cuerpo intrusivo también muestran efecto cataclástico.

Geomorfológicamente las áreas donde se identificaron los MVM pertenecen al paisaje de montaña sobre el tipo de relieve de filas y vigas, las cuales comúnmente en el área presentan pendientes superiores a 20°.

Con relación a los suelos, en la zona de estudio estos se han originado a partir de materiales piroclásticos, formando horizontes subsuperficiales en donde el material parental característico es la ceniza volcánica y el lapilli. Este material genera los Andisoles, suelos característicos del área, los cuales presentan rasgos físico mecánicos especiales como son los fenómenos solifluidales generados por la alta capacidad de almacenamiento de agua, la granulométrica y la tixotropía.

En conjunto todos los aspectos geológicos, geomorfológicos entre otros hacen que la zona de estudio presente condiciones favorables para el desencadenamiento de MVM.

De igual forma en la Figura 43 se observan el número de Movimientos por edad relativa en el área, destacando que la mayoría son antiguos que se desarrollaron antes o durante el 2009 tiempo en el cual fueron tomados los insumos más antiguos empleados para la interpretación. Algunas características morfológicas de los MVM antiguos son mostradas en la Figura 44 y Figura 45.

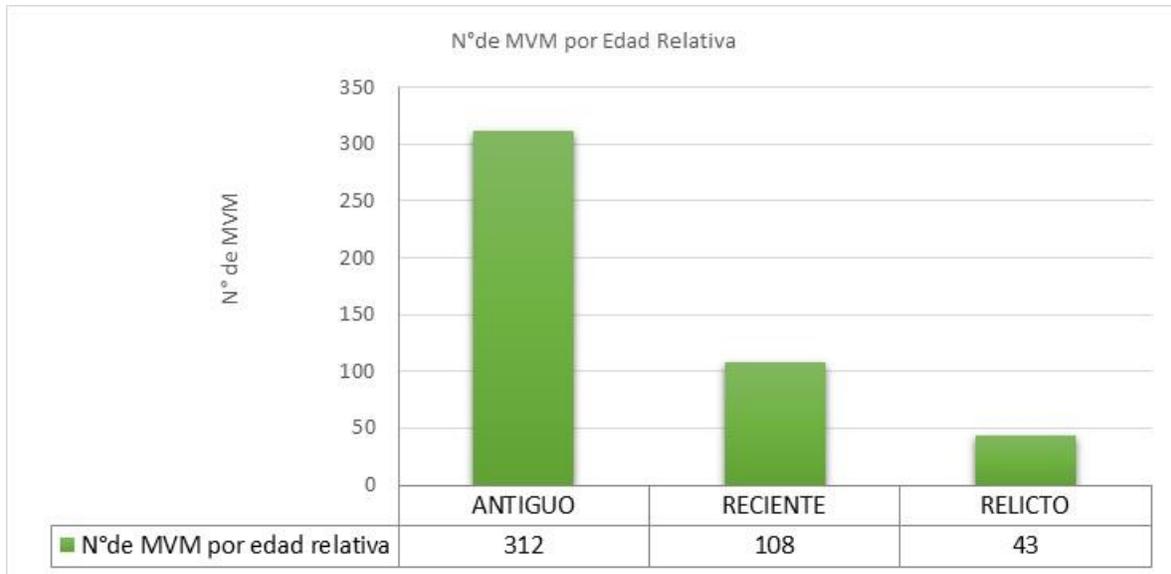


Figura 43. **Numero de Movimientos en masa por edad relativa. Zona de estudio**



Fotografías aéreas- Cámara Vexcel años 2009 y 2019. Composición en Verdadero color. Zona de estudio.

Figura 44. **MVM antiguos identificados en los periodos de tiempo interpretados (Años 2009 y 2019). Zona de estudio**

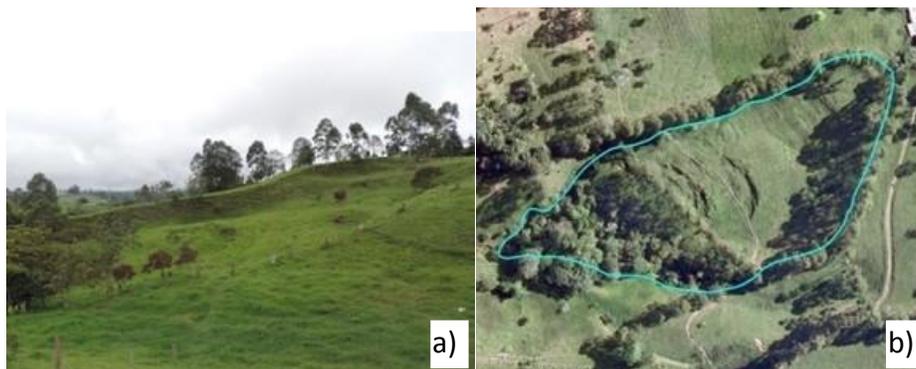
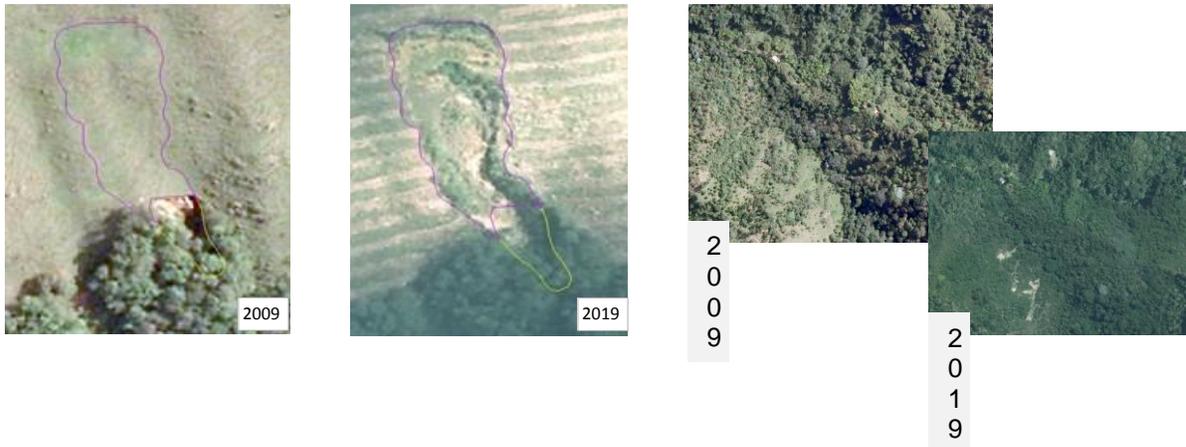


Figura 45. **.MVM antiguo. Zona de estudio. a) Fotografía zona de estudio- MVM antiguo b) Imágenes Cámara Vexcel - Composición en Verdadero color. Fotografías: Seiry Vargas 2019**

En la Figura 46 se observan cambios en las características morfológicas de los MVM, así como la generación de nuevos (Figura 47) los cuales fueron identificados en el último periodo de interpretación.



**Figura 46. MVM recientes identificados en los periodos de tiempo interpretados (Años 2009 y 2019). Zona de estudio. Fotografías aéreas- Cámara Vexcel años 2009 y 2019. Composición en Verdadero color.**



**Figura 47. MVM Reciente, identificado en los insumos del periodo 2019. Zona de estudio. a) Fotografía zona de estudio- MVM Reciente b) Imágenes Cámara Vexcel - 2019 - Composición en Verdadero color. Fotografías: Seiry Vargas 2019**

En la Figura 48 se observan como las características morfológicas de algunos MVM han cambiado en los diferentes periodos interpretados convirtiéndose en zonas difusas para último periodo, atendiendo a la definición de MVM relictos.



Figura 48. *MVM Relictos identificados en los periodos de tiempo interpretados (Años 2009 y 2019). Zona de estudio. Fotografías aéreas- Cámara Vexcel años 2009 y 2019. Composición en Verdadero color.*

Con respecto a su localización o posición geográfica, en las Figura 49 y Tabla 23 se observa que la mayoría de los MVM identificados presentan una asociación relacionado con la red de drenaje del área de estudio.

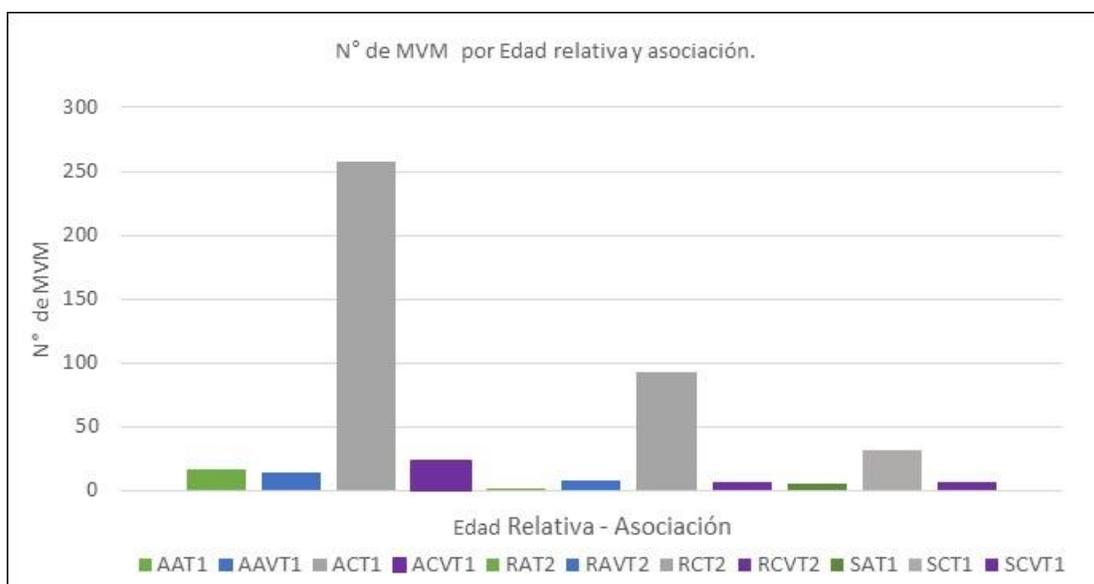


Figura 49. *Distribución de los MVM por edad relativa y asociación. Zona de estudio.*

Tabla 23. *Distribución por los atributos establecidos para el inventario de MVM para los años 2009 y 2019. Zona de estudio.*

Edad relativa	Asociación	Fecha	Símbolo	N° de eventos por edad relativa y asociación
ANTIGUO	AISLADO	2009	AAT1	17
ANTIGUO	AISLADO/VÍA	2009	AAVT1	14

ANTIGUO	CANALIZADO	2009	ACT1	258
ANTIGUO	CANALIZADO/VÍA	2009	ACVT1	23
RECIENTE	AISLADO	2019	RAT2	1
RECIENTE	AISLADO/VÍA	2019	RAVT2	8
RECIENTE	CANALIZADO	2019	RCT2	93
RECIENTE	CANALIZADO/VÍA	2019	RCVT2	6
RELICTO	AISLADO	2009	SAT1	5
RELICTO	CANALIZADO	2009	SCT1	32
RELICTO	CANALIZADO/VÍA	2009	SCVT1	6
<b>TOTAL</b>				463

## EROSIÓN

Una vez realizadas las interpretaciones para los dos periodos se pudo deducir que aproximadamente en el 40 % del área se presenta alguna clase de erosión (Tabla 24 y Figura 50), Con respecto a la distribución de los atributos complementarios, las zonas *sin evidencia* son las de mayor extensión en el área, esta categoría está asociada principalmente a Bosques (Galería, denso y abierto) y a vegetación secundaria o en transición (Figura 51) y se encuentra distribuida principalmente en la parte norte y centro oriental de la zona de estudio; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [LMRJ1].

Tabla 24. **Distribución de los atributos establecidos para la capa de erosión para los años 2009 y 2019. Zona de estudio.**

<i>Erosión y atributos complementarios</i>	<i>2009</i>		<i>2019</i>	
	<i>Área (Ha)</i>	<i>Porcentaje %</i>	<i>Área (Ha)</i>	<i>Porcentaje %</i>
Erosión hídrica	3619,39	42,98	3463,42	41,13
Sin evidencia	4677,71	55,54	4821,46	57,25
Afloramiento rocoso	34,40	0,41	34,40	0,41
Zona de extracción minera/Territorios urbanizados	4,35	0,05	9,63	0,11
Cuerpo de agua	85,71	1,02	92,65	1,10

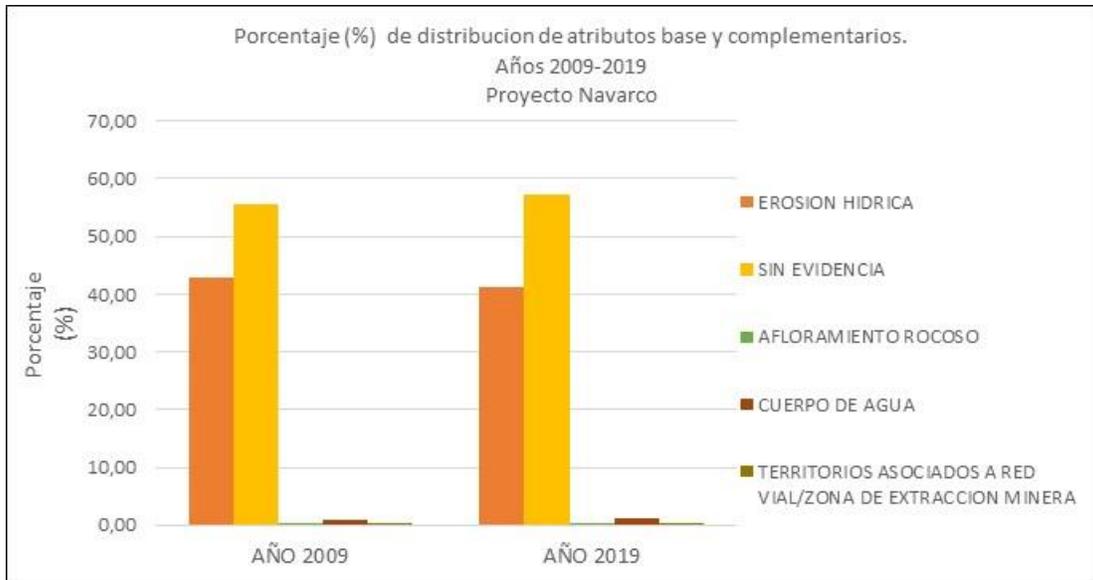


Figura 50. **Porcentaje (%) de distribución de atributos base y complementarios para los años 2009 y 2019. Zona de estudio.**

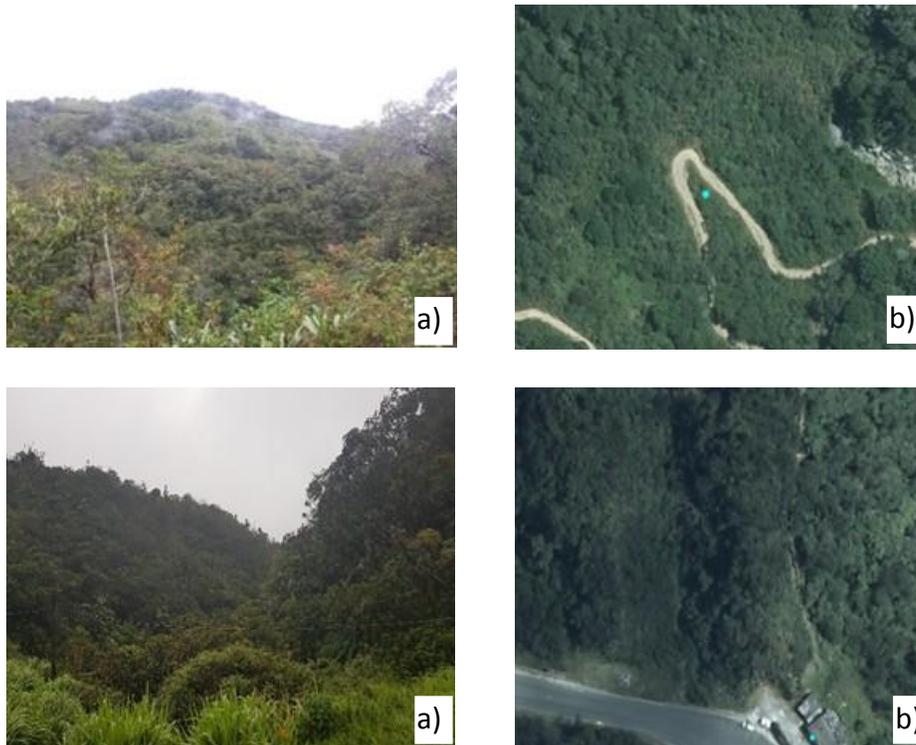


Figura 51. **Ejemplo atributos complementarios sin evidencia. Zona de estudio. Atributo complementario: Sin evidencia a) Fotografías zona de estudio donde se observan Bosques y Vegetación secundaria b) Imágenes Cámara Vexcel - Composición en Verdadero color. Fotografías: Jaime López 2019**

De acuerdo a la distribución de las clases de erosión identificadas bajo el esquema metodológico planteado, la clase con mayor predominancia es el terraceo donde dominan los pastos limpios y enmalezados, la vegetación secundaria o en transición y los cultivos permanentes arbóreos donde se realizan buenas prácticas de manejo. Le siguen el Terraceo y laminar, donde predominan los cultivos permanentes arbóreos (principalmente el aguacate) y en zonas de pastos limpios de acuerdo al patrón identificado para esta clase.

Las clases con menos presencia en el área son la Laminar desarrollada en zonas de pastos limpios, pastos enmalezados y las plantaciones forestales en los primeros estadios de crecimiento. Con respecto a la laminar y surcos se presentan coberturas como cultivos permanentes tales como café, plantaciones de coníferas entre otros, que de acuerdo a sus prácticas de manejo dejan suelos expuestos en algún momento de su desarrollo.

Las clases de menor proporción en el área son el Terraceo y Cárcavas y Las Cárcavas tendencias que se mantiene en los dos periodos de tiempo interpretados. En las Figura 54 y Figura 55 se observan ejemplos de las diferentes clases de erosión identificadas en el área de estudio y en la Figura 53 la zonificación de erosión para los años 2009 y 2019.

Es importante mencionar que el (IDEAM, U.D.C.A, 2015) Indica que las manifestaciones en el terreno de los procesos de erosión normalmente no se presentan solas, sino como una combinación, aspectos que también se evidenciaron en el área y que la importancia del entendimiento de la zonificación de acuerdo a los patrones establecidos podrán garantizar la réplica de este tipos de trabajos a otras aéreas del país.

Tabla 25. *.Distribución de las clases de erosión para los años 2009 y 2019. Zona de estudio.*

Tipo de Erosión	Clase	Símbolo	2009		2019	
			Área (Ha)	Porcentaje %	Área (Ha)	Porcentaje %
Hídrica	Cárcavas	WC	19,40	0,54	25,83	0,75
	Terraceo y cárcavas	WTC	141,83	3,92	135,58	3,91
	Laminar y surcos	WLS	257,49	7,11	227,52	6,57
	Laminar	WL	292,29	8,08	231,67	6,69
	Terraceo y laminar	WTL	845,29	23,35	1007,05	29,08
	Terraceo	WT	2063,09	57,00	1835,77	53,00

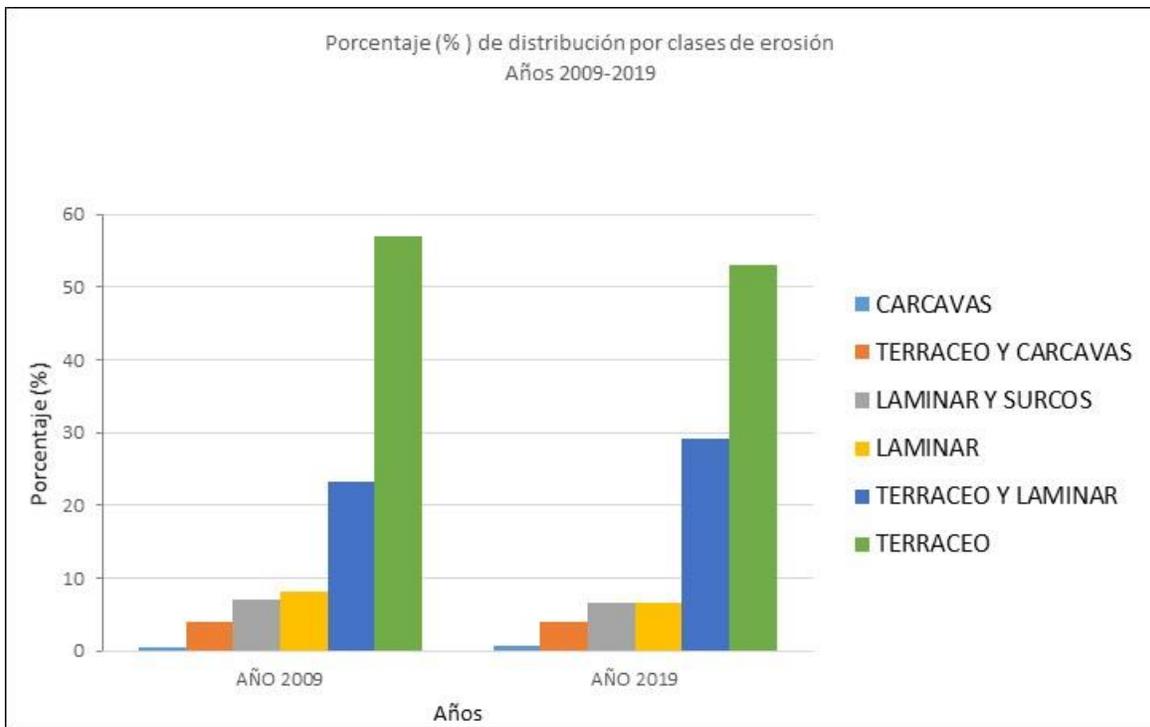


Figura 52. *Porcentaje (%) de distribución por clase de erosión para los años 2009 y 2019. Zona de estudio.*

En la Figura 53 se observan las zonificación de la erosión para los años 2009 y 2019.

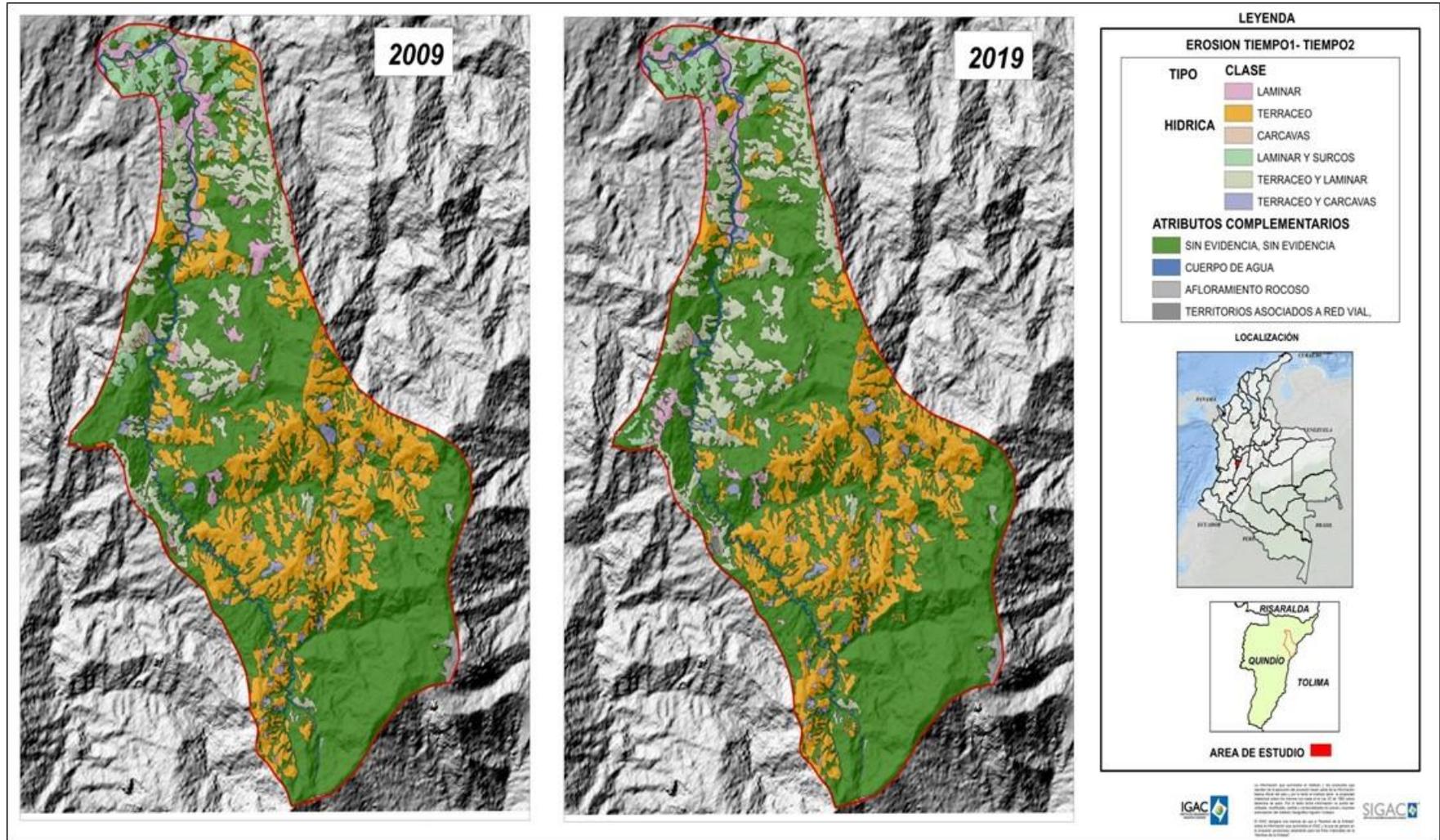


Figura 53. Zonificación de la erosión para los años 2009 y 2019. Zona de estudio.



a)



b)

Erosión (Tipo: Hídrica - Clase: Laminar) a) Cultivo de plantaciones forestales. Se observa zona de aprovechamiento forestal reciente, suelo desprotegido. b) Imágenes Cámara Vexcel: Composición en Verdadero color. Fotografías: Jaime López 2019

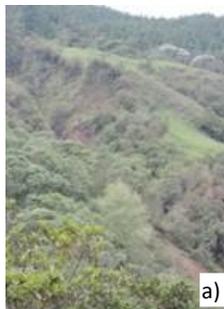


a)



b)

Erosión (Tipo: Hídrica - Clase: Terraceo)  
a) Fotografías zona de estudio donde se aprecia el desarrollo de terraceo sobre pastos limpios.  
b) Imágenes Cámara Vexcel: Composición en Verdadero color.  
Fotografías: Jaime López 2019



a)



a')



b)



b')

Erosión (Tipo: Hídrica - Clase: Cárcavas)  
a) y a'). Fotografías zona de estudio donde se aprecia la revegetalización de las cárcavas en climas húmedos  
Imágenes Cámara Vexcel: Composición en Verdadero color b) año:2009 b') año:2019  
Fotografías: Seiry Vargas 2019

**Figura 54. Ejemplos clases únicas en erosión. Zona de estudio.**



*Erosión (Tipo: Hídrica - Clase: Laminar y surcos)*  
 a) Fotografía zona de estudio. Cultivo permanente en donde sus prácticas de manejo incluyen siembra en dirección a la pendiente.  
 b) Imagen cámara Sequoia composición en falso color RGB: IR, G, Re  
 b') imágenes Cámara Vexcel: Composición en Verdadero color.  
 Fotografías: Seiry Vargas 2019



*Erosión (Tipo: Hídrica - Clase: Terraceo y Laminar)*  
 a) Fotografía zona de estudio. Se observa un desarrollo incipiente del terraceo en combinación con zonas sin desarrollo de esta clase.  
 b) imágenes Cámara Vexcel. Composición en Verdadero color.  
 Fotografías: Seiry Vargas 2019



*Erosión (Tipo: Hídrica - Clase: Terraceo y Cárcavas)* a) Fotografía zona de estudio. Donde se evidencia las dos clases. Al fondo el terraceo y en primer plano los rasgos asociados al desarrollo de cárcavas. b) Imágenes Cámara Vexcel. Composición en verdadero color.  
 Fotografías: Seiry Vargas 2019

**Figura 55. Ejemplos clases combinadas de erosión. Zona de estudio.**

---

### 3.4 INTERPRETACIÓN COBERTURA DE LA TIERRA. Proyecto Navarco

---

Subdirección de Agrología

---

Rubén Darío Romero Hernández

Juan Ricardo Mancera Flórez

---

## **COBERTURAS DE LA TIERRA Y ANALISIS MULTITEMPORAL 2009-2019.**

Para este estudio el análisis de coberturas de la tierra está dividido en dos etapas, la primera enfocada en la interpretación visual en pantalla, la segunda etapa en tomar la información generada por la interpretación para realizar un análisis de cambio de las coberturas entre dos periodos 2009 y 2019 evaluando los porcentajes de perdida y ganancia de las diferentes coberturas de la tierra presentes en la cuenca.

Las dos etapas mencionadas se basan en la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia en el 2004 a través de un convenio interadministrativo celebrado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de La Magdalena (CORMAGDALENA) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2008); con el ánimo de estandarizar un procedimiento para el país que permitiera en cuanto a coberturas de la tierra poder hablar un mismo lenguaje. Con base en esta metodología el IGAC, por medio de la Subdirección de Agrología ha venido desarrollando adaptaciones a escalas más detalladas, ejercicio que le ha permitido dar respuesta a múltiples necesidades de diferentes instituciones cuya demanda de información requiere análisis con mayor precisión espacial y temática.

### **3.4.1. Metodología**

La interpretación visual de las coberturas terrestres, bajo la metodología empleada en este estudio, es la actividad en la cual se lleva a cabo visualmente en pantalla, el proceso de comprender, traducir, delimitar y clasificar en un sistema jerárquico los diferentes tipos de Coberturas de la Tierra (IGAC, 2017)

Este proceso empieza con una definición de una unidad mínima de mapeo, basado en los cálculos y criterios planteados por (Vink, 1975) y los conceptos de percepción visual. Para el caso del estudio se definió como unidad mínima un área de 10.000 m<sup>2</sup> o 1 ha, en los niveles de la leyenda de cobertura dos a cinco y 7.500 m<sup>2</sup> o 0.75 ha para el nivel uno de la leyenda. Para elementos lineales como ríos y vías no se tiene en cuenta esta área sino un ancho mínimo de interpretación de 4 m. Así mismo se toma del estudio del Quindío del 2010 la leyenda de coberturas con la que se va realizar la clasificación la cual se incluye en los Anexo incluido en el DVD adjuntos de este documento.

Es importante destacar que la información temática base para realizar este trabajo proviene del estudio de coberturas realizado en el departamento del Quindío, (IGAC, 2010) y se mantuvo los parámetros anteriores definidos en función del estudio mencionado para poder armonizar la interpretación del periodo 2019

### **3.4.2. Insumos**

Para el estudio en el proceso de interpretación de coberturas se dispuso de imágenes de alta resolución de dos sensores remotos con 50 cm de pixel obtenido de la Cama Vexcel Ultracam a partir de imágenes drone. También se contó con información de apoyo como imágenes sentinel 2A de libre descarga, Geo visores de alta resolución como Base Map de ArcGis, cartografía básica de la cuenca e información secundar.

En cuanto al estado de la información se puede mencionar que los insumos principales tuvieron un cubrimiento cercano al 85% del área de la cuenca debido a problemas en la toma de las imágenes que dejaron vacíos en dos sectores, el primero en la parte centro oriental de la cuenca sobre la verdea Navarco alto y el segundo sector, de mayor tamaño, sobre la parte sur oriental de la cuenca sobre la divisoria de aguas. En la Figura 56, se muestra los diferentes insumos y las zonas sin cubrimiento de la cuenca.



**Figura 56.** Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Fuente. Insumos suministrados por la Subdirección de Cartografía IGAC, 2019

Para subsanar la falta de información en los sectores antes mencionados la interpretación del periodo 2019 se apoya en la ortofoto empleada como insumo para construir del mapa

de coberturas en el 2009 y tomo datos complementarios de imágenes sentinel que permitió verificar las dinámicas de cambio; así mismo el equipo de trabajo se apoyó en el trabajo de campo realizado en el área de estudio donde se procuró recorrer la mayor parte de la cuenca a pesar de las restricciones por condiciones climática, acceso vial y la topografía. En la Figura 57, a continuación, se observan los insumos de apoyo.



**Figura 57.** Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Fuente. Insumos suministrados por la Subdirección de Cartografía IGAC, 2019

### 3.4.3. Interpretación.

Este proceso se enfoca en la identificación de coberturas de cada temporalidad, 2009 y 2019, para posteriormente detectar las áreas o polígonos que debido a sus dinámicas han presentado cambios entre los dos periodos de tiempo, para esto se realiza la interpretación de coberturas de la tierra tomando como línea base las coberturas del periodo 2009; a partir de esta información se inicia el proceso de reinterpretación de las unidades de cobertura para el año 2019 lo que finalmente da como resultado la cartografía temática de cambio.

En cuanto al cambio temático es importante destacar que es poco frecuente encontrar cambios en la totalidad de un polígono, salvo que exista un error en la interpretación de la base de datos original o que la dinámica del área haya sustituido por completo una cobertura. Para esto se debe ajustar la base de datos identificando plenamente el polígono y asignando nuevamente el atributo correcto; es clave identificar el tipo de ajuste que se hizo durante el cambio, para esto la metodología propone una codificación de control de cambios que a partir de la asignación de un código permite definir el origen o causa del cambio. En la Tabla 26 se describe el tipo de códigos asignados al fenómeno de cambio.

Tabla 26. **Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad.**

VALOR	TIPO DE CAMBIO	SIGNIFICADO
0	Polígono no revisado	Valor por defecto en toda la base de datos.
1	Polígono confirmado.	Polígono revisado y confirmado sin modificación.
2	Polígono actualizado.	En el que se ha realizado una modificación porque en la imagen se evidencia un cambio en la cobertura debido a la dinámica del sitio. Puede ser modificado el código del polígono o su forma.
3	Polígono con dudas residuales.	Se utiliza este código tanto en polígonos confirmados como en los actualizados, en los que existen dudas en la interpretación.
4	Polígono actualizado por inconsistencia en la base anterior.	Se utiliza en donde se presentan discrepancias evidentes en la interpretación tendiendo como base el insumo original del período anterior, que se está actualizando.
5	Polígono actualizado por mejor resolución espacial del sensor.	Se actualiza el código o se crea un nuevo polígono que es posible definir por una mejor resolución espacial de la imagen.
6	Polígono no actualizado por nube.	Cuando existe en la imagen del período a actualizar nubes o sombras de nube que impiden la actualización del polígono.
7	Polígono actualizado por nube.	Cuando aparece una nube en el primer período, pero en el segundo se puede realizar la interpretación.

Fuente. Metodología Para La Actualización Del Mapa De Cobertura De La Tierra IDEAM, 2012.

#### 3.4.4. Control de Calidad.

A fin de garantizar la confiabilidad y la exactitud temática del área de trabajo interpretada y dar cumplimiento al estándar de calidad establecido para las bases de datos geográficas, se realiza un estricto control de calidad a lo largo del proceso. Puntualmente, se tuvo en cuenta cuatro aspectos, que también se incluyen en el “Manual de Control de Calidad para el Procedimiento de Cobertura de la Tierra” del (IDEAM, 2008), en la Figura 58 se ilustra el procedimiento completo realizado.

**Aspecto 1.** Garantizar la conformidad semántica del archivo, en otras palabras, se revisó la coherencia de la asignación de códigos y su correspondencia con la definición temática, es decir que los valores asignados a la base de datos tuvieran los valores de codificación dentro de la lista de leyenda definida para la interpretación en el área estudio.

**Aspecto 2.** Garantizar la conformidad temática, en donde se busca la correspondencia entre los valores de interpretación y la posible cobertura que aparece en la zona.

**Aspecto 3.** Garantizar la conformidad topológica. La topología es una colección de reglas para modelar relaciones geométricas, y se realiza de manera automatizada. Para el caso de este estudio se evalúan las reglas topológicas de vacíos y polígonos sobrepuestos.

**Aspecto 4.** Garantizar la conformidad de empalmes y polígonos adyacentes. En este aspecto se garantiza que los bloques contiguos de cada intérprete tengan coherencia temática y geométrica a la hora de realizar la consolidación del bloque definitivo.

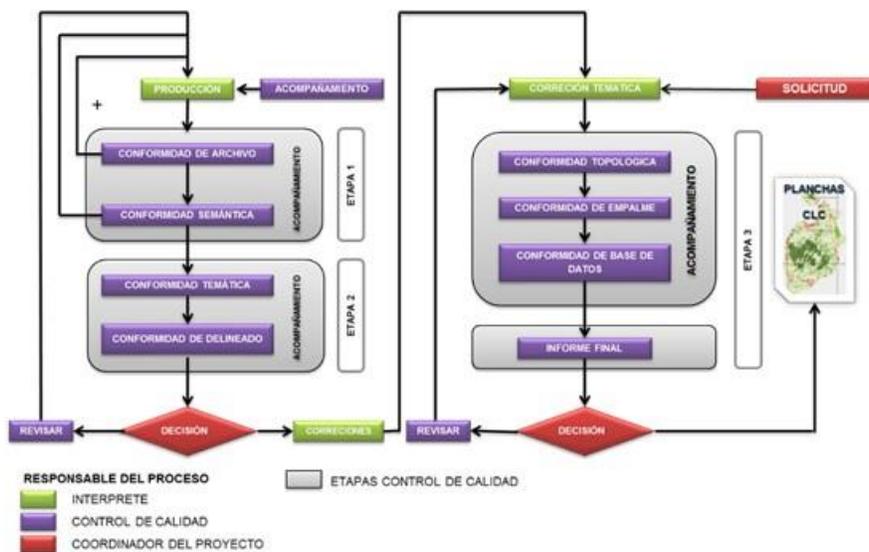


Figura 58. Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Adaptado y modificado de: (Ministerio de Ambiente, IDEAM & Cormagdalena, 2008)

### 3.4.5. Trabajo de Campo

El trabajo de campo tuvo como propósito realizar la verificación de las unidades de cobertura interpretadas en oficina que presentan mayor incertidumbre en su identificación y delimitación, es decir, las zonas donde se requiere realizar un control temático. En la medida que se avanza en la interpretación, se identifican las áreas con mayores dificultades y dudas que no pudieron ser despejadas con información secundaria o por nivel de referencia, de igual manera zonas con información insuficiente. Esta labor se llevó a cabo con la ayuda de herramientas tecnológicas de última generación adquiridas por el IGAC, para facilitar y agilizar el proceso de verificación, ajustes de delineación y correcciones de códigos sobre la base de datos geográfica.

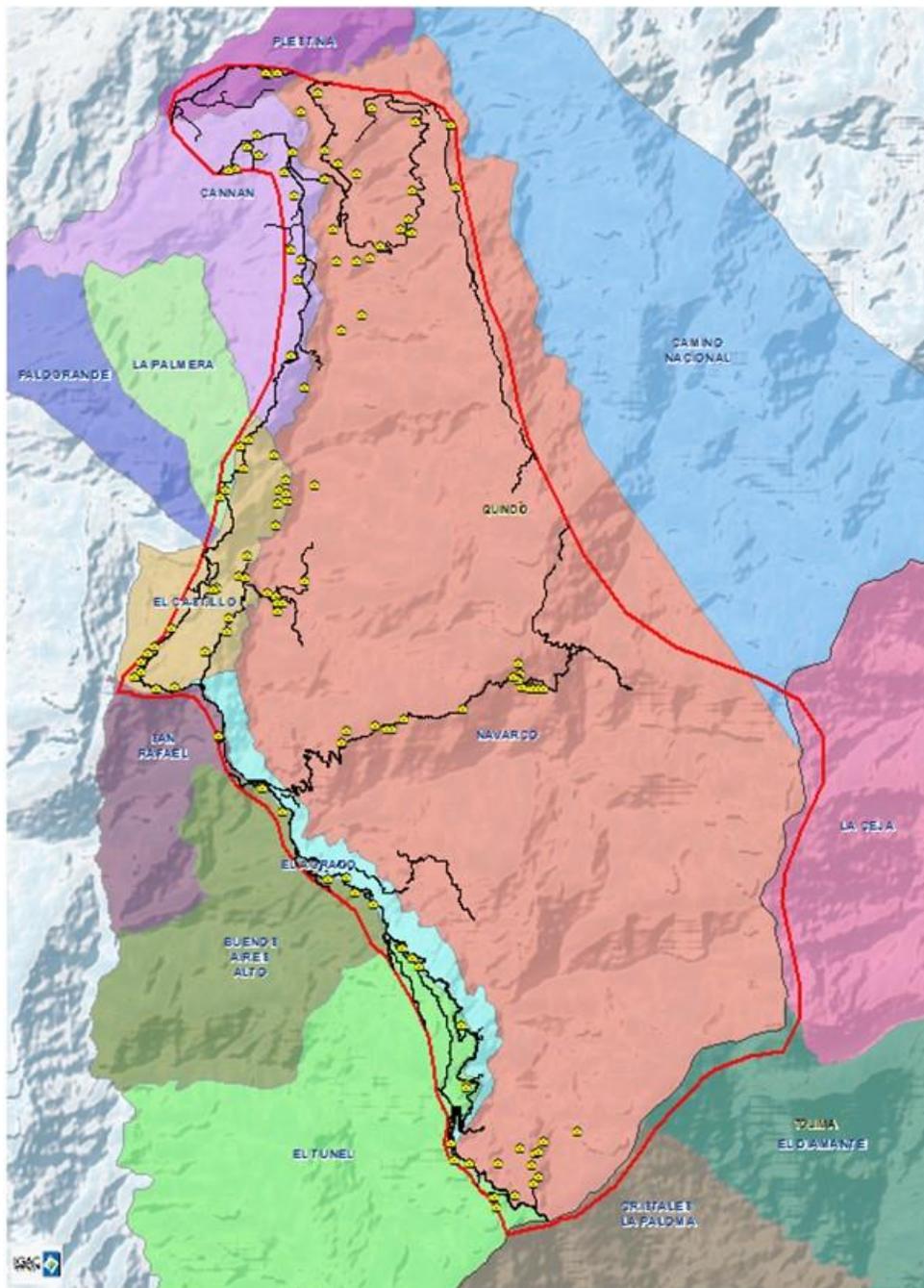
Los profesionales a cargo de control de calidad establecieron las rutas y áreas a verificar en campo, con el objeto de efectuar las correcciones necesarias para garantizar la calidad de los resultados.

El trabajo de campo tiene como objetivo revisar y ajustar las unidades de cobertura de la interpretación preliminar realizada en oficina, en diversos sectores de la Cuenca del río Navarco, municipio de Salento, Circasia y Calarcá (Departamento de Quindío). Dicha comisión se programó entre el 12 y el 16 de noviembre los recorridos programados, Tabla 27., fueron:

Tabla 27. Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad.

DÍA		RECORRIDO
1, martes noviembre.	11 de	Desplazamiento vía aérea Bogotá - Armenia - Alto de La Línea - Brisas- Alaska - Calarcá
2, miércoles noviembre.	12 de	Calarcá - El Hoyo - San Julián - Vereda Navarco.

<b>3, jueves 14 de noviembre.</b>	Calarcá- Vereda El Alto- Vereda El Castillo - Vereda El Agrado - Vereda San Rafael- Vereda Navarco - Calarcá
<b>4, jueves 15 de noviembre.</b>	Calarcá- Vereda Canaán- Vereda Palestina - Vereda Navarco - Calarcá
<b>5, viernes 16 de noviembre.</b>	Calarcá- Vereda Navarco (Parte Alta)



**Figura 58. Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019.**

En los recorridos se encontró cultivos como Café con semisombra, plátano, granadilla y tomate entre otros. En la Figura 59 se observan alguno de estas unidades agrícolas de coberturas.



**Figura 59.** Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019.

### 3.4.6. Resultados

De acuerdo al estudio las coberturas de la tierra, en términos generales esta cuenca presenta poca dinámica a nivel de cultivos ya que gran parte del área está ocupada por espacios naturales, los cultivos presentes en la zona permanecen constantes o su variación no es significativa en área salvo el de los cultivos de aguacate hass (*Persea americana* Mill) que en el periodo de diez años aumento significativamente sustituyendo grades áreas de pastos u otras unidades de cobertura. Otro aspecto importante del comportamiento y dinámicas de las coberturas se basa en que se observa una tendencia a aumentar el cubrimiento de áreas naturales como vegetación se cundiría lo que sugiere una mejora en cuanto al estado de salud ambiental de la cuenca. A continuación, se describe cada periodo en función de las estadísticas las coberturas presentes tanto en el año 2009 como en el año 2019 y se hace una comparación de cambio entre los dos periodos.

#### 3.4.6.1. Cobertura de la Tierra Año 2009

El estado de las coberturas en el año 2009 para la cuenca del Rio Navarco, con un área 8421.5 Ha, presenta 43 clases como se muestra en la Tabla 28, donde el 80% del área está representada por 6 clases (Figura 61), de las cuales predomina la clase (2.3.1. Pastos limpios) con una representatividad en área del 37.1 %. La clase (3.1.4.2. Bosques de galería riparios arbolados) con un 17.7%. La clase (2.3.3. Pastos enmalezados) con 5.4%. La clase (3.2.2.1. Arbustal denso) con un 5.2%. La clase (3.2.3.2. Vegetación secundaria baja) con un 4.8% y la clase (3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme) con un 4.7%. En la (Figura 60) se puede observar el mapa general con los diferentes tipos de cobertura

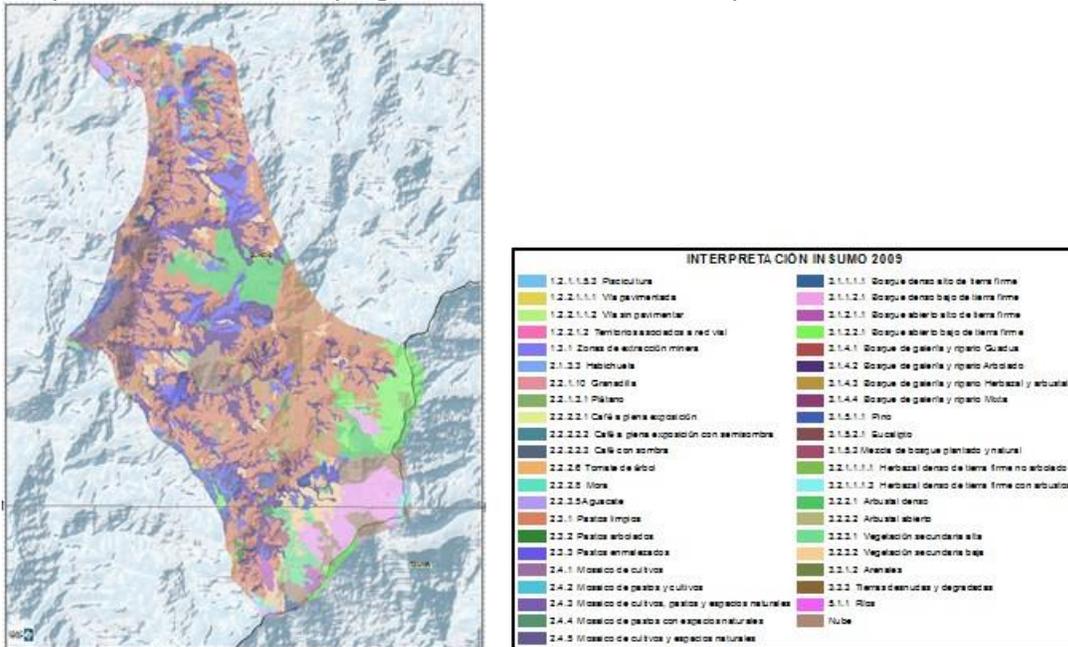


Figura 60. Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019.

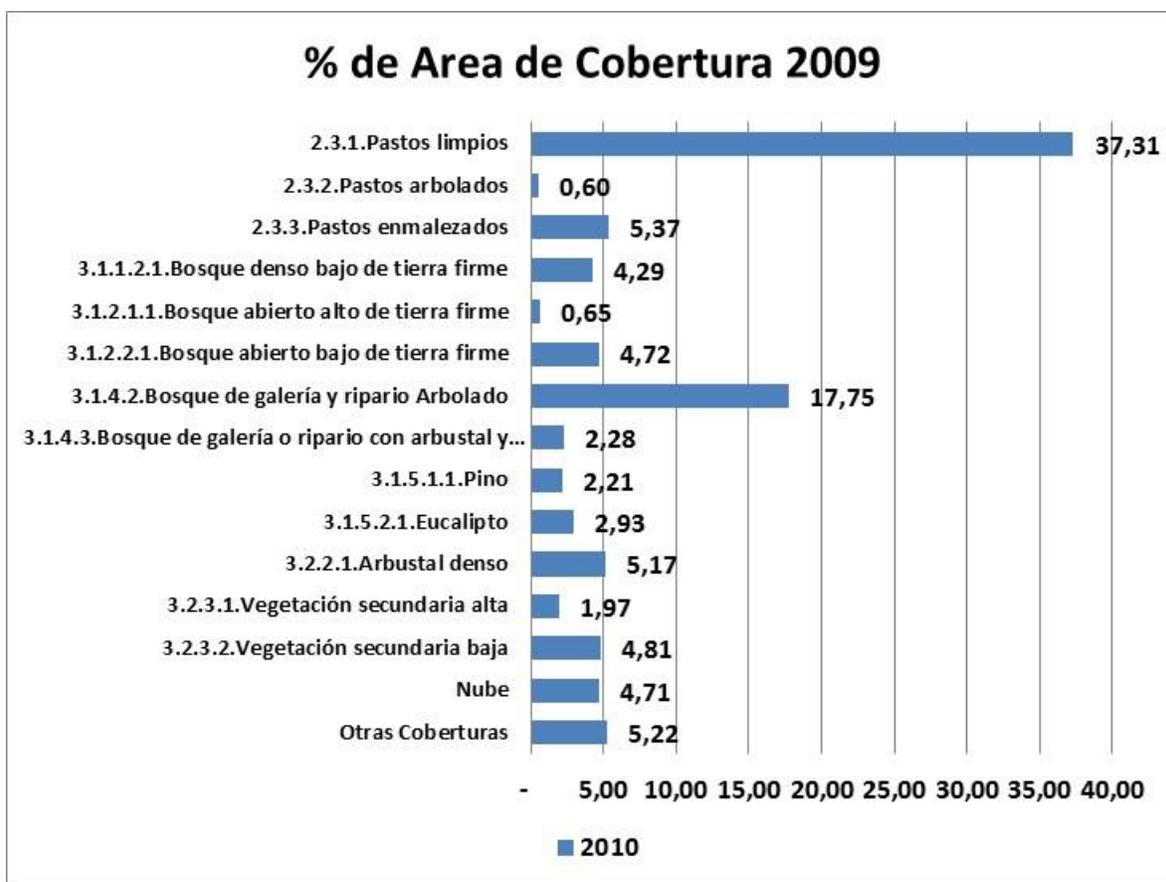


Figura 61. Porcentaje de cubrimiento de coberturas año 2009. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019.

Tabla 28. Coberturas de la tierra del Departamento del Quindío (Metodología CLC-Colombia). Esc 1:10.000. Año 2009.

Descripción Clase	Área ha	Área %
<b>2.3.1 Pastos limpios</b>	3142,3	37,3
<b>3.1.4.2 Bosque de galería y ripario Arbolado</b>	1494,8	17,8
<b>2.3.3 Pastos enmalezados</b>	452,0	5,4
<b>3.2.2.1 Arbustal denso</b>	435,4	5,2
<b>3.2.3.2 Vegetación secundaria baja</b>	405,3	4,8
<b>3.1.2.2.1 Bosque abierto bajo de tierra firme</b>	397,5	4,7
<b>99.Nube</b>	397,0	4,7
<b>3.1.1.2.1 Bosque denso bajo de tierra firme</b>	361,3	4,3
<b>3.1.5.2.1 Eucalipto</b>	247,0	2,9
<b>3.1.4.3 Bosque de galería y ripario Herbazal y arbustal</b>	191,9	2,3
<b>3.1.5.1.1 Pino</b>	186,0	2,2
<b>3.2.3.1 Vegetación secundaria alta</b>	166,2	2,0
<b>3.1.2.1.1 Bosque abierto alto de tierra firme</b>	54,8	0,7

<b>2.3.2 Pastos arbolados</b>	50,3	0,6
<b>3.2.1.1.1.3 Herbazal denso de tierra firme con arbustos</b>	41,2	0,5
<b>3.2.2.2 Arbustal abierto</b>	36,6	0,4
<b>2.2.1.10 Granadilla</b>	36,4	0,4
<b>5.1.1 Ríos</b>	35,0	0,4
<b>3.1.5.3 Mezcla de bosque plantado y natural</b>	29,5	0,4
<b>2.4.4 Mosaico de pastos con espacios naturales</b>	27,6	0,3
<b>2.2.2.2.2 Café a plena exposición con semisombra</b>	20,3	0,2
<b>2.4.2 Mosaico de pastos y cultivos</b>	19,2	0,2
<b>3.2.1.1.1.1 Herbazal denso de tierra firme no arbolado</b>	18,6	0,2
<b>1.2.2.1.1.2 Vía sin pavimentar</b>	17,4	0,2
<b>3.1.4.4 Bosque de galería y ripario Mixta</b>	16,6	0,2
<b>2.2.3.5 Aguacate</b>	16,5	0,2
<b>2.1.3.3 Habichuela</b>	16,1	0,2
<b>1.2.2.1.1.1 Vía pavimentada</b>	14,5	0,2
<b>3.1.1.1.1 Bosque denso alto de tierra firme</b>	14,0	0,2
<b>2.2.2.2.1 Café a plena exposición</b>	12,7	0,2
<b>2.2.2.2.3 Café con sombra</b>	12,7	0,2
<b>2.4.1 Mosaico de cultivos</b>	10,3	0,1
<b>3.3.3 Tierras desnudas y degradadas</b>	8,5	0,1
<b>2.4.3 Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales</b>	7,7	0,1
<b>2.2.2.8 Mora</b>	7,6	0,1
<b>2.4.5 Mosaico de cultivos y espacios naturales</b>	6,0	0,1
<b>3.3.1.2 Arenales</b>	5,6	0,1
<b>1.2.2.1.2 Territorios asociados a red vial</b>	4,5	0,1
<b>1.3.1 Zonas de extracción minera</b>	2,2	0,0
<b>2.2.1.3.1 Plátano</b>	0,9	0,0
<b>3.1.4.1 Bosque de galería y ripario Guadua</b>	0,9	0,0
<b>2.2.2.6 Tomate de árbol</b>	0,4	0,0
<b>1.2.1.1.5.3 Piscicultura</b>	0,4	0,0

Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019.

#### 3.4.6.2. Cobertura de la Tierra Año 2019

El estado de las coberturas en el año 2019 para la cuenca del Río Navarco, con un área 8421.5 Ha, presenta 46 clases como se muestra en la Tabla 29 de donde el 80% del área está representada por 7 clases (Figura 63). De las cual predomina la clase (2.3.1. Pastos limpios) con una representatividad en área del 22.3%. La clase (3.1.4.2. Bosques de galería riparios arbolados) presenta un 19.5% de área. La clase (2.3.3. Pastos enmalezados) con 9.5%. La clase (3.2.3.2. Vegetación secundaria baja) con un 9.4%. La clase (3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme) presenta 7.9%. La clase (2.2.3.5. Aguacate) con un 7.2% y la clase (3.2.3.1. Vegetación secundaria alta) con un 5.9% (Figura 62).

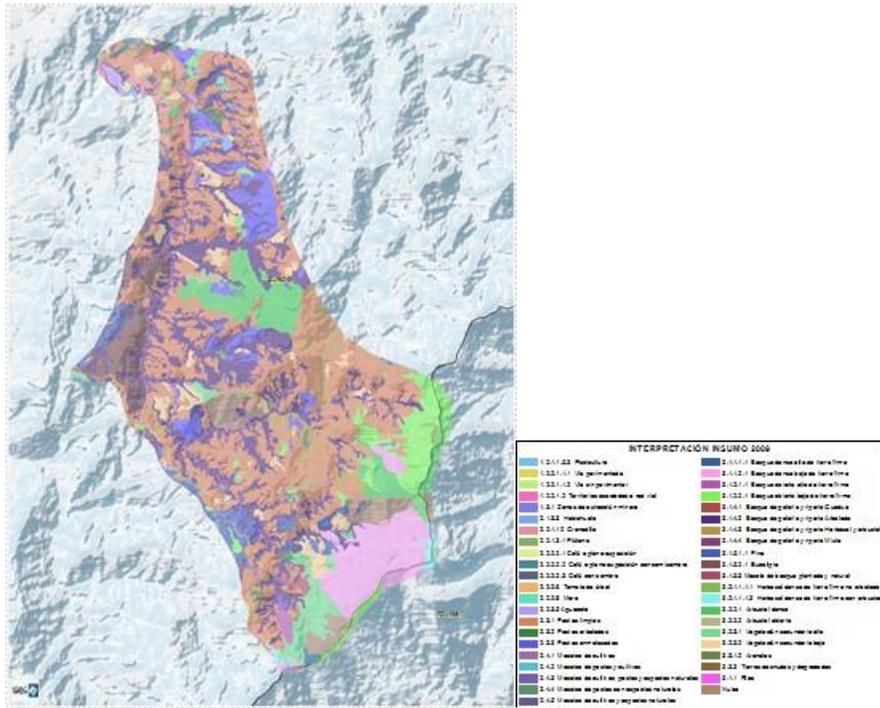


Figura 62. Mapa de coberturas de la tierra año 2019. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019.

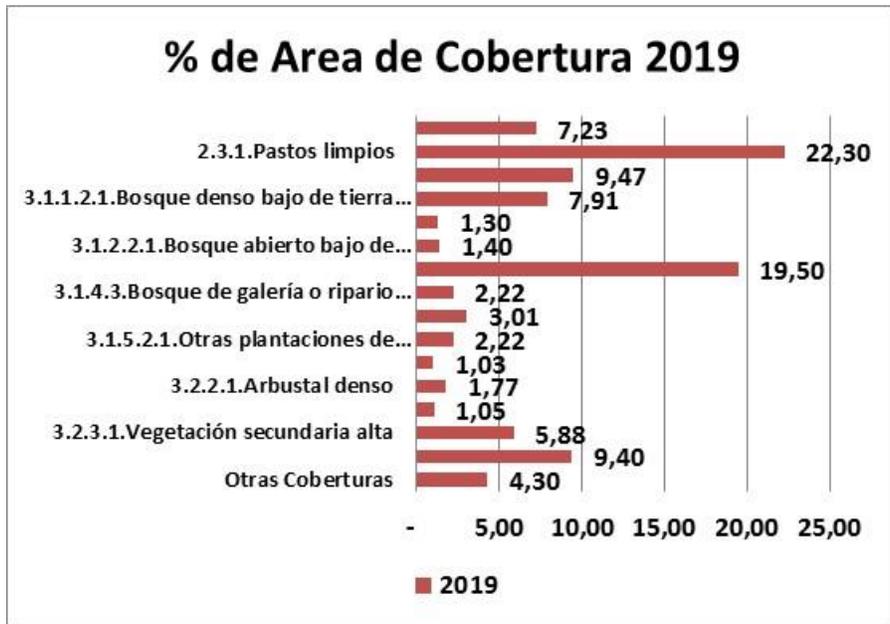


Figura 63. Porcentaje de cubrimiento de coberturas año 2019. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019.

Tabla 29. Coberturas de la tierra del Departamento del Quindío (Metodología CLC-Colombia). Esc 1:10.000. Año 2019.

DESCRIPCIÓN CLASE	AREA_HA	AREA %
2.3.1. Pastos limpios	1878,2	22,30
3.1.4.2. Bosque de galería o ripario arbolado	1642,5	19,50
2.3.3. Pastos enmalezados	797,6	9,47
3.2.3.2. Vegetación secundaria baja	791,6	9,40
3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	666,2	7,91
2.2.3.5. Aguacate	609,1	7,23
3.2.3.1. Vegetación secundaria alta	495,4	5,88
3.1.5.1.1. Pino	253,6	3,01
3.1.4.3. Bosque de galería o ripario con arbustal y herbazal	187,2	2,22
3.1.5.2.1. Otras plantaciones de latifoliadas	186,8	2,22
3.2.2.1. Arbustal denso	149,1	1,77
3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme	117,8	1,40
3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme	109,1	1,30
3.2.2.2. Arbustal abierto	88,8	1,05
3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos	45,3	0,54
3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado	41,1	0,49
5.1.1. Ríos, caños y quebradas	38,7	0,46
2.3.2. Pastos arbolados	38,3	0,46
3.1.4.4. Bosque de galería o ripario mixto	36,7	0,44
3.1.5.3. Plantación mixta	35,2	0,42
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	31,4	0,37
2.2.2.2.3. Con sombra	24,6	0,29
2.2.2.2.2. Con semisombra	23,4	0,28
1.2.2.1.1.1. Vía pavimentada	20,1	0,24
1.2.2.1.1.2. Vía sin pavimentar	17,3	0,21
2.2.2.2.1. A plena exposición	16,0	0,19
3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme	13,7	0,16
2.2.1.10. Granadilla	12,6	0,15
2.1.3.1 Fríjol	9,3	0,11
2.2.2.8. Mora	9,1	0,11
1.2.2.1.2. Terrenos asociados a la red vial	7,9	0,09
2.2.1.2.2. Caña panelera	4,3	0,05
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	3,9	0,05
3.3.1.2. Arenales	3,2	0,04
99.Nube	3,0	0,04
3.3.3.1. Áreas erosionadas	3,0	0,04
2.2.2.6. Tomate de árbol	1,6	0,02
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	1,3	0,02

DESCRIPCIÓN CLASE	AREA_HA	AREA %
2.2.1.3. Plátano y banano	1,2	0,01
2.4.1. Mosaico de cultivos	1,1	0,01
1.2.1.1.5.2 Avicultura	1,0	0,01
1.2.1.1.5 Agroindustrial	1,0	0,01
3.3.2. Afloramientos rocosos	0,9	0,01
3.1.4.1. Bosque de galería o ripario de guadua	0,9	0,01
1.1.1. Tejido urbano continuó	0,7	0,01
1.2.1.1.5.3 Piscicultura	0,5	0,01

Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019.

### 3.4.6.3. Análisis de Cambio. Temporalidad 2010-2019

La dinámica de las coberturas para la cuenca del Rio Navarco entre los años 2010-2019, resalta que la cobertura correspondiente (Figura 65 y Tabla 30) 2.3.1. Pastos limpios, presenta una reducción en porcentaje de área para el año 2019 del 15%. Así mismo se observan incrementos de área en coberturas como 3.1.4.2. Bosques de galería riparios arbolados con un 1.7%, 2.3.3. Pastos enmalezados 4.1%, 3.2.3.2. Vegetación secundaria baja 4.59% y 2.2.3.5. Aguacate con un 7.04%, siendo las anteriores coberturas las más sobresalientes en cuando a dinámica de cambio como se muestra en la Figura 64.

En la tabla 30 se indica la leyenda de coberturas de la tierra empleada en el proyecto.

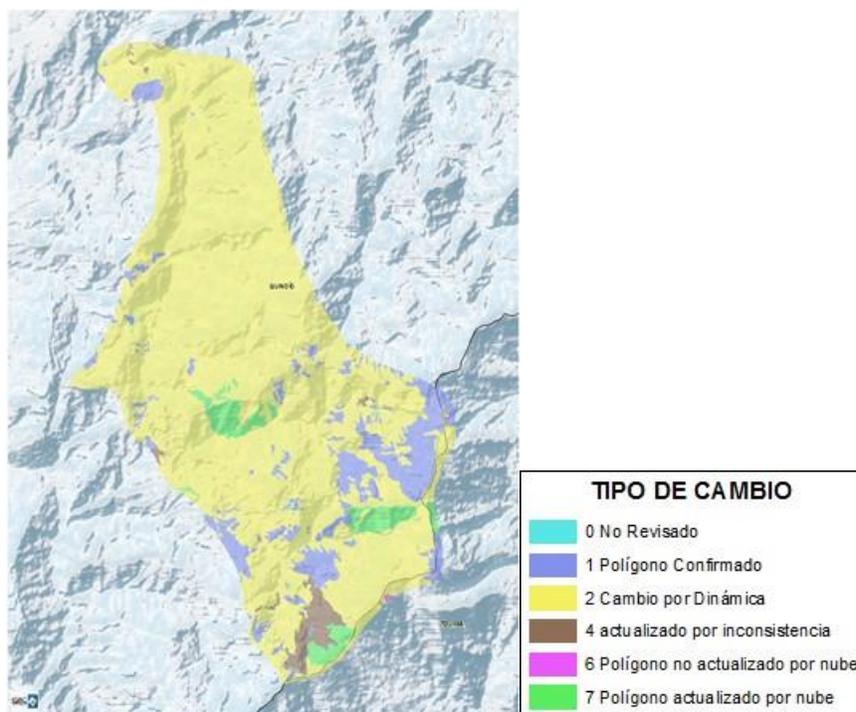


Figura 64. Aspectos evaluados en el proceso de control de calidad. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019.

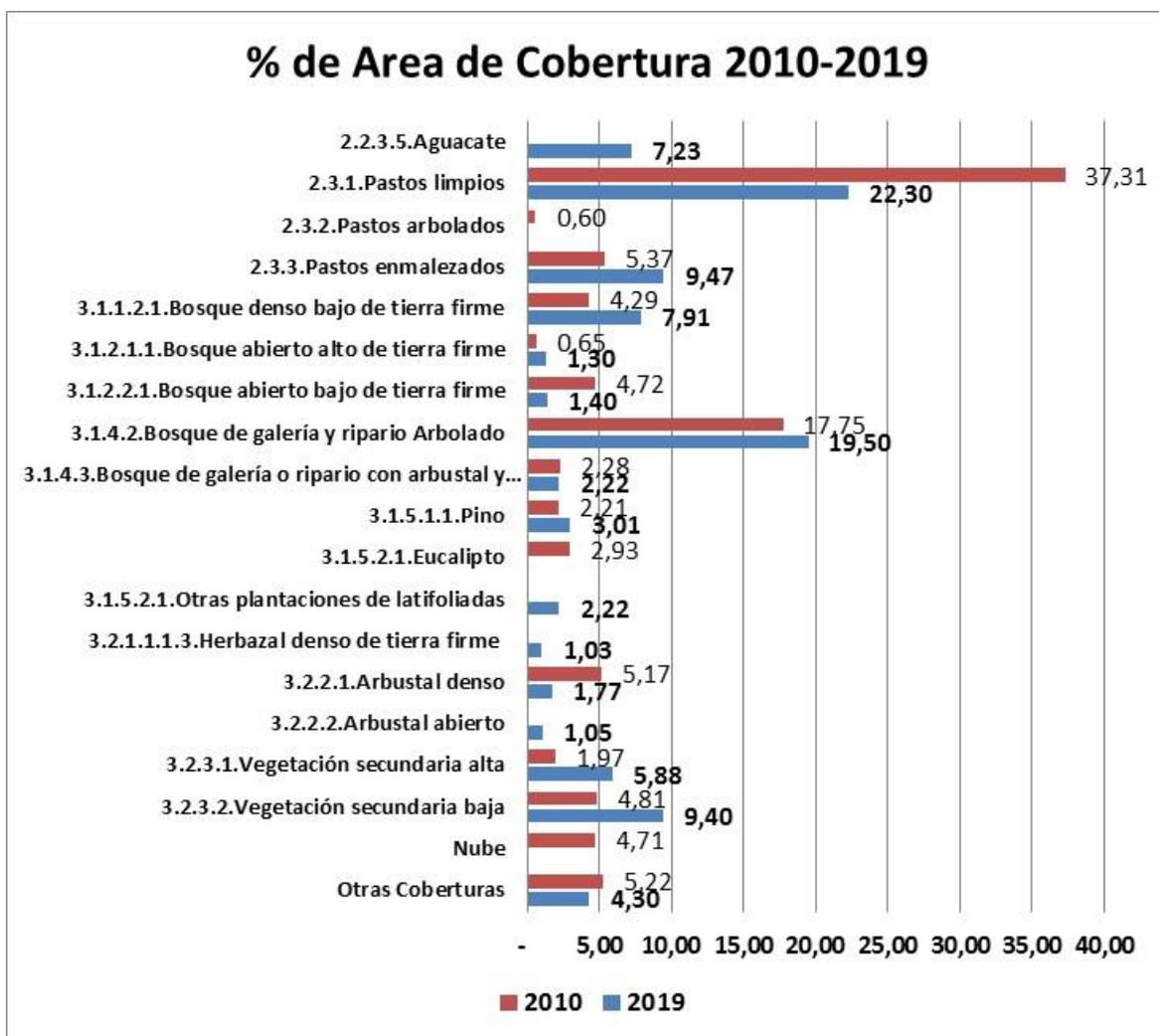


Figura 65. Dinámica de cambio coberturas representativas 2010-2019. Fuente. Grupo de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología, 2019.

Tabla 30. **Legenda de coberturas de la tierra para el departamento del Quindío.**

1° Nivel	2° Nivel	3° Nivel	4° Nivel	5° Nivel	6° Nivel	
1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	1.1 Zonas urbanizadas	1.1.1 Tejido urbano continuo				
		1.1.2 Tejido urbano discontinuo				
	1.2 Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	1.2.1 Zonas industriales o comerciales		1.2.1.1 zonas industriales	1.2.1.1.5 Agroindustrial	1.2.1.1.5.1 Ganadería
				1.2.1.1.5.2 Avicultura		
		1.2.1.1.5.3 Piscicultura				
		1.2.1.1.5.4 Porcicultura				
		1.2.1.1.5.5 Panelera				
		1.2.1.2 Zonas comerciales				
	1.2.2 Red vial, ferroviarias y terrenos asociados		1.2.2.1 Red vial y territorios asociados		1.2.2.1.1 Red vial	1.2.2.1.1.1 Vía pavimentada
						1.2.2.1.1.2 Vía sin pavimentar
	1.2.4 Aeropuertos					
	1.3 Zonas de extracción minera y escombreras		1.3.1 Zonas de extracción minera			
			1.3.2 Zonas de disposición de residuos			
	1.4 Zonas verdes artificializadas, no agrícolas		1.4.1 Zonas verdes urbanas	1.4.1.1 Otras zonas verdes urbanas		
1.4.1.2 Parques cementerio						
1.4.1.6 Rondas de cuerpos de agua						
1.4.2.1 Áreas Culturales						
1.4.2.2.1 Autódromo						

		1.4.2 Instalaciones recreativas	1.4.2.2 deportivas	Áreas	1.4.2.2.3 Estadios	
					1.4.2.2.4 Campos de golf	
					1.4.2.3.1 Condominios	
					1.4.2.3.2 Fincas recreativas	
					1.4.2.3.3 Centros vacacionales	
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	2.1 Cultivos anuales o transitorios	2.1.1 Otros cultivos transitorios				
		2.1.2 Cereales	2.1.2.1 Maíz			
		2.1.3 Oleaginosas y leguminosas	2.1.3.1 Frijol			
			2.1.3.2 Soya			
			2.1.3.3 Habichuela			
		2.1.4 Hortalizas	2.1.4.4 Tomate			
			2.1.4.6 Ahuyama			
		2.1.5 Tubérculos	2.1.5.1 Papa			
			2.1.5.2 Yuca			
		2.2 Cultivos permanentes	2.2.1 Cultivos permanentes herbáceos	2.2.1.1 Otros cultivos permanentes herbáceos		
	2.2.1.2 Caña			2.2.1.2.2 Caña panelera		
	2.2.1.3 Plátano y banano			2.2.1.3.1 Plátano		
				2.2.1.3.2 Banano		
	2.2.1.5 Papaya					
	2.2.1.8 Piña					
	2.2.1.10 Granadilla					
	2.2.1.11 Maracuyá					
	2.2.1.15 Flores y follajes			2.2.1.15.8 Baby blue		
	2.2.2 Cultivos permanentes arbustivos			2.2.2.1 Otros cultivos permanentes arbustivos		
		2.2.2.2 Café	2.2.2.2.1 a plena exposición			

				2.2.2.2.2 con semisombra				
				2.2.2.2.3 con sombra				
				2.2.2.6 Tomate de árbol				
				2.2.2.7 Lulo				
				2.2.2.8 Mora				
				2.2.3.1 Otros cultivos permanentes arbóreos				
				2.2.3.3 Cítricos		2.2.3.3.1 Naranja		
						2.2.3.3.2 Limón		
						2.2.3.3.3 Mandarina		
				2.2 permanentes		Cultivos permanentes arbóreos		
	2.2.3.6 Guanábana							
	2.2.3.7 Macadamia							
	2.2.3.8 Mangostino							
	2.2.3.9 Guayaba							
	2.2.3.10 Chirimoya							
2.2.4 Cultivos agroforestales					2.2.4.1 Pastos y árboles plantados			
					2.2.4.2 Cultivos y árboles plantados			
2.2.5 Cultivos confinados					2.2.5.1 Flores			
					2.2.5.2 Tomate			
2.3 Pastos				2.3.1 Pastos limpios				
				2.3.2 Pastos arbolados				
				2.3.3 Pastos enmalezados				
2.4 Áreas agrícolas heterogéneas				2.4.1 Mosaico de cultivos				
				2.4.2 Mosaico de pastos y cultivos				
				2.4.3 Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales				

3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES		2.4.4 Mosaico de pastos con espacios naturales			
		2.4.5 Mosaico de cultivos y espacios naturales			
	3.1 Bosques	3.1.1 Bosque denso	3.1.1.1 Bosque denso alto	3.1.1.1.1 Bosque denso alto de tierra firme	
			3.1.1.2 Bosque denso bajo	3.1.1.1.2 Bosque denso bajo de tierra firme	3.1.1.2.1.1 Guadua
		3.1.2 Bosque abierto	3.1.2.1 Bosque abierto alto	3.1.2.1.1 Bosque abierto alto de tierra firme	
			3.1.2.2 Bosque abierto bajo	3.1.2.2.1 Bosque abierto bajo de tierra firme	
		3.1.3 Bosque fragmentado			
		3.1.4 Bosque de galería y ripario	3.1.4.1 Guadua		
			3.1.4.2 Arbolado		
			3.1.4.3 Herbazal y arbustal		
			3.1.4.4 Mixta		
		3.1 Bosques	3.1.5 Plantación forestal	3.1.5.1 Plantación de coníferas	3.1.5.1.1 Pino
				3.1.5.1.2 Ciprés	
	3.1.5.2 Plantación de latifoliadas		3.1.5.2.1 Eucalipto		
				3.1.5.2.5 Nogal	
3.2 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1 Herbazal	3.2.1.1 Herbazal denso	3.2.1.1.1 Herbazal denso de tierra firme	3.2.1.1.1.1 Herbazal denso de tierra firme no arbolado alto	
				3.2.1.1.1.2 Herbazal denso de tierra firme arbolado	
		3.2.1.2 Herbazal abierto		3.2.1.1.1.3 Herbazal denso de tierra firme con arbustos	

		3.2.2 Arbustal	3.2.2.1 Arbustal denso		
			3.2.2.2 Arbustal abierto		
		3.2.3 Vegetación secundaria o en transición	3.2.3.1 Vegetación secundaria alta		
			3.2.3.2 Vegetación secundaria baja		
	3.3 Áreas abierta, sin o con poca vegetación	3.3.1 Zonas arenosas naturales	3.3.1.2 Arenales		
			3.3.2 Afloramientos rocosos		
		3.3.3 Tierras desnudas y degradadas			
		3.3.4 Zonas quemadas			
		3.3.5 Zonas glaciares y nivales	3.3.5.2 Zonas nivales		
	4. ÁREAS HÚMEDAS	4.1 Áreas húmedas continentales	4.1.1 Zonas pantanosas		
4.1.2 Turberas					
5. SUPERFICIES DE AGUA	5.1 Aguas continentales	5.1.1 Ríos (5 m)			
		5.1.2 Lagunas, lagos y ciénagas naturales			
		5.1.3 Canales			
		5.1.4 Cuerpos de agua artificiales			5.1.4.1 Embalses
5.1.4.3 Estanques para acuicultura continental					

---

## **4. MODELO DE PÉRDIDA DE SUELO. EROSIÓN POTENCIAL / USLE - MUSLE. Proyecto Navarco**

---

Subdirección de Agrología

---

---

## - Estimación de la Perdida de Suelos por Erosión Hídrica

El conocimiento de la erosión en el sector del río Navarco es fundamental para decidir el manejo y las medidas de conservación de suelos más adecuados; por ello, es importante obtener datos confiables acerca del proceso.

En este proyecto se utilizaron métodos indirectos, que se basaron en la delimitación de unidades geomorfológicas; del clima con énfasis en la intensidad de las lluvias o su efecto sobre la escorrentía; los tipos de suelo con énfasis en las propiedades que influyen en el proceso erosivo, tales como: textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad; pendiente longitud y grado; cobertura de la tierra acorde con la metodología Corine land cover, ya que éstas son las variables requeridas para aplicar la ecuación de estimación de pérdida potencial de suelo. La identificación y delimitación de la cobertura se realizó utilizando las fotografías aéreas e imágenes de los años 2009 y 2019, de igual forma con estos insumos se identificaron los procesos de erosión y de movimientos en masa.

### - Modelo Conceptual

Los factores que favorecen al incremento de la erosión hídrica son: las lluvias que afectan directamente a los suelos y sus propiedades intrínsecas que lo caracterizan frente a los procesos que lo deterioran, cuando estos no tienen un tipo de cobertura que los proteja, la pendiente, y presencia o ausencia de medidas de conservación, siendo en este sentido el hombre el que actúa como uno de los principales actores para alterar las condiciones ecológicas del lugar

La consecuencia directa de la erosión del suelo es una disminución de la productividad agrícola, debido a la pérdida de nutrientes, deterioro físico por la pérdida de profundidad y en casos extremos la pérdida total de la capa arable, lo que traduce en una agricultura no sustentable, a menos que el suelo pueda ser rehabilitado para detener o revertir los procesos de la erosión. Por eso conocer con la mayor precisión posible ayuda a proponer las acciones necesarias para la implementación de las medidas que contribuyan a evitar la pérdida del recurso

## - Estimación de la Perdida de Suelos por Erosión Hídrica

En la identificación y elaboración del mapa de procesos erosivos, caracterizados para los años 2009 y 2019, se realizaron las siguientes fases genéricas, las cuales serán explicadas en detalle en el desarrollo del presente documento:

- En la primera fase, se realizó la fotointerpretación digital en 3D, con fotografías aéreas del 2009 y 2019, de las cuales se extrae información temática relacionada con: cobertura de la tierra, geomorfología, erosión y movimientos en masa.
- En la segunda fase, a partir de la información temática, se realizan diferentes procesos digitales como interpolación, intersección, álgebra de mapas, edición de tablas, etc., Cada procedimiento aplicado con el fin de obtener los factores de la ecuación universal

de la erosión y su adaptación, que van a dar origen a los mapas temáticos, explicados más adelante, tales como: índice de erodabilidad inferido a las particularidades de la precipitación; índice de erosividad relacionado con características edáficas, del horizonte A; el factor pendiente, generado a partir del DEM Alos 12m, donde se extrae la longitud de la ladera de erosión y su inclinación expresada en porcentaje; el índice de cobertura en función del grado de protección que estas ofrecen y calificadas sobre la aproximación de Corine Land Cover y por último las prácticas de conservación que se realizan en la zona acorde con el uso.

- En la tercera fase, se procedió a la verificación en campo de las diferentes temáticas y sus mapas preliminares, tanto los derivados de fotointerpretación como los procesados digitalmente en el modelamiento de la pérdida potencial de suelo. Adicionalmente se colecta la información edáfica que incide en el modelo propuesto. Durante la fase de campo fueron colectados 148 observaciones detalladas de suelos donde se tomaron muestra del horizonte A para análisis de laboratorio (granulometría por pipeta, contenido de carbón orgánico, y estabilidad estructural entre otros) con base en los cuales se modela la pérdida de suelo, y se describieron 8 perfiles.
- En la cuarta fase, se realizaron análisis estadísticos espaciales de las variables y se procedió la interpretación de los resultados del modelo. La información fue digitalizada y modelada empleando el programa ArcGis 10.5 con el cual generaron los mapas respectivos.

En el proceso de cuantificación teórica de las pérdidas de suelos en el sector del río Navarco, sigue el modelo propuesto en la ecuación establecida por Wischmeyer y Smith (1978). El cual se ilustra en la Figura 66.



Figura 66. Modelo de pérdida potencial de suelos por erosión.

La pérdida de suelo se define como la cantidad de suelo desprendido, transportado y sedimentado, en un lapso de tiempo determinado, en una superficie de la tierra. Se expresa en unidades de masa por unidad de área y tiempo, (Ton ha - 1 año- 1).

Este documento plantea la utilización la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE/MUSLE) La cual se expresa de la siguiente manera:

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

Donde:

A= Pérdida de suelo por unidad de superficie, expresada en las unidades sistema internacional.

R = Erosividad de la lluvia.

K = Erodabilidad. Susceptibilidad de erosión del suelo.

L = Largo de la pendiente

S = Magnitud de la pendiente o grado de inclinación

C = Cubertura

P = Prácticas de conservación

En el desarrollo del presente documento se irán haciendo las precisiones respectivas a cada factor y las técnicas implementadas para la obtención de las variables requeridas.

---

**4.1. MODELO DE PÉRDIDA DE SUELO.  
FACTOR R – EROSIVIDAD DE LAS LLUVIAS.  
Proyecto Navarco**

---

Subdirección de Agrología

---

Mauricio Mesa Caro

---

## Factor R (erosividad de las lluvias).

### 4.1.1. Introducción

La erosividad hace referencia a la capacidad de las lluvias de producir o generar erosión en el suelo. La determinación de un índice que pueda describir el efecto erosivo que produce la precipitación constituye un problema que ha sido abordado en muchos lugares, desde hace poco más de 60 años Wischmeier y Smith en 1958, investigando datos de pérdida de suelo y lluvias en los Estados Unidos, encontraron, que el producto de la energía cinética (E) y la intensidad máxima de un aguacero en un periodo de 30 minutos (I) expresado en  $(MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1})$  manifiesta muy bien la capacidad de las lluvias en causar erosión. (Echeverry Tafur & Obando Moncayo, 2010). En este sentido Wischmeier propuso un índice, conocido como factor R, para ser utilizado en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE).

El factor R, se calcula utilizando todas las lluvias que igualan o exceden 10 mm y se consideran independientes cuando están separadas por periodos de seis horas o más. Los datos se obtienen de pluviogramas de registro diario obtenidos de estaciones pluviográficas. En la práctica las estaciones pluviográficas son escasas y están distribuidas irregularmente, por lo tanto no se dispone de suficientes pluviogramas que permitan analizar adecuadamente la precipitación en una región. Por ello se ha optado por la utilización de unas metodologías, que con base en los registros mensuales, decadales o diarios de precipitación, aproximen con suficiente precisión, la capacidad de la lluvia para causar erosión y el volumen de pérdida de suelo involucrado.

Entre las metodologías más conocidas, se encuentran el Índice de Fournier IF, el Índice Modificado de Fournier IMF y el Índice de Concentración de las Precipitaciones ICP (Pascual et al., 2001 citado por (Echeverry Tafur & Obando Moncayo, 2010)). De estos índices el de más fácil aplicación es el Índice de Fournier (IF), debido a lo sencillo que es conseguir la información, ya que solo utiliza como elemento de análisis los datos mensuales de precipitación que están disponibles directamente, en algunas de las páginas de internet de las Corporaciones Autónomas Regionales o en el IDEAM. Su aplicación de acuerdo con Jordan & Bellinfante 2000 citado por (Echeverry Tafur & Obando Moncayo, 2010) solo considera el mes de mayor precipitación, cuando el régimen anual de lluvias es bimodal o cuando en general las precipitaciones son elevadas, como es el caso de la región objeto de estudio.

Arnoldus 1977, citado por (Echeverry Tafur & Obando Moncayo, 2010)), encontró bajas correlaciones entre el índice IF y EI y propuso entonces el Índice Modificado de Fournier (IMF), en donde explica que no sólo el mes de mayor precipitación produce erosión superficial, sino que hay meses con menores cantidades de lluvia que también producen erosión. Finalmente y en fecha más reciente, para explicar la variabilidad temporal de la

distribución de las lluvias a lo largo del año, Oliver, 1980 propuso el Índice de concentración de las precipitaciones ICP.

Sobre estos tres índices se han desarrollado múltiples investigaciones en Latinoamérica y en Colombia especialmente en la región Andina. Así (Gómez Aristizabal, 1973) propone un sistema que apoyado entre otros en la determinación del índice de Fournier, para facilitar la determinación del uso y manejo de suelos de ladera; (Echeverry Tafur & Obando Moncayo, 2010) calcularon la erosividad y la variación temporal de las lluvias mediante los índices de Fournier anual IFA, modificado de Fournier IMF y concentración de las precipitaciones en la región centro sur del departamento de Caldas; (Ramírez Ortiz & Hincapie Gómez, 2009) generaron un instrumento para estimar el riesgo por erosión en la ecuación universal de pérdida de suelos utilizando entre otros el factor de erosividad en el departamento de Caldas; (Guío Martínez, Cely Reyes, & Moreno Pérez, 2015) evaluaron y mapearon la agresividad climática, la erosividad de la lluvia y la concentración de las precipitaciones en la cuenca del embalse La Copa en el departamento de Boyacá, mediante el IFM, el factor R y el ICP respectivamente; (Velasco & Cortes, 2017) estimaron el factor de riesgo a la erosión para Sinaloa, México, utilizando el índice de Fournier modificado y el de concentración de la precipitación y (Castro Quintero, Lince Salazar, & Riaño Melo, 2017) aplicaron el índice de Fournier IFM y el  $EI_{30}$  para determinar el factor de erosividad necesario en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo USLE/RUSLE.

A continuación se explica desarrollo del factor R de erosividad de la lluvia y la variabilidad temporal para la microcuenca del río Navarco municipio de Salento departamento de Quindío, obtenido del análisis conjunto de Índice de Fournier anual IFA, el índice modificado de Fournier IMF y el Índice de Concentración de las Precipitaciones (ICP) empleando una ecuación validada para las condiciones pluviométricas de la zona cafetera central de Colombia.

### Información Pluviométrica

Para el desarrollo del índice de erosividad se requirió información meteorológica diaria de la precipitación de estaciones situadas en la microcuenca del río Navarco y sus alrededores y para ello hubo necesidad de revisar información, tanto de las estaciones meteorológicas del IDEAM como de la Corporación Autónoma Regional del Quindío CRQ. De esa revisión exhaustiva se logró extraer los registros diarios de precipitación de la serie histórica 1987-2011 para 8 estaciones meteorológicas (Tabla 31).

Tabla 31. *Estaciones meteorológicas consideradas para el cálculo de la erosividad y la variación temporal de las lluvias en la microcuenca Río Navarco, municipio de Salento región nororiental del departamento de Quindío.*

Estación	Departamento	Municipio	Entidad	Altura msnm	Latitud °N	Longitud °W	Años evaluados
Bremen	Quindío	Filandia	CRQ	2.070	4,6667	-75,6000	1987-2011

Estación	Departamento	Municipio	Entidad	Altura msnm	Latitud °N	Longitud °W	Años evaluados
La Picota	Quindío	Salento	CRQ	2.680	4,6333	-75,6500	1987-2011
Navarco	Quindío	Calarcá	CRQ	2.978	4,4833	-75,5539	1987-2011
La Montaña	Quindío	Salento	CRQ	2.860	4,6328	-75,4594	1987-2011
La Playa	Quindío	Salento	CRQ	1.880	4,6333	-75,5833	1987-2011
Boquerón	Tolima	Villahermosa	IDEAM	3.740	4,9039	-75,2528	1987-2011
Aeropuerto El Edén	Quindío	Armenia	IDEAM	1.229	4,4547	-75,7664	1987-2011
San Remo	Risaralda	Santa Rosa de Cabal	IDEAM	1.947	4,8417	-75,5800	1987-2011

FUENTE: IDEAM

#### 4.1.2. Procedimiento

Siguiendo lo establecido por (Echeverry Tafur & Obando Moncayo, 2010) se calcularon siete procedimientos (tres (3) para el Índice de Fournier Anual: IFA<sub>1</sub>, IFA<sub>2</sub>, IFA<sub>3</sub>; dos (2) para el Índice modificado de Fournier: IMF<sub>1</sub> e IMF<sub>2</sub> y dos (2) para el índice de concentración de las precipitaciones: ICP<sub>1</sub> e ICP<sub>2</sub>).

**Cálculo de IFA<sub>1</sub>.** Primero se estimó para cada año, el IF por periodo decadal (IdF), utilizando la siguiente ecuación:  $IdF = (PMpd)^2 / PTpd$ , donde,

IdF = Índice decadal de Fournier

PMpd = Precipitación máxima del período decadal (mm)

PTpd = Precipitación total del período decadal (mm)

Luego se sumaron los tres (3) IdF para obtener el IF mensual (IFm). Posteriormente para cada mes se sumaron todos los IFm estimados y se promediaron sobre el número de años analizados. Finalmente el IFA<sub>1</sub> corresponde a la sumatoria de los 12 IFm

**Cálculo de IFA<sub>2</sub>.** Se obtuvo determinando el IFA al sumar los 36 IdF de cada año; luego se dividió la sumatoria de todos los IFA sobre el número de años considerados.

El IFA estimado utilizando los dos procedimientos anteriores se clasificó de acuerdo con lo indicado en la Tabla 32.

Tabla 32. **Clasificación de la erosividad de las lluvias**

IFA	Grado	Características de la precipitación
<140	Leve	Lluvias leves, frecuentes, bien distribuidas
140-210	Baja	Lluvias de baja intensidad, frecuentes, bien distribuidas
210-280	Media	Lluvias de mediana intensidad, frecuentes, de buena o regular distribución
280-350	Alta	Lluvias fuertes, frecuentes o no. De buena o mala distribución
>350	Muy Alta	Lluvias fuertes, frecuentes o no, de buena o mala distribución

Fuente: (Gómez Aristizabal, 1973)

**Cálculo de IFA<sub>3</sub>:** Se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$IF = p^2 / P$$

donde,

IF = Índice de Fournier

p<sup>2</sup> = Precipitación media del mes más lluvioso del año (mm)

P = Precipitación media anual (mm)

Los valores resultantes de esta ecuación se clasificaron de acuerdo con lo indicado en la siguiente tabla (Tabla 33).

Tabla 33. **Valores de referencia del Índice de Fournier (IF) para áreas montañosas tropicales**

IF	Calificación
15	Muy Bajo
16- 30	Bajo
31-50	Moderado
51-65	Alto
> 65	Muy Alto

Fuente: (Delgado, 2003, citado por (Ramírez Ortiz & Hincapie Gómez, 2009))

**Cálculo de IMF<sub>1</sub>:** Para su cálculo se utilizó la siguiente ecuación:  $IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P_t}$

donde,

IMF = Índice modificado de Fournier

p<sub>i</sub> = Precipitación media mensual (mm)

P<sub>t</sub> = Precipitación media anual anual (mm)

i = mes

**Cálculo de IMF2:** Aquí el IMF se obtuvo para cada año con los datos de precipitación total mensual y anual. Luego se promedió la sumatoria de los IMF estimados sobre el número de años analizados de acuerdo a la siguiente ecuación  $IMF_J = \frac{1}{b} * \sum_{j=1}^b IMF_j$

donde,

IMF<sub>j</sub> = Índice Modificado de Fournier  
 J = año  
 b = Número de años de registro

Los valores del IMF resultantes de las anteriores ecuaciones se clasificaron de acuerdo con lo indicado en la siguiente tabla (Tabla 34).

Tabla 34. **Calificación del índice modificado de Fournier (IMF)**

Clase	Rango	Descripción
1	< 60	Muy bajo
2	60-90	Bajo
3	90 – 120	Moderado
4	120 - 160	Alto
5	> 160	Muy alto

CEC, 1992, citado por: (Ramírez Ortiz & Hincapie Gómez, 2009)

**Cálculo de ICP<sub>1</sub>:** Se estimó utilizando la siguiente ecuación

$$ICP = 100 * \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P}$$

donde,

ICP = índice de concentración de las precipitaciones (%)  
 P<sub>i</sub> = Precipitación mensual (mm)  
 P = Precipitación media anual (mm)  
 i = mes

**Cálculo de ICP2:** Aquí el ICP se obtuvo para cada año con los datos de precipitación total mensual y anual. Luego se promedió la sumatoria de los ICP estimados sobre el número de años analizados, utilizando la siguiente ecuación  $ICP_j = \frac{1}{b} * \sum_{j=1}^b ICP_j$

Donde,

ICP<sub>j</sub> = índice de concentración de las precipitaciones (%)  
 J = año  
 b = número de años de registro

Los valores del ICP se clasificaron de acuerdo con lo indicado en la siguiente tabla, Tabla 35

Tabla 35. **Clasificación del Índice de concentración de la precipitación (ICP), Fuente: (UNESCO,**

2006)

Rango	Descripción
8,3- 10	uniforme
10 - 15	moderadamente estacional
15 - 20	estacional
20 - 50	altamente estacional
50- 100	irregular

#### 4.1.3. Estimación del factor R

Para estimar el factor R, se utilizó la ecuación presentada por Ramírez, 2006 citada por (Ramírez Ortiz & Hincapie Gómez, 2009)), cuyo análisis de regresión entre el promedio mensual del IMF y el promedio mensual del EI<sub>30</sub> calculado para 15 años y reportado por Rivera (1990), explicó la variación del EI<sub>30</sub> en un 70%.

$$EI_{30} = \sum_1^{12} 30,4(IMF) + 28,3$$

donde:

EI<sub>30</sub>= Erosividad en MJ . mm.ha<sup>-1</sup>

IMF= Índice modificado de Fournier (promedio mensual)

Los valores obtenidos se clasificación de acuerdo con lo indicado en la siguiente tabla (Tabla 36)

Tabla 36. *Clasificación de la erosividad de las lluvias propuesta para la zona cafetera colombiana.*

Clase	Erosividad R (mj.mm.ha <sup>-1</sup> )	Clasificación
1	< 1.000	Natural
2	1.000 – 2.500	Muy baja
3	2.500 – 5.000	Baja
4	5.000 – 7.500	Moderada
5	7.500 – 10.000	Alta
6	10.000 – 15.000	Muy Alta
7	15.000 – 20.000	Severa
8	> 20.000	Extremadamente severa

Fuente: (Rivera & Gómez, 1991)

#### 4.1.4. Resultados

La siguiente tabla resume los valores de los siete procedimientos utilizados para estimar el potencial erosivo y la variación temporal de las lluvias en la microcuenca del Río Navarco región nororiental del departamento de Quindío.

La erosividad de las lluvias, estimada mediante el IFA<sub>1</sub> se considera muy alta es decir las precipitaciones se consideran de muy alta agresividad, en 5 de las 8 estaciones analizadas,

Aeropuerto El Edén con 557 es la estación que ostenta el mayor valor, seguida de Bremen (532), La Playa (438), San Remo (402) y Navarco (367); la erosividad es alta en la estación La Picota (281), es Media en la estación La Montaña (268) y es baja en la estación Boquerón (192). Para el IFA<sub>2</sub> los valores resultantes son similares, El Edén, Bremen, San Remo, La Playa y Navarco sostienen muy alta erosividad y media erosividad La Picota, La Montaña y Boqueron. (Tabla 37).

El IFA<sub>3</sub> calificó el potencial de erosividad entre bajo y muy alto Tabla 37. Esto expresa una gran variabilidad anual de la precipitación mensual entre las estaciones objeto de estudio. La estación Bremen presentó el IFA más alto, con un valor de 71,2 que se considera muy alto y el valor más bajo lo obtuvo la estación La Montaña con 26,5.

Tabla 37. *Valores promedios del Índice de Fournier Anual (IFA), Índice Modificado de Fournier (IMF) e Índice de Concentración de las Precipitaciones (ICP) en 8 estaciones meteorológicas en la microcuenca del río Navarco y su área de influencia.*

Estación	IFA <sub>1</sub>	IFA <sub>2</sub>	IFA <sub>3</sub>	IMF <sub>1</sub>	IMF <sub>2</sub>	ICP <sub>1</sub>	ICP <sub>2</sub>	EI <sub>30</sub>
El Edén	557,4	557,0	34,7	209,9	238,2	9,1	13,5	6.987,2
La Playa	437,8	414,8	57,7	216,7	249,7	10,3	12,3	7.454,4
San Remo	402,9	490,9	38,6	243,9	269,6	8,9	10,3	8.169,9
Bremen	531,6	533,7	71,2	302,3	318,9	9,6	10,8	9.764,6
La Picota	281,3	278,7	29,7	139,4	167,1	9,8	12,5	5.026,6
La Montaña	268,3	270,9	25,8	133,2	159,0	9,3	11,7	4.785,3
Navarco	366,9	366,8	40,1	183,5	216,6	9,3	10,9	6.392,4
Boquerón	191,5	221,1	26,5	140,6	176,0	9,4	13,5	5.140,5

Fuente Está Investigación. Datos CRQ e IDEAM.

En cuanto a los valores obtenidos por el índice modificado de Fournier, el IMF<sub>1</sub> muestra en 5 de las ocho estaciones valores por encima de 160, Bremen (302), San Remo (244), La Playa (217), El Edén (210) y Navarco (183) lo que indican una muy alta erosividad. Por su parte registraron valores altos, entre 120 y 160 las estaciones Boquerón (141), La Picota (139) y por último La Montaña que registró (133).

El IMF<sub>2</sub> calificó las lluvias como de muy alta erosividad en la mayoría de las estaciones, Bremen, con un valor de 318 registra el mayor valor. La estación La Montaña cuyo valor (159) tabla 37, se considera como Alto (Tabla 34).

De otro lado, según el ICP<sub>1</sub>, la distribución de la precipitación en las estaciones objeto de estudio es uniforme (Tabla 5), con predominio de valores entre 9 y 10% (Tabla 7) con excepción de la estación La Playa que alcanza 10,3% y se considera moderadamente

estacional. Con el ICP<sub>2</sub> todas las estaciones se agrupan dentro del rango de moderadamente estacionales, presentando el menor valor la estación San Remo con 10,2% y el mayor las estaciones El Edén y Boquerón con 13,5%. En general la uniformidad presentada en ambos índices se asocia a la tendencia bimodal de la precipitación (Figura 1) originada por el doble tránsito en el año, de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), en la región Andina colombiana. La ubicación dominante de la ZCIT hacia el centro del país durante los meses de abril y mayo en el primer semestre y octubre y noviembre en el segundo semestre genera condiciones de frecuente nubosidad y precipitación produciendo las dos temporadas lluviosas del año. Entre los meses de enero y febrero la ZCIT se sitúa al sur de la línea ecuatorial aproximadamente entre 4 y 5° de latitud sur y determina la primera época seca del año, mientras que entre julio a agosto se desplaza entre los 8° y 10° de latitud norte ocasionando en segundo periodo seco en el centro del país (Guzmán y Baldión, 1997).

Los meses de marzo y septiembre, se consideran de transición hacia los períodos lluviosos y los meses de junio y diciembre lo son hacia los períodos de menor precipitación del año que corresponden a los meses de julio y agosto y enero y febrero (Figura 67 y Tabla 38).

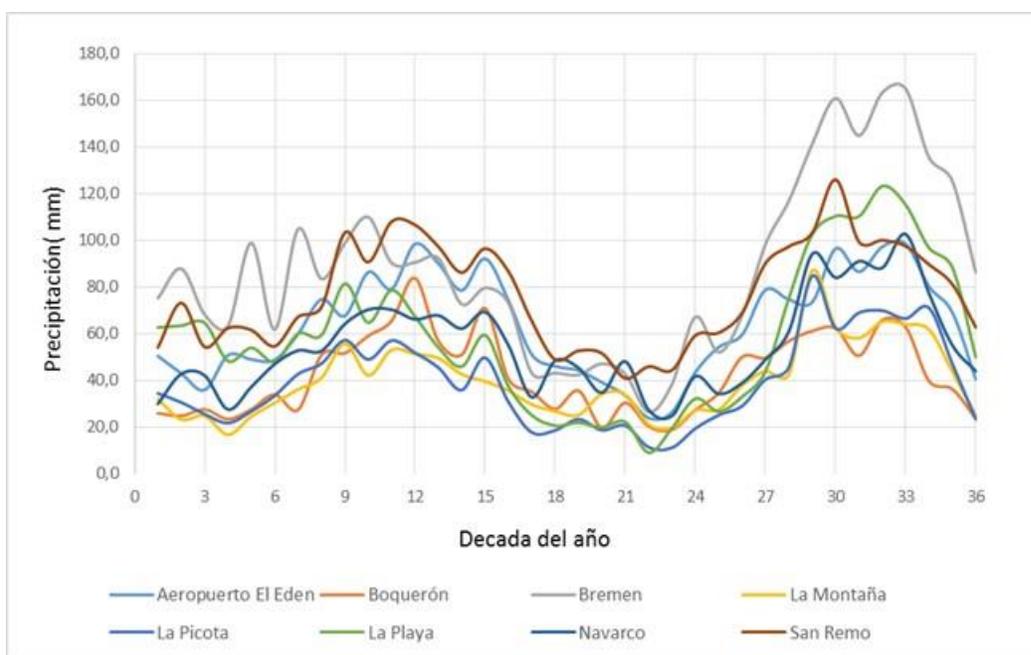


Figura 67. Distribución decadiaria de la precipitación en 8 estaciones meteorológicas de la microcuenca del río Navarco y sus alrededores.

Tabla 38. Precipitación media mensual y anual en 8 estaciones de la microcuenca del río Navarco y sus alrededores.

Estaciones	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Aeropuerto El Edén	129,5	148,8	202,6	264,0	261,0	171,5	117,2	94,1	192,8	244,8	282,4	189,9	2.298,6
Boquerón	78,6	85,3	130,2	208,7	179,0	103,7	85,9	66,7	134,6	180,5	179,4	99,9	1.532,5

Bremen	231,4	224,2	287,3	290,9	244,8	159,6	132,4	132,4	218,4	419,1	473,1	347,0	3.160,6
La Montaña	80,4	72,0	133,2	146,8	131,9	92,3	93,5	68,3	109,6	192,6	187,5	130,7	1.438,8
La Picota	90,9	82,3	147,4	158,1	131,3	67,4	63,0	42,2	94,9	192,9	205,6	141,6	1.417,6
La Playa	190,9	150,4	201,0	211,0	159,6	83,4	64,3	61,1	103,8	288,3	348,8	235,1	2.097,7
Navarco	115,0	112,1	169,9	207,0	199,5	136,5	128,5	94,2	122,3	239,4	282,1	176,4	1.982,9
San Remo	181,8	178,8	242,1	305,5	280,1	201,2	145,4	149,8	219,7	326,7	297,0	233,6	2.761,7

Fuente: IDEAM, agrupado de los valores decadiarios de precipitación.

En la Tabla 38, se puede apreciar que los meses de abril, octubre y noviembre registraron los mayores valores de precipitación durante la primera y la segunda temporada lluviosa del año respectivamente. De igual manera se encontró que el valor del  $ICP_1$  fue mayor en los meses de abril y mayo y octubre a diciembre (Tabla 39), lo cual indica que en ambas temporadas, pero especialmente en la segunda, se genera una dinámica más activa de la precipitación sobre la erosión del suelo, debido a una mayor concentración de las lluvias.

Tabla 39. **Valor del Índice de Concentración de la Precipitación (ICP) promedio mensual y anual en las ocho estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.**

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Bremen	0,518	0,504	0,836	0,784	0,610	0,258	0,177	0,177	0,482	1,778	2,265	1,230	9,617
La Picota	0,412	0,338	1,081	1,243	0,861	0,226	0,192	0,089	0,449	1,858	2,096	1,001	9,847
Navarco	0,336	0,308	0,730	1,094	1,016	0,476	0,422	0,226	0,382	1,463	2,027	0,794	9,274
La Montaña	0,312	0,249	0,858	1,042	0,842	0,412	0,420	0,225	0,580	1,793	1,699	0,826	9,258
La Playa	0,827	0,515	0,920	1,013	0,578	0,158	0,094	0,085	0,245	1,891	2,755	1,256	10,339
Boqeron	0,278	0,327	0,718	1,775	1,306	0,434	0,296	0,177	0,814	1,427	1,446	0,430	9,428
El Eden	0,318	0,419	0,777	1,320	1,289	0,557	0,260	0,167	0,704	1,131	1,510	0,683	9,136
San Remo	0,435	0,420	0,771	1,221	1,031	0,534	0,274	0,294	0,641	1,406	1,156	0,700	8,882

Fuente: Esta investigación

Con respecto al factor R, los valores de erosividad (Tabla 40 y Figura 68) son similares a los observados en otros estudios en regiones con similares características como el de (Echeverry Tafur & Obando Moncayo, 2010). En este estudio el factor R obtenido en las estaciones meteorológicas mostró que 7 de las 8 estaciones consideradas en este estudio presentaron valores moderados de erosividad, y solo la estación Bremen con un valor de R anual de  $9.765 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1}$  se clasificó como de Alta erosividad.

Tabla 40. **Valores del factor R anual en  $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1}$ , estimado utilizando el Índice Modificado de Fournier (IMF) promedio mensual, en 8 estaciones meteorológicas de la microcuenca del río Navarco y sus alrededores**

Estaciones	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	R	Clasificación
Bremen	618	545	882	803	648	300	217	222	485	1.663	2.124	1.256	9.765	Alta
La Picota	218	204	557	686	465	145	123	71	289	916	893	460	5.027	Moderada
Navarco	298	254	510	727	673	336	304	174	262	956	1.350	547	6.392	Moderada
La Montaña	217	157	461	532	426	227	226	131	315	883	801	410	4.785	Moderada
La Playa	635	378	675	699	421	145	100	96	194	1.290	1.933	888	7.454	Moderada
Boquerón	199	192	394	954	681	249	193	130	426	709	741	273	5.140	Moderada
El Edén	289	350	590	972	906	445	245	160	548	860	1.087	533	6.987	Moderada
San Remo	453	432	709	1.076	916	529	271	325	554	1.205	1.049	651	8.170	Alta

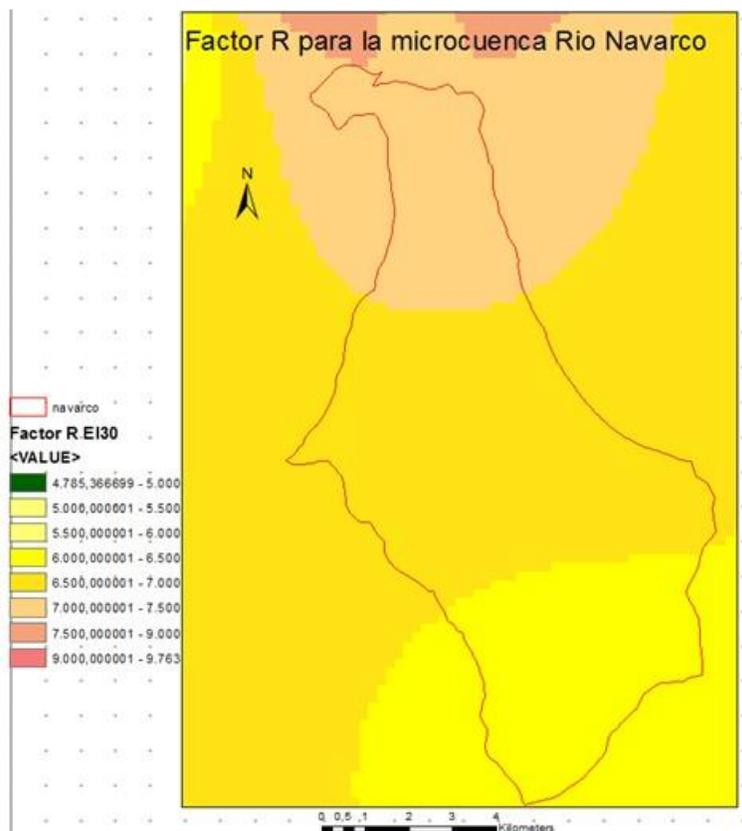


Figura 68. Distribución del factor R de erosividad en la microcuenca de Río Navarco

Interpolando los resultados obtenidos en las 8 estaciones consideradas (tabla40) se lograron los valores de  $EI_{30}$  para la microcuenca del Río Navarco. Figura 68. En la figura se aprecia como el valor de  $EI_{30}$  varía entre 6.000 y 7500 en  $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1}$ , lo cual de acuerdo con (Rivera & Gómez, 1991) se considera de moderada erosividad. Allí los valores cercanos a 7500, se presentan en la parte baja de la microcuenca entre 1.800 y 2.000 msnm altura donde se alcanzan los óptimos pluviométricos en la vertiente occidental de la cordillera Central y conforme se asciende van reduciéndose ligeramente hasta un poco menos de 6.400  $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1}$  en la parte alta de la microcuenca Figura 68.

---

**4.2. MODELO DE PÉRDIDA DE SUELO.  
FACTOR LS – PENDIENTE: LONGITUD E  
INCLINACIÓN. Proyecto Navarco**

---

Subdirección de Agrología

---

Camilo Andrés Camacho Hilarión

---

## FACTOR LS

### 4.2.1. Introducción

El factor  $LS$  aparece por primera vez formando parte de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) de Wischemeier y Smith (1965). Tanto la longitud como la inclinación de pendiente de una superficie afectan la tasa de erosión de suelo producida por la acción del agua, y está demostrado que los aumentos en longitud e inclinación de pendiente puede producir altas velocidades de flujo superficial y por tanto mayores tasas de erosión (Haan *et al.*, 1994).

En el desarrollo del USLE, estos dos efectos específicos de la topografía han sido evaluados separadamente, pero en las aplicaciones en campo, son considerados los dos como el factor topográfico,  $LS$  (Wischemeier y Smith, 1978), como el producto de la longitud de pendiente ( $L$ ), y la inclinación de pendiente ( $S$ ), considerados sobre un punto de interés, tales como una parcela de campo o la celda de un raster (Van Remortel *et al.*, 2001), por otra parte  $LS$  es adimensional y su valor varía entre 0 e infinito.

$$LS = L * S$$

### 4.2.2. Factor Longitud de Pendiente, L

La longitud de pendiente,  $\lambda$ , ha sido definida como la distancia desde el punto de origen del flujo superficial hasta el punto donde, o bien el gradiente de pendiente decrece lo suficiente como para que la deposición comience, o también, el flujo sea concentrado en un canal definido (Wischemeier y Smith, 1978). También se define como la relación esperada de pérdida de suelo por unidad de área sobre una superficie de 72,6 pies de longitud (22,13 m) con una pendiente uniforme de 9 % (es decir, exactamente,  $\sin \theta = 0.0896$  o  $\theta = 5.143^\circ$ ) bajo idénticas condiciones de suelo.

La erosión media producida por el factor  $L$  es función de la longitud de pendiente ( $\lambda$ ), varía según la siguiente fórmula:

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m$$

Donde,  
 22,1 son los m de la unidad gráfica en RUSLE  
 $\lambda$ , es la longitud de la pendiente en proyección horizontal, en m.  
 $m$ , es un exponente denominado longitud-pendiente

$$m = \frac{F}{1+F} \quad \text{Donde } F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3 (\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

Donde,  $F$  es un valor que relaciona la erosión debida a la escorrentía en regueros con la erosión producida por el impacto de la gota en el suelo.

Donde,  $B$ , es el ángulo de pendiente. Así, el exponente de la pendiente está en función del ángulo de pendiente  $B$ .

Por otro lado, Moore y Wilson (1992) definen al factor  $LS$  como una medida de la capacidad de transporte de sedimentos del flujo superficial y varios autores coinciden al respecto (Moore y Nieber, 1989; Desmet y Govers, 1996), en que bajo un ambiente en dos dimensiones, el flujo superficial y la resultante pérdida de suelo, en realidad, no dependen de la distancia desde un punto hasta la divisoria o corte de la ladera, sino, del área específica de escorrentía contribuyendo a ese punto en estudio. De esta manera, aunque los métodos que estiman longitud de pendiente tienen en cuenta el efecto de la forma del perfil sobre la erosión, no consideran el grado de convergencia de esta (Desmet y Govers, 1996). Para incorporar el impacto de la convergencia del flujo, la longitud de pendiente,  $\lambda$ , fue reemplazada por el área de contribución aguas arriba (Moore y Burch, 1986; Desmet y Govers, 1996). Esto permite extender la estimación de la pérdida de suelo a la complejidad de los terrenos en 3D.

#### 4.2.3. Metodología General

Diferentes autores han desarrollado diferentes metodologías para la estimación del factor  $LS$  (tabla 1), y la diferencia principal entre estos, radica en la forma de estimar la longitud de pendiente, originalmente la cual, se definió como la distancia desde el punto de origen del flujo superficial hasta el punto donde la pendiente decrece lo suficiente como para que la deposición comience, o bien, el flujo se concentre en un canal definido (Wischmeier y Smith, 1978). Un ejemplo de este tipo de cálculo está representado por el método desarrollado por Hickey (2000) de acumulación sobre un raster. Por lo tanto, las diferencias entre las ecuaciones derivan de la aplicación de coeficientes seleccionados para explicar mejor el relieve del área de estudio (llanura, meseta, colinas, montañas).

A continuación (Tabla 41), las fórmulas que se encuentran más comúnmente en el software SIG reemplazan la longitud de la pendiente con el área contributiva aguas arriba de cada punto del modelo (Moore y Burch, 1986; Desmet y Govers, 1996).

Modelo	Factor $LS$		Exponentes	
	$L$	$S$	$m$	$n$
USLE (1978)	$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m$	$S = (65,41 \text{sen}^2 \theta + 4,56 \text{sen} \theta + 0,065)$	$m = 0,5$ para $\theta > 5\%$ ; $m = 0,4$ para $3,5\% < \theta \leq 5\%$ $m = 0,3$ para $1 < \theta \leq 3,5\%$ ; $m = 0,2$ para $\theta \leq 1$	
RUSLE (1997)	$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m$	$S = 10,8 \text{sen} \theta + 0,03$ para $s < 9\%$ $S = 16,8 \text{sen} \theta - 0,5$ para $s \geq 9\%$	$m' = \left(\frac{\beta}{1 + \beta}\right)$ donde $\beta = \frac{\left(\frac{\text{sen} \theta}{\text{sen} 5,143^\circ}\right)}{3, \text{sen}^2 \theta + 0,56}$	
Hickey (2004)	$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m$	$S = 10,8 \text{sen} \theta + 0,03$ para $s < 9\%$ $S = 16,8 \text{sen} \theta - 0,5$ para $s \geq 9\%$	La metodología utiliza los valores de $m$ expresados en la Tabla 3 del presente trabajo para un $\beta$ moderado.	
Mintegi-Barrios (2000)	$LS = 0,009 \cdot s^2 + 0,0798 \cdot s$ para $s \leq 30\%$ $LS = 0,2558s + 3,248$ para $s > 30\%$			
Moore y Burch (1986)	$L = \left(\frac{A_c}{22.13}\right)^m$	$S = \left(\frac{\text{sen} \theta}{0,0896}\right)^n$	0,4	1,3
Moore y Wilson (1992)	$L = \left(\frac{A_c}{22.13}\right)^m$	$S = \left(\frac{\text{sen} \theta}{0,0896}\right)^n$	0,6	1,3
Desmet y Govers (1996)	$L = \frac{(A_{c, \text{top}} + D^2)^{m'} - A_{c, \text{top}}^{m'}}{D^{m'} \cdot A_{c, \text{top}}^{m'} (22,13)^m}$	$S = 10,8 \text{sen} \theta + 0,03$ para $s < 9\%$ $S = 16,8 \text{sen} \theta - 0,5$ para $s \geq 9\%$	$m' = \left(\frac{\beta}{1 + \beta}\right)$ donde $\beta = \frac{\left(\frac{\text{sen} \theta}{\text{sen} 5,143^\circ}\right)}{3, \text{sen}^2 \theta + 0,56}$	
Griffin <i>et al.</i> (1988)	$L = (m+1) \left(\frac{A_c}{22.13}\right)^m$	$S = 10,8 \text{sen} \theta + 0,03$ para $s < 9\%$ $S = 16,8 \text{sen} \theta - 0,5$ para $s \geq 9\%$	$m' = \left(\frac{\beta}{1 + \beta}\right)$ donde $\beta = \frac{\left(\frac{\text{sen} \theta}{\text{sen} 5,143^\circ}\right)}{3, \text{sen}^2 \theta + 0,56}$	
Mitasova (1996)	$L = (m+1) \left(\frac{A_c}{22.13}\right)^m$	$S = \left(\frac{\text{sen} \theta}{0,0896}\right)^n$	$m = 0,4 - 0,6$ ( $n'$ elegido = 0,5)	$n = 1 - 1,3$ ( $n'$ elegido = 1,15)
Mitasova (2001)	$L = A_c^m$	$S = (\text{sen} \theta)^n$	$m = 1 - 1,6$ ( $m'$ elegido = 1,3)	$n = 1 - 1,3$ ( $n'$ elegido = 1,15)

Los valores de  $\beta$  (rill erosion/interrill erosion) son para suelos clasificados como moderadamente susceptibles a la erosión (Haan *et al.*, 1991).

Tabla 41. Ecuaciones para la estimación del factor  $LS$

#### 4.2.4. Parámetros de terreno y su relación.

Por otra parte, la evolución de los SIG, para la determinación de una mayor abstracción de la realidad, como la obtención y constante mejoramiento, por ejemplo de los modelos de elevación digital DEMs obtenidos de sensoramiento remoto (Figura 69), proveen una base de datos a partir de los cuáles, se pueden generar digitalmente los atributos o parámetros del terreno. Además, la estructura de los rasters o DEMs se presta para las estimaciones de vecindad, las cuáles son frecuentemente usadas para derivar estos parámetros (Weshler, 2006). La primera derivada de la superficie, tal como pendiente, orientación, más la curvatura (segunda derivada), dan la base para la caracterización de la forma del terreno (Evans, 1998). Estos atributos del terreno son ampliamente utilizados en aplicaciones hidrológicas y son derivados directamente de los DEMs. Es así que el camino del agua sobre la superficie está ligado a la forma del terreno y cuyo parámetro se conoce como ***dirección de flujo***, a partir de la cual, puede ser calculado el ***flujo acumulado***, y por consiguiente, las redes de drenaje, así como, identificar los límites de cuencas.

Se debe tener en cuenta que los parámetros del terreno en esta sección fueron calculados en su totalidad con ArcGIS, sin embargo también existen otros software de uso gratuito para análisis de información geográfica como SAGA GIS y QGIS, que calculan estos parámetros, y cuentan con distintos tipos de algoritmos para el análisis de los mismos.

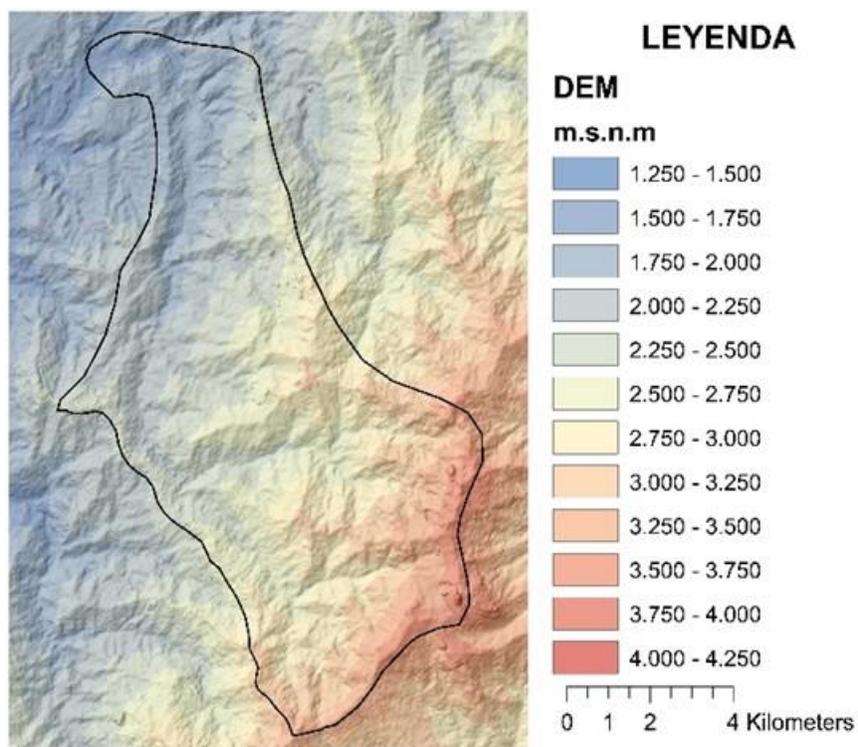


Figura 69. *Modelo Digital de Elevación (DEM) sobre la cuenca del Rio Navarcho.*

#### 4.2.5. Metodología

##### Cálculo del factor LS

Para todos los métodos expresados en la Tabla 1, y teniendo en cuenta las premisas expuestas en el párrafo anterior, por lo tanto se define la ecuación de Desmet y Govers (1996), quien tiene mejor en cuenta la convergencia y divergencia de los flujos apoyados en modelos de elevación DEM en formato Raster para la estimación del factor LS.

El software utilizado para la determinación del Factor LS fueron los SIG ArcGIS 10.3 (ESRI, 2019), con la extensión de trabajo Spatial Analyst y la herramienta ModelBuilder.

ModelBuilder corresponde a una de las herramientas disponibles en ArcGIS destinada a la edición y administración de geoprocursos con el fin de generar modelos de trabajo autónomos y secuenciales. Permite crear herramientas según necesidades específicas, optimizando tiempo y siguiendo secuencias de análisis lógicas y progresivas. Estos modelos responden a diagramas de flujo formados por tareas específicas interconectados de forma progresiva. En la Tabla 42 se especifican las herramientas que se incluyen dentro del modelo creado en ModelBuilder.

Tabla 42. Descripción de Herramientas de Geoprocesamiento en Arcgis.

HERRAMIENTAS	DESCRIPCIÓN
<b>Slope</b>	Para cada celda, la herramienta Pendiente calcula la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas.
<b>Fill</b>	Rellena sumideros para garantizar la representación correcta de cuencas y arroyos. Si los sumideros no se rellenan, una red de drenaje derivada puede ser discontinua.
<b>Flow Direction</b>	Crea un ráster de dirección de flujo desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendente más empinada.
<b>Flow Accumulation</b>	El resultado de Acumulación de flujo es un ráster de flujo acumulado para cada celda, determinado por la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda de pendiente descendente.
<b>Raster Calculator</b>	La herramienta Calculadora ráster permite crear y ejecutar una expresión de Álgebra de mapas que generará como salida un ráster

Antes de iniciar cualquier procesamiento espacial en Modelbuilder, previamente se prepararon los insumos con los que se trabajaron, en primera medida el DEM obtenido del

satélite Alos Palsar, el cual cuenta con una resolución espacial de 12 m se recorta sobre el área de interés, en este caso sobre la cuenca del Río Navarco; finalmente se re proyecta la capa raster en el sistema de coordenadas de referencia MAGNA-SIRGAS / Colombia Zona Oeste EPGS:3115.

Seguidamente se procede a estimar el Factor LS. La ecuación para la determinación del Factor LS se define de la siguiente manera:

**Factor L**, para calcular el valor de L, se usa la expresión matemática que se enuncia a continuación, donde el grado de inclinación del terreno tendrá un peso relativamente mayor que el de la longitud de la ladera.

$$L_{(i,j)} = \frac{[A_{(i,j)} + D^2]^{(m+1)} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^2 D^{m+2} (22.13)^m}$$

$$m = \frac{F}{1+F} \quad \text{Donde } F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3 (\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

Dónde:

- $B$  = Pendiente a nivel de pixel (debe estar expresa en grados, para pasar a radianes multiplicar por 0.01745)
- $A$  = Acumulación de flujo a nivel de pixel o área aportadora unitaria a la entrada de un pixel (celda).
- $D$  = Área de captación específica (Tamaño del pixel)
- $x$  = Coeficiente de corrección de forma ( $x=1$  para sistemas pixelados)

Para el cálculo de esta fórmula en el SIG, se utiliza un grid de acumulación de flujo, la dimensión de pixel (12m\*12m) y el exponente  $m$  calculado, finalmente el factor L, se desarrolla por algebra de mapas en ArcGis a través de la herramienta Raster Calculator, de acuerdo a la formula (ARTEAGA, 2016).

**Factor S**, para calcular el valor de S, se toma la siguiente fórmula:

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5 & \tan \beta_{(i,j)} > 0.09 \end{cases}$$

En la cual el ángulo  $\beta$  se toma como el ángulo medio para todos los subgrids en la dirección de mayor pendiente, debido a que la fórmula varía de acuerdo a dos condiciones, se debe utilizar el comando CON que es una función condicional de ArcGis, (Mancilla 2008).

Finalmente el Factor **LS**, se obtiene de multiplicar (Factor L \* Factor S) obtenidos en los pasos anteriores, usando algebra de mapas en ArcGis como ya se mencionó (Figura 71).

A continuación se presenta el modelo y esquema conceptual (Figura 70) desarrollado en Model Builder, de las operaciones realizadas para la determinación del Factor LS.

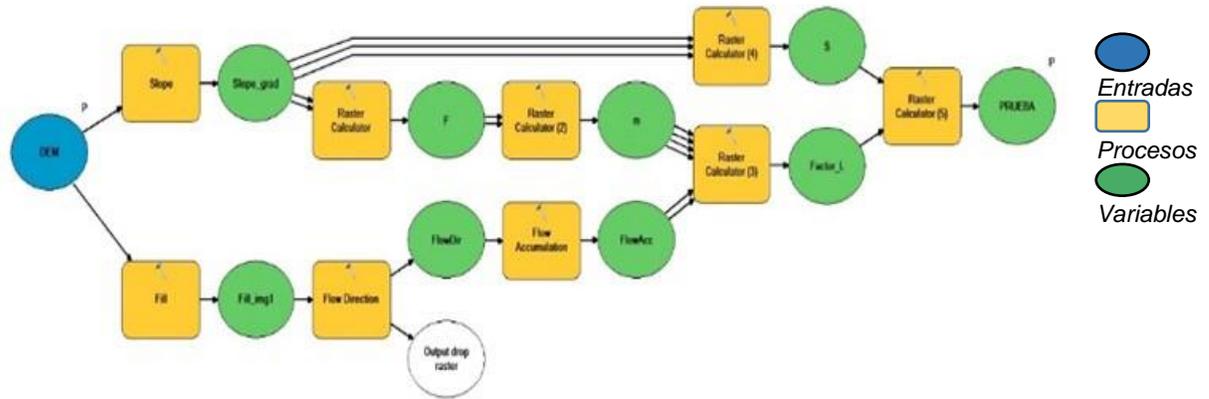


Figura 70. Modelo físico para la estimación del Factor LS en Model Builder.

4.2.6. RESULTADOS

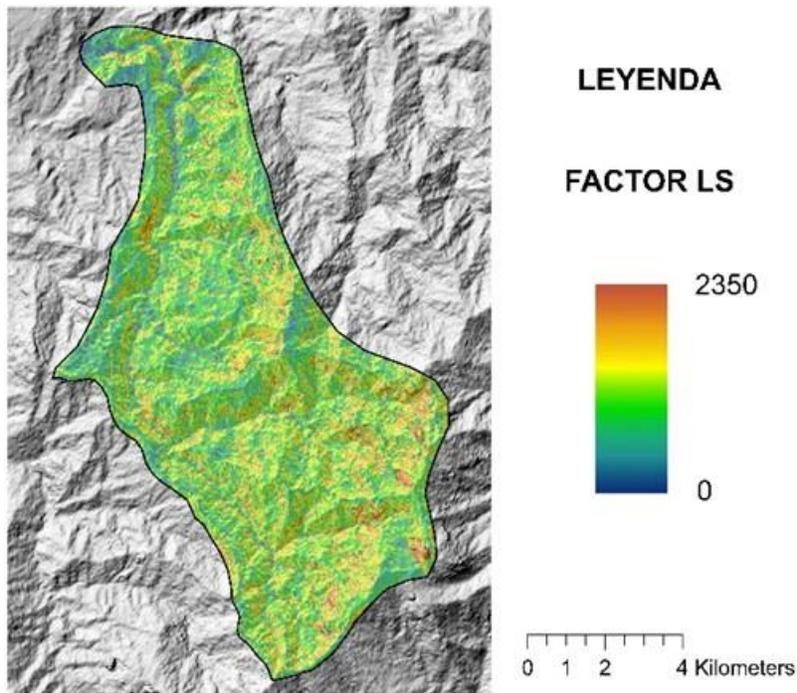


Figura 71. Representación de la distribución del factor LS sobre la cuenca del Rio Navarco.

---

**4.3. MODELO DE PÉRDIDA DE SUELO.  
FACTOR K – ERODABILIDAD DE LOS  
SUELOS. Proyecto Navarco**

---

Subdirección de Agrología

---

Héctor Jaime López Salgado

---

#### 4.3.1. Factor K (erodabilidad de los suelos)

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. Su determinación se realiza aplicando la siguiente expresión:

$$K = \frac{2.1 * (10)^{-4} * (12 - MO) * M^{1.14} + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)}{100} * 0,1317$$

Donde:

K = Índice de erodabilidad

M = (%Limo + % Arena muy fina) (100 - % arcilla), *limo* (diámetro de partículas de 0.002 a 0.05 mm), *arena muy fina* (diámetro de 0.05 a 0.10 mm), *contenido de arcilla* (diámetro de partículas menores de 0.002 mm).

- a porcentaje de materia orgánica
- b clasificación de acuerdo al tipo y clase de la estructura
- c clasificación de la permeabilidad

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

- 1: muy buena estructura. Granular muy fina.
- 2: buena estructura. Granular fina.
- 3: estructura regular. Granular media a gruesa
- 4: mala estructura, laminar, bloques o masiva.

Calificación del término c: Permeabilidad, según la siguiente escala. El valor de la permeabilidad del suelo se determinó en función de su textura empleando las relaciones funcionales descritas por Saxton y Rawls (2006).

- 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.

El valor de la constante 0.1317 es un factor de conversión de unidades al SI. Foster 1981.

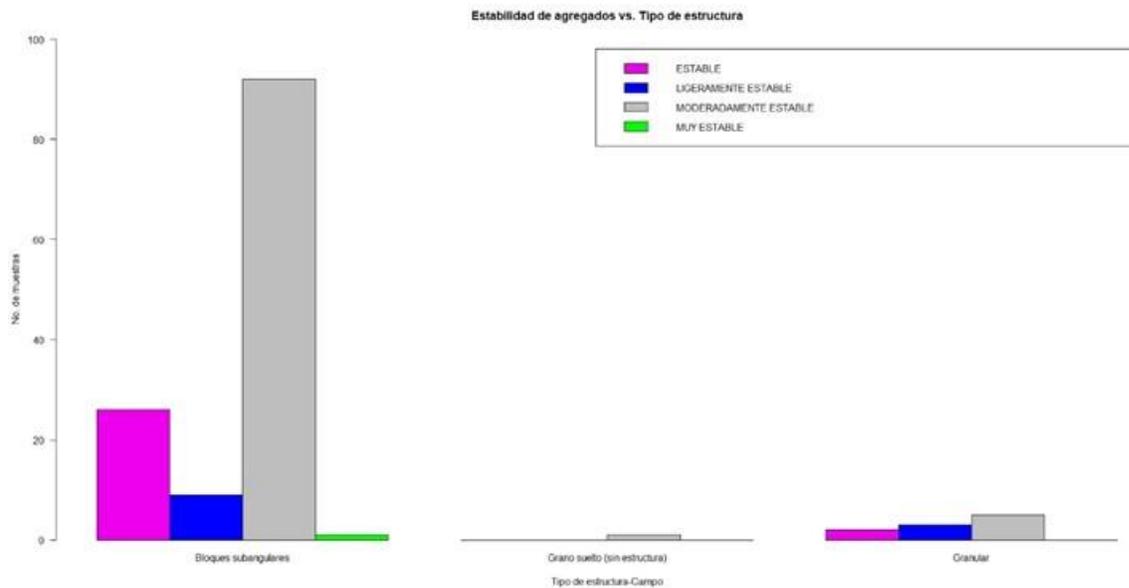
**El sub factor M**, granulometría, se determinó en laboratorio por el método de pipeta, donde se definieron as diferentes fracciones granulométricas y que son requeridas en el cálculo de la erodabilidad de los suelos. **Anexo incluido en el DVD adjunto**, análisis laboratorio observaciones.



**El sub factor a**, contenido de materia orgánica, se estimó a partir del contenido de materia orgánica multiplicado por la constante de conversión de 1,724 en general se considera que los valores son altos a muy altos, lo que indica una buena protección del suelo frente a los procesos erosivos, para el cálculo cuando el valor superó el 12% fue necesario igualar el contenido de materia orgánica a 12 para evitar valores negativos. Anexo incluido en el DVD adjunto, análisis laboratorio observaciones

**El sub factor b**, clasificación de acuerdo al tipo y clase de la estructura, dato colectado de la descripción de las observaciones realizadas en campo, determinada mediante observación visual y tacto., se encontró una dominancia de los bloques sub angulares que varían de finos a muy finos. Anexo incluido en el DVD adjunto, observaciones de campo.

En laboratorio se determinó la estabilidad estructural por el método de Yoder (Figura 74), y se encontró que el estado de agregación es moderadamente estable a estable para la mayoría de los suelos. Anexo incluido en el DVD adjunto, análisis laboratorio observaciones.



**Figura 74.** Estabilidad de agregados vs tipo de estructura de campo.

Aunque no hay criterios unificados en torno a los valores óptimos de agregación del suelo, algunos autores han encontrado valores relacionados con algunas cualidades del suelo que pueden tomarse como guía de evaluación: Malagón y Montenegro, (1990), Jaramillo 2002

- Porcentajes altos de agregados menores de 0.5 mm, aumentan la susceptibilidad a la erosión del suelo, caso que no ocurre en estos suelos, los Hapludands en húmedo y en seco en promedio alcanzan el 23,8 y 11,7 respectivamente. Los Dystrudepts que ocurren con menor frecuencia en la zona tienen resultados promedios similares en húmedo 23.7 y en seco 10.8. Estos resultados indican un comportamiento similar de

ambos suelos frente a la susceptibilidad a la erosión, haciéndolos relativamente menos erosionables.

- El (DPM), determinado por el método de Yoder, cuando es menor de 0.5 mm, indica mala estructuración (Olarte et al, 1979). los Hapludands y los Dystrudepts de la zona presentan valores superiores 1.5 por lo que se consideran bien estructurados, lo cual disminuye su susceptibilidad a la erosión.
- Cerca del 80% de los agregados son mayores a 0.425 mm lo que contribuyen a la aireación del suelo, al desarrollo radicular por un buen suministro de oxígeno a las raíces. Los tamaños de agregados en estos suelos presentan su mayor frecuencia entre 0.425 a 8 mm. proporcionalmente distribuidos.

Si el suelo se degrada en la en sus horizontes superficiales, se reduce la capacidad infiltración del agua de lluvia en el mismo, se produce sellamiento y encostramiento, disminuye la aireación y aumenta la escorrentía del agua, incrementando así la capacidad de arrastre y por lo tanto aumenta la susceptibilidad a la erosión. En otras palabras, la erodabilidad del suelo aumenta a medida que la estabilidad de los agregados disminuye

**El sub factor c, Permeabilidad,** es la capacidad del suelo para permitir en su interior el paso del agua. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración y por lo tanto el agua sobrante para escorrentía será menor, lo que incide directamente en la tasa de erosión.

Las observaciones realizadas en campo, sobre la textura del suelo, su estructura, consistencia, color y manchas de color, poros visibles y la profundidad de los diferentes horizontes mostraron que estos suelos son bien drenados, ya que la permeabilidad del suelo se relaciona con las anteriores propiedades.

Para el cálculo en el modelo de la pérdida de suelo se tiene en cuenta el primer horizonte, la permeabilidad se estimó a partir de la textura estimada Figura 75, el horizonte A para la mayoría de los suelos fue calificada como medianamente rápida y algunos en moderada. Anexo incluido en el DVD adjunto, análisis laboratorio observaciones.

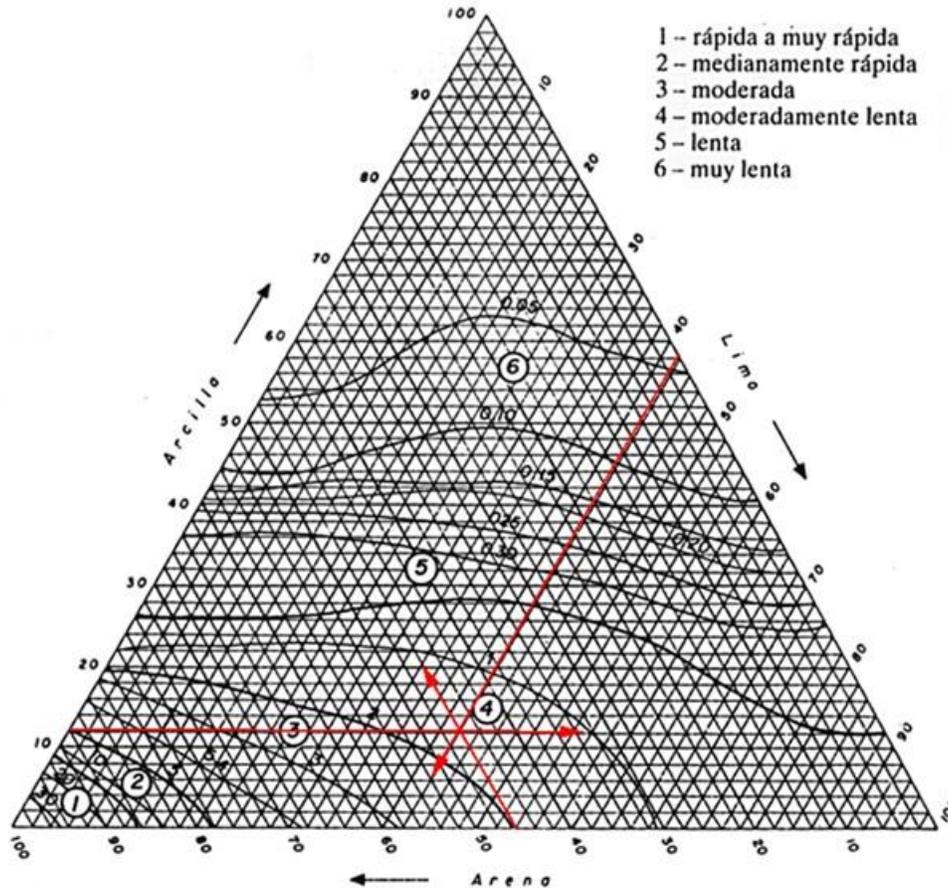


Figura 75. Triángulo textural y permeabilidad. Fuente.

Una vez determinados cada uno de los parámetros anteriores, se procede a calcular el factor K en tabla Excel, Anexo incluido en el DVD adjunto, análisis laboratorio observaciones, en él se muestran además los análisis estadísticos realizados para las propiedades del suelo evaluadas y que se usan para el modelamiento espacial del factor erodabilidad del suelo (K), fundamentales en el empleo del mapeo digital de suelos y la representación espacial del factor, a continuación se ilustra el procedimiento del mapeo digital.

#### 4.3.2. Mapeo Digital de Suelos

En vista de los grandes retos que actualmente afronta la humanidad a escala global y regional, relacionados con seguridad alimentaria, cambio climático, degradación de suelo, pérdida de biodiversidad y disminución en la sostenibilidad de los ecosistemas (FAO e ITPS, 2015), donde se ven afectados las funciones del suelo (McBratney et al., 2014), es de vital importancia resaltar que el direccionamiento que pueda darse para solventarlas, requiere de información espacial armonizada y su adecuado análisis (Zhang et al., 2017). La comunidad académica mundial de las ciencias del suelo ha venido desarrollando mapas y bases de datos regionales, continentales y mundiales, que han servido de base para la

evaluación del riesgo del recurso suelo; no obstante, muchos de los mapas convencionales no aportan significativamente a la solución de los desafíos actuales (Arrouays et al., 2017).

Algunos de los mapas existentes producidos a partir de levantamientos de suelos y mediante técnicas de mapeo convencionales, son a menudo de escala gruesa y carecen de detalles en los límites espaciales. Dentro de este contexto, el avance en las ciencias computacionales y en la disponibilidad de información espacial, ha conllevado a la mejora de las técnicas de mapeo de suelos, dando origen al mapeo digital de suelos (MDS) (Scull et al., 2003; Minasny y McBratney, 2016), como una sub disciplina de la ciencia del suelo que toma y moderniza el enfoque tradicional del mapeo de suelos, haciendo uso de técnicas cuantitativas sofisticadas (Minasny y McBratney, 2016). Lagacherie y McBratney (2006), definen el mapeo digital de suelos como la generación de información espacial a partir de datos de laboratorio y campo acoplados con sistemas de inferencia espaciales. Así mismo, se han propuesto otras terminologías para hacer referencia al MDS como cartografía de suelos asistida por computador, cartografía numérica, mapeo pedométrico y modelado para extrapolación geográfica (Franklin, 1995; McKenzie y Ryan, 1999; Scull et al., 2003; Legros, 2006; Kempen et al., 2010).

La teoría de los factores formadores de suelo ideada por Dokuchaev (1967) y luego mejorada por Jenny (1941) es el paradigma más importante en la ciencia del suelo. Estos modelos conceptuales sugieren que el suelo es el producto de la acción de factores formadores como el clima, organismos, relieve, material parental y el tiempo. Luego del trabajo de Jenny, numerosas investigaciones han intentado formalizar de manera cuantitativa este postulado. De lo anterior se desprende que McBratney et al. (2003), reporta sus esfuerzos para generación de mapas de suelo, proponiendo el modelo SCORPAN (Suelo como resultado de la acción de algunas propiedades del mismo suelo, el clima, organismos, relieve, material parental, localización geográfica y el tiempo) como una herramienta para la explicación cuantitativa del suelo, usando funciones espaciales de predicción.

Lagacherie y McBratney (2006), proponen que el MDS no solo consiste en realizar mapas empleando métodos cuantitativos mediante un ordenador para finalmente develar relaciones entre variables que representan los factores del modelo SCORPAN, sino que adicionalmente, debe contar con tres componentes principales que son:

**Entradas:** son los datos recolectados en campo y/o laboratorio de las observaciones del suelo y los mapas temáticos asociados a las variables que infieren en el comportamiento espacial de la propiedad del suelo a mapear.

**Procesos:** incluye la construcción de modelos matemáticos o estadísticos que relacionan las observaciones de campo y laboratorio con las covariables ambientales referenciadas en el modelo SCORPAN.

**Salidas:** incluye información de predicción de propiedades de suelo, generalmente en formato raster, acompañada de información sobre incertidumbre de la predicción. Esta salida puede ser actualizada en la medida que se cuente con nueva información.

Por su parte, Zhang et al. (2017) mencionan que el marco general del MDS cuenta con elementos como los datos de suelos consolidados, las covariables ambientales, el muestreo de suelos, el modelado espacial predictivo y las potenciales aplicaciones que se puedan dar a partir del proceso.

### 4.3.3. Desarrollo Modelo K-Cuenca Río Navarco

Covariables ambientales: Para el ajuste del modelo de predicción de erodabilidad de suelo, se emplearon variables derivadas del Modelo Digital de Elevación (MDE), de resolución espacial de 12,5 m. Se generaron 15 capas mediante el software SAGA GIS v.7.4.0 (Conrad et al., 2015), relacionadas con factores morfométricos del terreno.

Ajuste del modelo e incertidumbre: Partiendo de los posibles predictores se empleó el algoritmo de eliminación recursiva de variables, (Guyon et al., 2002), para seleccionar las capas o covariables ambientales con mayor poder predictivo de la erodabilidad de suelo. De esta manera se obtuvo que el aspecto, el índice topográfico de humedad, la altura del terreno con relación a los drenajes y la exposición del suelo a la radiación solar fueron las variables que ayudaron a estimar la erodabilidad del suelo en la zona de estudio. El porcentaje de variación de los datos que fue explicado por el modelo fue de 57,4% y el RMSE fue de  $0,0056 \frac{t.ha.h}{ha.MJ.mm}$ . El modelo empleado fue máquinas de soporte vectorial (Cortes y Vapnik, 1995).

La distribución de los valores estimados del factor K se representa en la Figura 76.

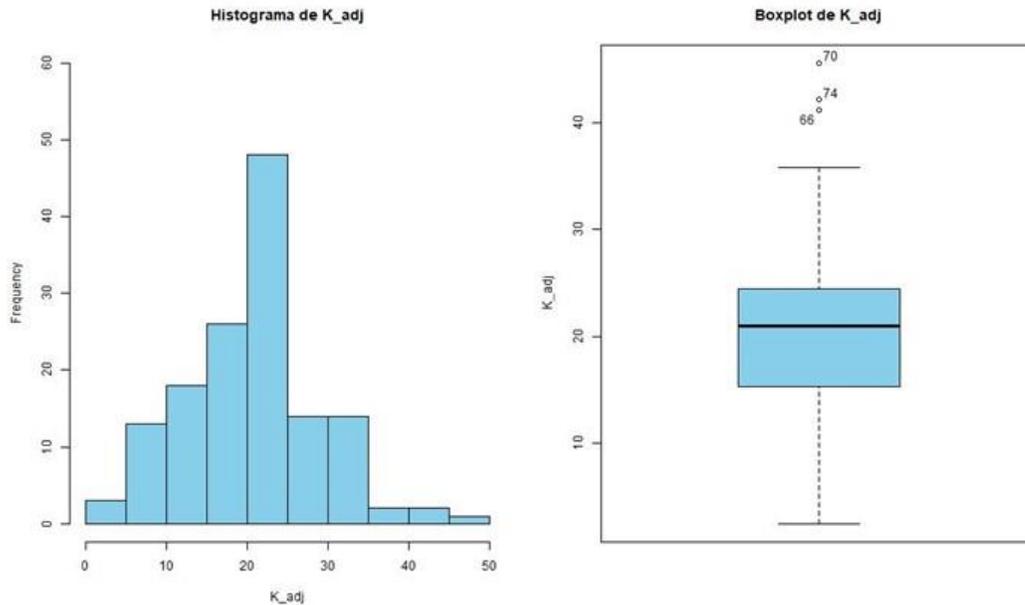


Figura 76. La validación del modelo se realizó empleando el algoritmo de árboles de regresión por cuantiles (Vaysse y Lagacherie, 2017). La correlación entre valores observados y predichos fue de 73%.

#### 4.3.3.1. Análisis del Factor K por Subcuenca

El análisis de la distribución espacial del factor K modelado se realizó mediante estadísticas zonales agregadas por las subcuencas de la zona de estudio, previamente delimitadas. Se delimitaron 19 subcuencas y, con base en esta delimitación se calcularon medidas descriptivas de K para cada subzona, como se muestra en la Tabla 43. Se empleó la prueba

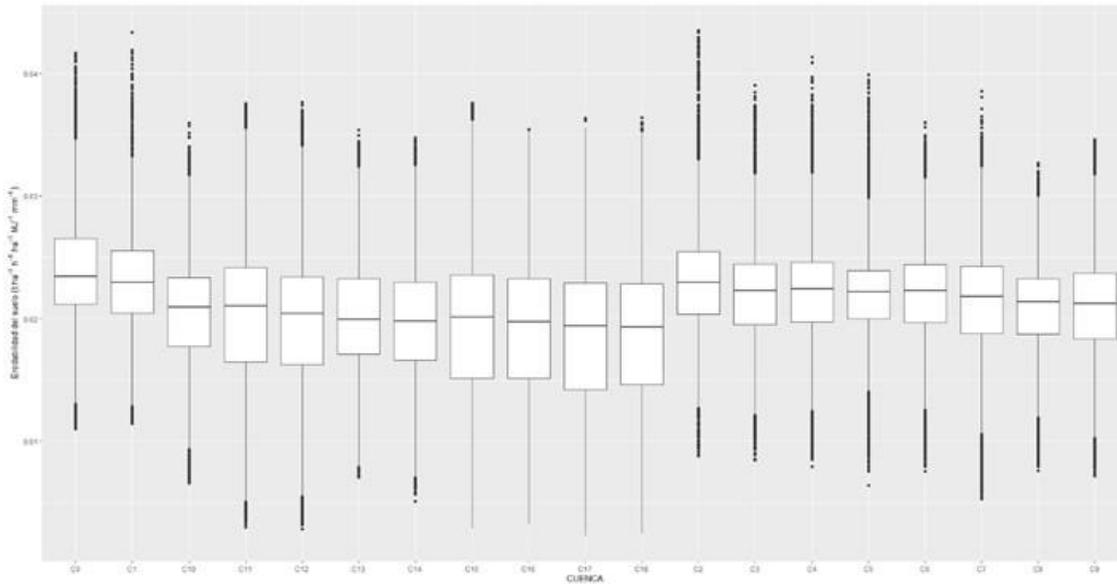
de comparación de medias de Tukey para clasificar el análisis de varianza de los resultados obtenidos.

Tabla 43. **Estadísticas zonales del factor K por subcuencas delimitadas en el área de estudio.**

CUENCA	PROM	MIN	MAX	DESVEST	CV_PROM	MEDIAN	Tukey HSD Analysis_K
C0	0.0237	0.0110	0.0417	0.0047	19.73%	0.0235	A
C2	0.0232	0.0088	0.0435	0.0045	19.34%	0.0229	B
C1	0.0230	0.0114	0.0434	0.0043	18.50%	0.0230	B
C4	0.0223	0.0079	0.0413	0.0040	17.81%	0.0224	C
C3	0.0221	0.0085	0.0390	0.0041	18.77%	0.0223	D
C6	0.0221	0.0076	0.0360	0.0042	19.24%	0.0223	D
C5	0.0220	0.0064	0.0399	0.0038	17.27%	0.0222	D
C7	0.0216	0.0053	0.0385	0.0045	20.75%	0.0218	E
C9	0.0211	0.0072	0.0346	0.0042	19.81%	0.0212	F
C8	0.0211	0.0076	0.0327	0.0039	18.35%	0.0214	F
C10	0.0206	0.0066	0.0360	0.0044	21.64%	0.0210	G
C11	0.0205	0.0030	0.0376	0.0058	28.41%	0.0210	GH
C13	0.0204	0.0071	0.0354	0.0044	21.76%	0.0200	H
C14	0.0199	0.0051	0.0348	0.0046	23.14%	0.0198	I
C12	0.0198	0.0029	0.0377	0.0054	27.39%	0.0204	I
C15	0.0195	0.0029	0.0376	0.0061	31.38%	0.0201	J
C16	0.0190	0.0032	0.0355	0.0055	29.04%	0.0197	K
C18	0.0189	0.0025	0.0364	0.0061	32.51%	0.0193	K
C17	0.0186	0.0023	0.0364	0.0061	32.98%	0.0194	L

PROM: promedio. MIN: valor mínimo. MAX: valor máximo. DESVEST: desviación estándar. CV\_PROM: coeficiente de variación del promedio. MEDIAN: mediana.

Se observa que el valor promedio y la mediana son similares para todas las subcuencas, lo cual señala que el promedio es un parámetro adecuado para caracterizar la tendencia central de los datos. Acompañado de esto, se observa que el coeficiente de variación de la media no supera el 35%, lo que sugiere que los datos por subcuenca no son altamente variables, como se muestra en la Figura 77.



**Figura 77. Histograma de erodabilidad de suelo por subcuenca del área de estudio.**

Con base en este análisis se determinó si existen diferencias significativas de erodabilidad de suelo por subcuenca, mediante un análisis de varianza y posteriormente se empleó la prueba de comparación de media de Tukey para obtener el ordenamiento relativo de las subcuencas con relación a la magnitud de K. Los resultados se muestran en la Figura 78.

Es de anotar que los valores obtenidos del factor k, son concordantes con estudios similares llevados a cabo por Rivera (2010), Ramírez (2009) entre otros.

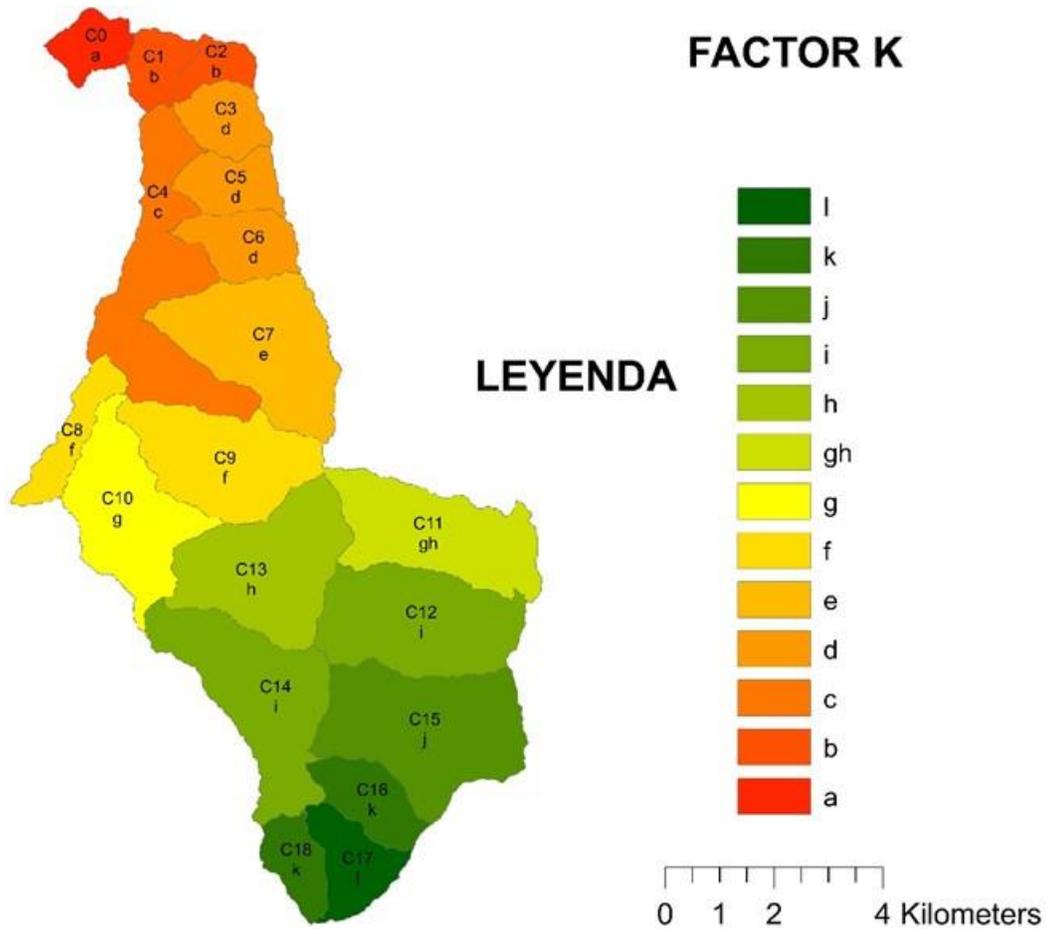


Figura 78. Clasificación de subcuencas con relación a factor K modelado. Las letras iguales representan subcuencas que no difieren estadísticamente en sus valores de K.

Se observa que, en la escala de color, los tonos rojos simbolizan subcuencas con valores promedio más alto para erodabilidad de suelo y los tonos verdes, subcuencas con menores promedios de K. Es de anotar, que el modelo en su desarrollo trata las variables en forma independiente, pero existen interacciones entre ellas que no se deben olvidar, es así como los menores valores de K podrían estar relacionados con el tipo cobertura de la tierra y uso, los aportes de materia orgánica y su tasa de descomposición debido a la actividad de los organismos del suelo, la cual depende de la temperatura ambiental y edáfica, en conjunto estas relaciones inciden en el desarrollo de la estructura, su grado de desarrollo y tipo, la cual a su vez afectara la permeabilidad.

En conclusión, el sector de la cuenca Navarco presenta características edáficas bastante buenas que tienden a que los procesos erosivos no sean tan fuertes, visto en forma aislada, la parte baja del río presenta los mayores valores para el factor K, y es allí donde se aprecia una mayor actividad agrícola, donde las prácticas de laboreo pueden estar afectando a la estructura. Además, las condiciones de temperatura, más cálidas favorecen la mayor actividad biológica en el suelo, lo que promueve la mineralización, y la pérdida de materia

orgánica; lo anterior afecta la porosidad y la permeabilidad, lo cual se refleja en el valor de K.

Para el proyecto se realizaron 145 observaciones de cajuelas, en donde, además de describir en su totalidad cada una de ellas hasta una profundidad de 125 cms, se hizo, también para cada una, la recolección de muestra de los primero 30 cm, con el fin de ser enviadas al Laboratorio Nacional de Suelos para realizar los análisis de distribución de tamaño por partícula, carbono orgánico, estabilidad estructural y densidades aparente y real. Estos datos son requeridos para obtener el índice de erodabilidad o factor K. En la Figura 79, se muestra la distribución de las observaciones en campo.

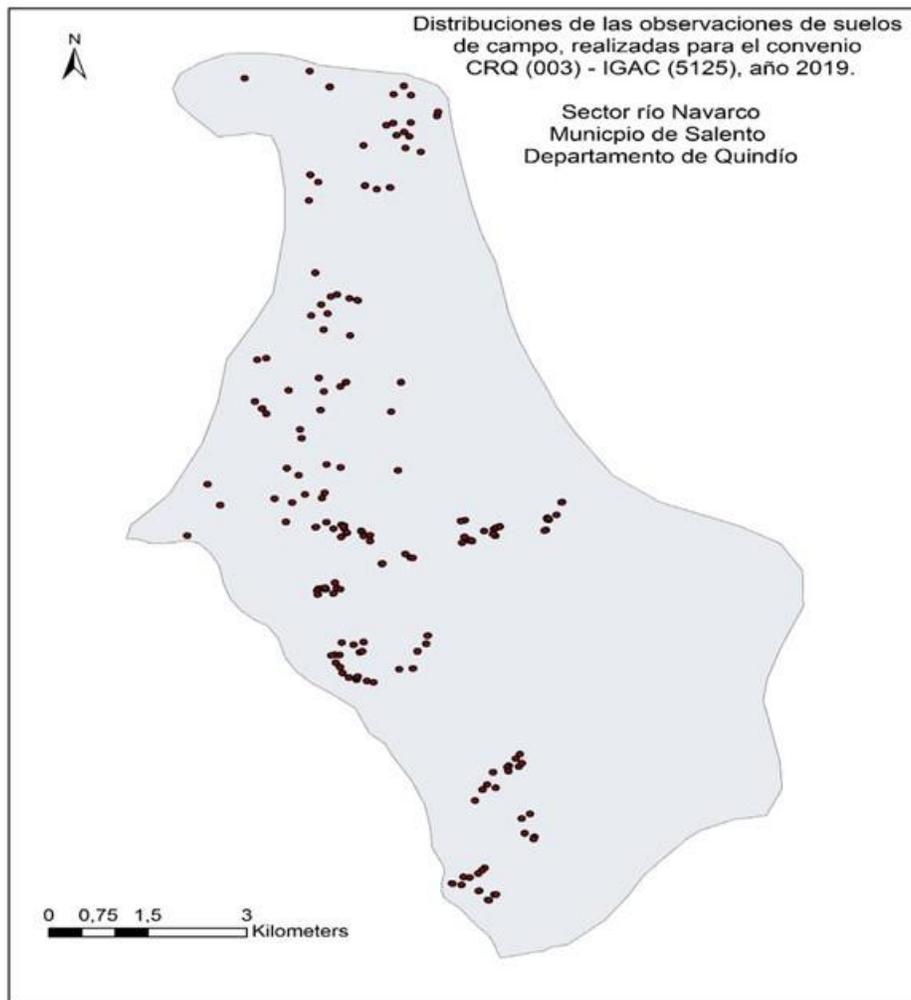


Figura 79. *Distribuciones de las observaciones de suelos de campo*

---

**4.4. MODELO DE PÉRDIDA DE SUELO.  
FACTOR C – COBERTURA DE LA  
TIERRA Y SU GRADO DE PROTECCIÓN.  
Proyecto Navarco**

---

Subdirección de Agrología

---

Ruben Darío Romero Hernández

Juan Ricardo Mancera Flórez

---

#### 4.4.1. FACTOR C (Coberturas y su grado de protección)

En este componente se propone un procedimiento basado en información de sensores remotos para calcular el valor del factor C empleando como insumo las coberturas de la tierra incluido en la ecuación universal de pérdida de suelo, modelo USLE, que permita optimizar los tiempos para determinar la susceptibilidad a la pérdida de suelo. Para esto el procedimiento planteado consiste en:

- Generar los índices de vegetación normalizados NDVI que servirán como insumo para agrupar y cuantificar los valores de la variable C en la ecuación USLE.
- Realizar la interpretación vectorial de coberturas de la tierra que me permitirá agrupar los valores de NDVI generados con la información digital lo que permitirá restringir los valores a una unidad de cobertura específica cuya certeza es mayor ya que procede del resultado de una interpretación visual.
- Realizar la compilación de valores del factor C planteada por diferentes autores para poder calibrar el modelo y ajustar los valores atípicos.
- Realizar los análisis de correlación entre el NDVI y el factor C de la ecuación USLE.
- Establecer, validez y ajustar un proceso metodológico, con alto grado de certeza, que permita en fases posteriores definir valores de factor C a partir de imágenes de sensores remotos que cumplan con la condición de poseer información de longitudes de onda del infrarrojo y rojo que serán los que nos permitirán calcular el NDVI.

##### 4.4.1.1. Aspectos conceptuales a considerar

En los últimos años se han planteado múltiples métodos y enfoques orientados a calcular la susceptibilidad a la pérdida del suelo en diferentes partes del mundo, por lo general estos métodos comúnmente se han basado en el análisis de factores antrópicos y naturales, como: Tipo suelos, cobertura y uso de la tierra, geomorfología, clima, pendiente y prácticas agrícolas, variables que inciden directamente en la afectación de los suelos en cuanto a pérdida y degradación. A pesar de las variaciones que se han planteado en diferentes enfoques y metodologías de cara a calcular la erosión hídrica, la metodología USLE se ha mantenido vigente a lo largo del tiempo.

La ecuación básica del modelo USLE fue publicada en el número 282 de la revista *agriculture handbook* del departamento de agricultura de los estados unidos por Wischmeier y Smith en 1965, y hasta la fecha se ha conservado su fórmula básica en las revisiones posteriores. (Lianes, 2008) y como tal la variable C de coberturas se ha basado en estos estudios y en los valores posteriores extrapolados debido a que para poder evaluar las tasa de pérdida y su relación con las coberturas de la tierra resulta complejo.

De tal forma la ecuación USLE se expresa, como:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Siendo:

**A**, es la pérdida del suelo en t/ha. año

**R**, es el factor erosividad de la lluvia

**K**, es el factor de erosionabilidad del suelo

**L**, es el factor de longitud del terreno

**S**, es el factor de pendiente del terreno

**C**, es el factor de cobertura y manejo de la vegetación

**P**, es el factor prácticas de conservación

De acuerdo con (Varela, 1982) el objetivo de la ecuación es caracterizar por separado cada variable y traducir su efecto a un número tal que, cuando los valores calculados sean multiplicados entre si se pueda obtener la cantidad de suelo perdido.

De acuerdo con múltiples autores esta ecuación ha demostrado su versatilidad para determinar la pérdida de suelo por erosión hídrica, aunque existen ciertas limitaciones relacionadas con la generación de datos confiables para realizar los cálculos además de la dificultad para obtener información de campo con los niveles de detalle necesarios para validar la confiabilidad de los mismos.

### Factor C

De acuerdo con (Wischmeier y Smith, 1978) el factor C asociado a las coberturas de la tierra, entre ellas cultivos y áreas naturales, por definición se establece como la relación de pérdidas de una cobertura en condiciones específicas, con respecto al volumen pérdida de un suelo desnudo y con barbecho continuo en las mismas condiciones de suelo, pendiente y lluvia. Es decir que en términos prácticos el factor C cuantifica el efecto de la cobertura vegetal y su relación con la pérdida de suelo.

Para el propósito de este estudio es necesario saber que valores establecidos a la variable C están agrupados en un rango entre 0 a 1, siendo los valores cercanos a cero el indicador de mayor protección del suelo por consiguiente mayor protección al impacto de la fuerza cinética de las gotas de lluvia y por ende de la acción de la escorrentía superficial, por otro parte al acercarse estos valores a 1, la incidencia de las gotas de lluvia es mayor y en consecuencia menor es la protección contra la acción erosiva.

Es importante resaltar que en Colombia no se cuenta con información confiable para determinar los valores tomados por C, de hecho, no se han realizado evaluaciones de parcelas experimentales que permitan concluir y contratar con datos confiables, varios años de seguimiento, las medidas de la perdida de suelo en parcelas de erosión, debido a este inconveniente la determinación de C se hace a partir de valores tabulados según se trate

de cultivos o vegetación forestal y en muchos casos no existe información sobre coberturas específicas lo que obliga a determinar valores de forma empírica con tendencia cualitativa y no cuantitativa. Es importante resaltar que Wischmeier y Smith, (1978), publicaron numerosas tablas del factor C por tipos de cultivo, etapas de desarrollo y sistemas de manejo, así como una tabla para la vegetación de gramínea-arbustal y otra para bosques (Barrios, 1995) a los cuales se han venido sumando datos de otros autores tales como: Mora, I. 1987; Gómez, 2002; Marchalo, 2004; entre otros.

Aunque estas tablas de vegetación comprenden un alto número de coberturas vegetales, presentan la dificultad de que algunas coberturas de relevancia para el país no se encuentran incluidas, además también se tiene el conflicto metodológico de que estas tablas han sido construidas para otros países principalmente Estados Unidos y México, por lo que sus valores no corresponden exactamente a la realidad de los valores de C para Colombia.

Debido a estos problemas y al alto costo económico para determinar los valores de C mediante parcelas experimentales de erosión, han llevado a algunos autores a proponer que se utilice el NDVI para el cálculo de dicha variable, al determinar que existe una relación directa entre el volumen de biomasa, la densidad y el estado fitosanitario de las unidades de vegetación con el factor C.

El NDVI se basa en el comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionando la actividad fotosintética y la estructura foliar de la planta, permitiendo determinar la vigorosidad de la vegetación. (Díaz, 2015); siendo muy útil también para separar la vegetación del brillo que produce el suelo desnudo (Rouse et al., 1974). En general esta información se obtiene de la siguiente expresión:

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{VIS}) / (\text{PIR} + \text{VIS}), \text{ siendo:}$$

Donde:

NDVI= Índice normalizado de diferencias de vegetación

PIR= Banda infrarrojo cercano

VIS= Banda rojo visible

Con la aplicación de esta ecuación se genera una imagen con valores normalizados entre 1 y -1, donde los valores cercanos a 1 representan vegetación vigorosa muy densa, mientras que los valores tendientes a -1 indican regiones con escasa o nula vegetación (Pacheco, et al 2014).

Pacheco, afirmó que el NDVI se correlaciona con el factor C de la ecuación universal de la pérdida del suelo (USLE) a través de un ajuste polinomial, obteniendo valores del factor C que presentan una correspondencia alta con la realidad observada en la imagen original y el chequeo de campo. Es decir el NDVI resulta ser un buen indicador de la distribución espacial de la cobertura vegetal y se puede correlacionar con el factor C, a través de una expresión matemática de alta precisión (Pacheco, 2014).

#### 4.4.1.2. Desarrollo Metodológico

De acuerdo con el contexto conceptual antes mencionado se plantea para el caso de la cuenca del Río Navarco realizar el ejercicio de establecer el factor C a través de la correlación directa entre el NDVI (Índice normalizado de vegetación) ajustando los datos con la recopilación de valores planteados en los diferentes estudios y con información obtenida empleando aplicaciones tecnológicas nuevas de datos reales en campo. En la Figura 80 se esquematiza el procedimiento para obtener el factor C a partir de información de sensores remotos con subpuntos como el NDVI o el EVI.

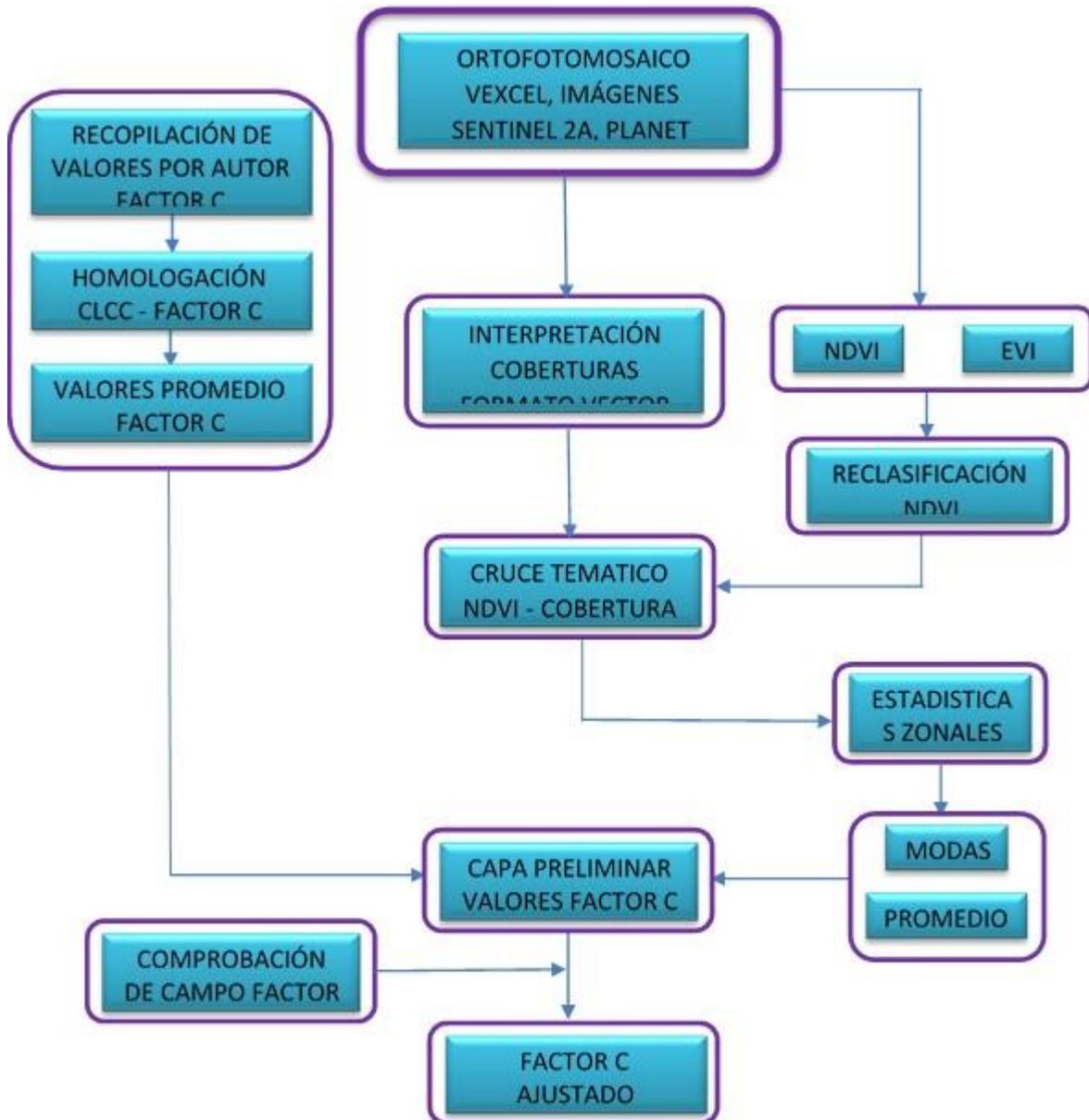


Figura 80. Flujo de proceso para la obtención del factor C.

Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019

#### 4.4.1.3. Obtención y Procesamiento de la Información Digital

El punto de partida para la construcción de un modelo ajustado del factor C es sin lugar a dudas la obtención de información digital precisa y fiable, lo más cercano a la realidad posible, ya que este componente lleva implícitas múltiples complicaciones debido a la variabilidad espacio-temporal.

Para el inicio del proceso se obtienen imágenes ópticas de dos sensores en particular, la ortofoto de la cámara Vexcel Ultracam con 50 cm de resolución e imágenes de drone suministradas por la Subdirección de Cartografía del IGAC de agosto de 2019. Para estas imágenes obtenidas pasaron por un proceso de corrección atmosférica, radiométrica, topográfica y finalmente ortorectificación, adicional a esto, se buscó que las imágenes presenten el menor porcentaje de nubes posible puesto que este factor puede alterar los valores espectrales ocasionando variaciones en los resultados.

Para el periodo 2019 la imagen presentó dos problemas primero que no hubo cubrimiento total del área de trabajo lo que obligo a generar el modelo para calcular el factor C con un NDVI parcial. La solución para este problema fue extrapolar datos obtenidos en las zonas de cubrimiento a las coberturas donde no había información.

La selección de imágenes empleadas para la obtención del NDVI a escala 1:10.000 pueden ser de múltiples sensores, que va desde imágenes de satélite ópticas hasta fotografías aéreas; en la Tabla 44 se relacionan los insumos empleados, pero el punto importante de la selección de imágenes radica en su propósito dual, ya que permitió realizar la interpretación visual de las coberturas de la tierra y al mismo tiempo que se generaron los índices de vegetación empleados posteriormente para hacer la correlación del factor C.

Tabla 44. *Lista de insumos principales empleados*

SENSOR	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN ESPECTRAL	RESOLUCIÓN RADIOMETRICA
<b>Vexcel Ultracam D</b>	50 cm	(R, G, B, NIR)	12 bits
<b>Drone</b>	50 cm	(R, G, , Red Edge IR)	16 bits
<b>Spot 6</b>			
<b>Sentinel 2A</b>	10 m	(R, G, B, IR)	16 bits

Fuente. Subdirección de Cartografía, IGAC 2019. ESA European Space Agency, 2019.

Después de realizar los procesos correctivos y de ajuste espacial de las imágenes estas quedan listas para iniciar el flujo de trabajo que conduce a la obtención de los valores de factor C de USLE.

#### 4.4.1.4. NDVI o EVI

Para la obtención de los datos normalizado de vegetación es posible emplear dos índices, el índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI o el Índice de Vegetación Mejorada EVI, el primero es el más conocido y aplicado en el mundo pero presenta algunas limitaciones, el segundo es un NDVI mejorado que se basa en la fisonomía de las especies y además corrige o atenúa la saturación por densidad de la vegetación y las distorsiones por efectos atmosféricos. Debido a que el EVI presenta un rango de valores diferente se tomó la decisión de trabajar con el NDVI.

Con las imágenes ópticas ya procesadas se inició un flujo de trabajo paralelo en el cual por un lado se generó el NDVI y simultáneamente se realizó la interpretación visual de las coberturas la cual se explica en términos generales más adelante. Esta fase de interpretación es muy importante ya que permitirá calibrar y agrupar con precisión los valores en el NDVI.

Este proceso se buscó clasificar a través del índice los diferentes estados de las coberturas vegetales para poder inferir más adelante el grado de protección que estas tienen sobre los suelos.

En cuanto a los índices de vegetación la metodología para generar el insumo es la convencional donde el NDVI me da la opción de identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar tanto su estado sanitario como distribución espacial.

El cálculo se realiza en formato raster consecuente con la imagen fuente en donde se realiza la operación aritmética entre bandas para hallar la diferencia normalizada entre la banda del rojo (R) y del infrarrojo cercano (NIR). La fórmula a continuación define el procedimiento el cual se puede desarrollar en cualquier software con opciones de algebra de mapas. Este procediendo se llevó a cabo en el software de ArcGis en la herramienta de ModelBuilder aplicando la siguiente ecuación. En la Figura 81 se presenta el proceso para la obtención del índice.

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

Dónde:

NIR= banda 5

R= banda 4

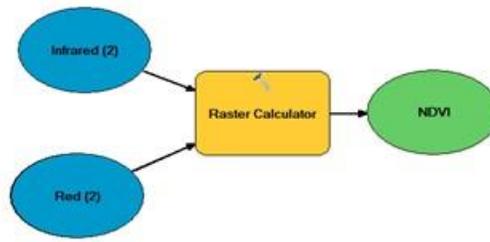


Figura 81. *ModelBuilder de ArcGis para calcular NDVI. Fuente. Esri, 2019.*

De acuerdo con Gilabert (Gilabert, González-Piqueras, & Haro-García., 1997), esta fórmula se basa en el hecho de que cerca del 90% de la información vegetal obtenida por un sensor óptico, está contenida en las bandas del rojo y el infrarrojo cercano donde los valores de reflectancia son más significativos en estas longitudes de onda. Bajo esta premisa se generó la información de NDVI que se observa en la Figura 82. Como se puede apreciar existen algunas zonas irregulares producto de complementar el modelo con información de apoyo del sensor Sentinel.

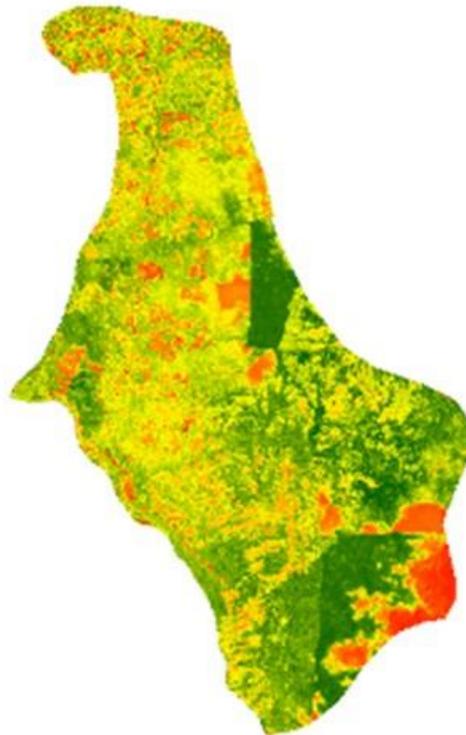


Figura 82. *NDVI de la cuenca del Río Navarco. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019.*

Por otra parte el EVI nos permite detectar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial basada en densidad y área folia además corrige

factores atmosféricos y de suelo y se vuelve un complemento importante para el NDVI ya que permite calibrar con más precisión los datos generados dado que a mayor crecimiento de la planta el valor de saturación por reflectividad en el índice es mayor llegando al punto de no evidenciar cambios significativos después de que las plantas alcanzan cierto nivel de desarrollo. Debido a que para el cálculo de este factor se requerían bandas adicionales con las que los sensores empleados no contaban se resolvió no utilizar este índice, pero se menciona en este documento ya que a futuro puede ser una herramienta valiosa en este tipo de estudios. En la Figura 83 a continuación se describe gráficamente y forma esquemática el proceso de obtención de índices normalizado para la detección de coberturas y su incidencia en la pérdida de suelo.

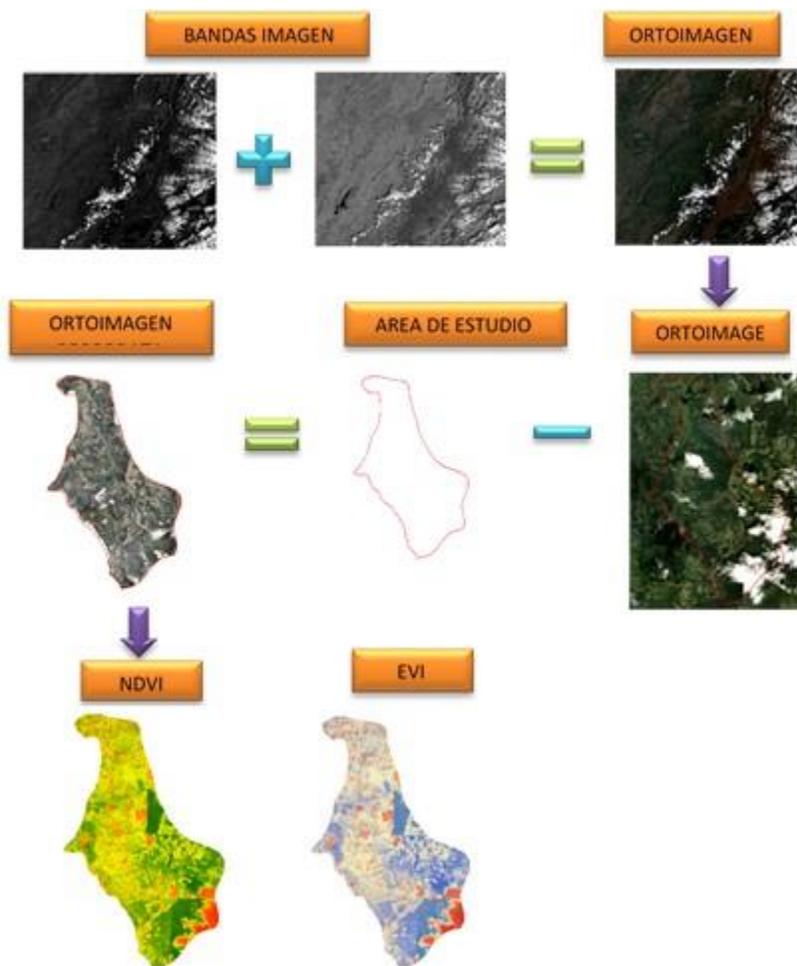


Figura 83. Flujo de proceso para cálculo de NDVI de la cuenca del Río Navarco Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019.

#### 4.4.1.5. Reclasificación NDVI

En esta etapa del proceso se buscó agrupar por clases de cobertura los diferentes valores espectrales que refleja la vegetación de acuerdo a la información obtenida en la capa de

NDVI que se obtuvo de la cuenca, para poder realizar posteriormente la correlación entre este índice y las coberturas.

Para este fin se toma la capa de NDVI y ajusta su clasificación nativa a una escala de enteros positivos, esta parte es muy importante ya que de esto depende la generación de estadísticas zonales para poder correlacionar el factor C.

En cuanto al procedimiento es básicamente reclasificar el NDVI extrapolando los valores de -1 a 1 en 256 valores acorde con la escala de grises para cumplir con la condición de entero positivo. Este procedimiento se puede realizar por medio de algebra de mapas de manera relativamente fácil aplicando condicionales a través de una sentencia de como se muestra en el ejemplo.

Dim d As Decimal = -0.23493

Dim s As Integer = Math.Sign(d)

```
Select Case s
  Case -1 ' Negativo
  Case 0 ' Es cero
  Case 1 ' Es positivo
End Select
```

En la Figura 84 a continuación se ilustra el procedimiento para el tratamiento de los datos raster de NDVI que se debe cruzar posteriormente con la información vectorial de interpretación de coberturas.

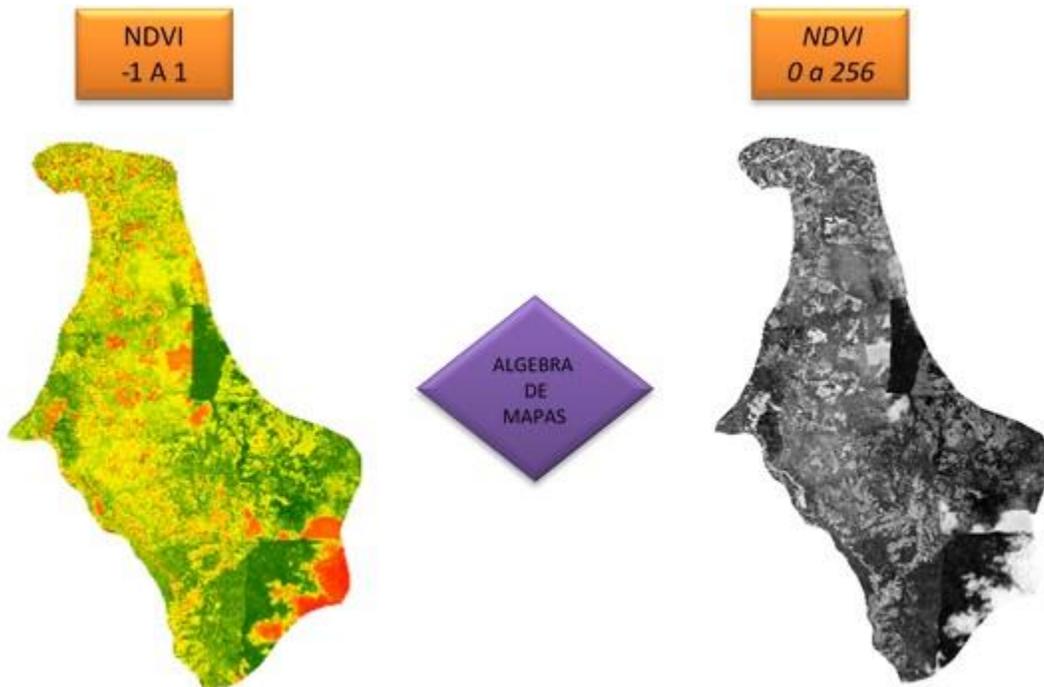


Figura 84. Flujo de proceso para cálculo de NDVI de la cuenca del Río Navarco. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019.

#### 4.4.1.6. Interpretación De Coberturas De La Tierra

En esta etapa se desarrollan las actividades y pautas a seguir para el proceso de identificación de coberturas de la tierra, basada en la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, la cual fue mencionada en el numeral 3.1.5 de este documento, para este fin se emplea la metodología adapta por el IGAC “ELABORACIÓN DEL MAPA DE COBERTURA DE LA TIERRA ESCALA 1:10.000”, que se encuentra en la fase de revisión para ser publicada en el Sistema de Gestión Integrado (SGI) en las cuales se fundamentará la labor del grupo de interpretación de coberturas de la tierra designado para el proyecto. Esta metodología es acorde con el trabajo realizado en el 2010 por el IGAC para el levantamiento de coberturas de la tierra del departamento del Quindío. En la Figura 85 se explica el flujo de trabajo para la obtención de la capa vectorial de coberturas.

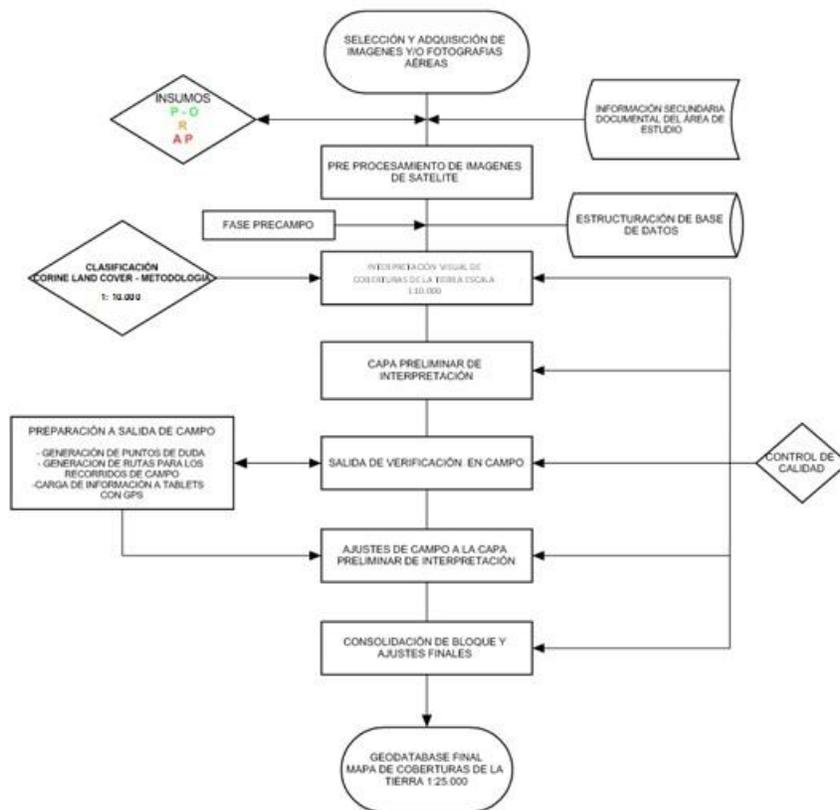


Figura 85. Flujo de trabajo para la generación del mapa de coberturas de la tierra. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019.

#### 4.4.1.7. Cruce Temático Coberturas Vs NDVI

En esta etapa del proceso se agruparon de forma precisa los píxeles obtenidos con valores digitales del NDVI que espacialmente coincidían con las coberturas vectoriales interpretadas. Este proceso ayudó a restringir el sesgo por efecto de borde de la información raster y permitió poder identificar a través de valores promedio y modas la representatividad de cada cobertura expresada en el NDVI.

Como información adicional para ser más preciso en los modelos se podría agrupar estos valores y realizar múltiples comparaciones en diferentes periodos de tiempo pueden obtener un dato de NDVI histórico representativo por cobertura que se podría asociar directamente con el factor C de la ecuación USLE y que estadísticamente nos arrojaría valores más fiables permitiendo así más adelante establecer con cierto grado de certeza valores de NDVI puntuales para cada cobertura sin tener que emplear nada más que una imagen de satélite.

#### 4.4.1.8. Estadísticas Zonales

En este paso lo que se buscaba era poder verificar los valores estadísticamente más representativos del NDVI asociados a cada cobertura para que en la fase final en el proceso se pudiera calificar, comparar y ajustar de acuerdo a los valores del factor C tabulados. El proceso se hace de forma automática basado en la capa de NDVI que al ser cruzada con los vectores de coberturas podemos restringir el número de píxeles a cada unidad interpretada. En la Figura 86 a continuación se muestra la capa combinada por cobertura.

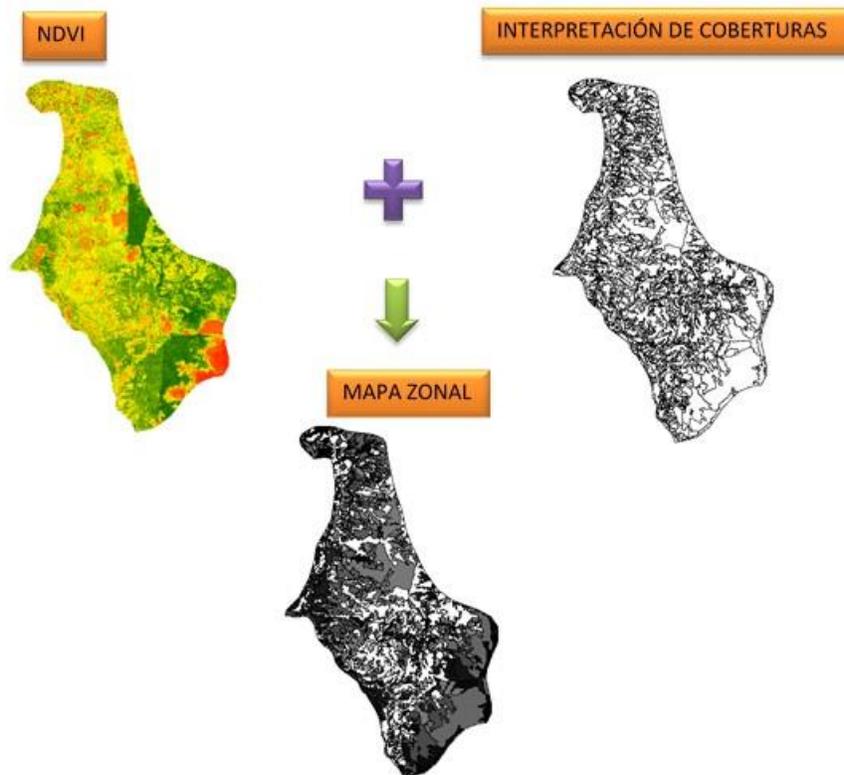


Figura 86. Flujo de trabajo estadísticas zonales. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019.

## **Factor C Tabulado**

Esta etapa del proceso consistió en hacer una compilación y revisión por autor de las múltiples calificaciones de las unidades de cobertura expresadas en el valor del factor C de la ecuación USLE que permitiera obtener un dato promedio como referencia sin tener que realizar todo el proceso de campo para llegar a la calificación de cada una de las coberturas de la tierra. Es importante destacar que muchas de las coberturas que existen en el país aún no han sido caracterizadas por tanto fue necesario ajustar o extrapolar las tablas de factor C a este tipo de unidades.

A pesar de la amplia búsqueda de valores para alimentar las tablas de datos es necesario resaltar que esta se puede ampliar de manera constante con nuevos trabajos relacionados y que los datos promedio de referencia del factor C pueden variar cada vez que se incorpore nueva información.

Se pudo revisar y compilar la información aproximadamente de 20 autores, pero se aclara que es necesario una revisión más profunda sobre todo a nivel de estudios de posgrado.

## **Asignación De Valores**

Después haber generado la información cartográfica y de haber confirmado los valores estadísticos del factor de coberturas se procedió a realizar la unión de tablas a través de un join entre los atributos de la capa zonal producto de la unión entre (coberturas y NDVI) y la tabla de calibración de valores del factor C obtenida de la revisión bibliográfica.

En esta instancia se generó un mapa preliminar de factor C el cual se llevó a campo para evaluar y comparar en terreno algunos resultados.

## **Prácticas De Manejo**

Esta etapa es complementaria al proceso y va ligada a la fase de campo, proceso que busca ajustar el factor C incorporando un valor de peso a la cobertura desde las prácticas de manejo que se puedan asociar a las mismas ya que este elemento me permitiría deducir más adelante si la cobertura está siendo efectiva como agente protector del suelo o no. Debido a las escasas cultura de prácticas de manejo que se da en el país variable se asume como un factor de castigo a la ecuación y no se incorporó al modelo en esta instancia porque lo que se buscaba con este ejercicio era poder establecer si el NDVI era suficiente para calcular un valor aproximado del factor C e incorporar calificaciones de prácticas de manejo podría alterar los resultados del planteamiento inicial.

## **Comprobación De Campo**

En esta fase se procedió a capturar la información para realizar la comparación con entre la información obtenida en terreno y el mapa clasificado a partir del NDVI. Para el ejercicio se utilizaron dos aplicaciones móviles que me permitieran obtener datos de altura promedio de las coberturas y su densidad.

La aplicación Arboreal se empeló para calcular los valores promedio de alturas, esta fue muy útil especialmente en plantaciones debido a la facilidad y rapidez con que se obtenía el dato, pero en la medida que la topografía y la densidad de la cobertura era más compleja, en especial las naturales, la obtención del dato se hacía más difícil. De todas maneras, se optó por cuestiones de tiempo, en tomar estos valores en al menos una de los 43 tipos de unidad de cobertura presentes en el área de estudio.

La segunda aplicación utilizada fue Canopeo la cual se obtuvo información valiosa de la densidad de las coberturas ya que la aplicación por medio de una fotografía tomada a la unidad definía en porcentaje la densidad, dato que posteriormente nos permitió comparar con las tablas planteadas por Wischmeier y Foster (1975), citadas en el documento POMCA de la Cuenca del Rio Totare por (CORTOLIMA, 2013). En la Figura 87 se observan el procedimiento para obtener un ejemplo del proceso para obtener la información recolectada.

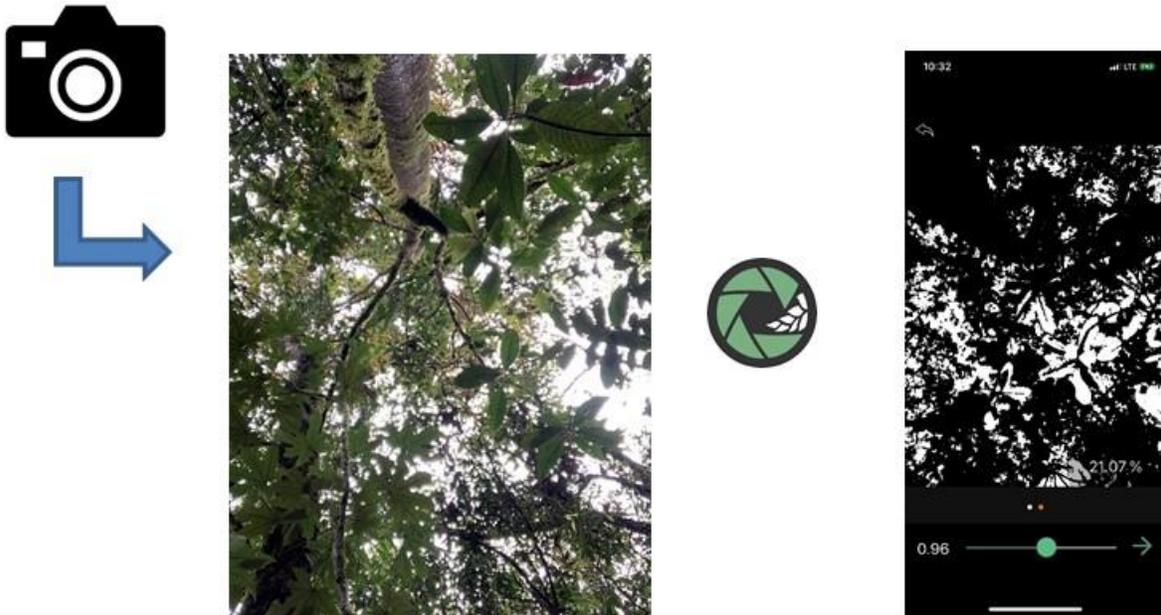


Figura 87. Flujo de toma de la información con la app Canopeo. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019.

Posteriormente el valor obtenido se incorpora al shapefile de recolección de la información en campo para calibrar la cobertura asociada al factor C.

#### 4.4.1.9. Resultados

Para el cálculo del factor C en la temporalidad 2009 se empleó un método basado en revisión bibliográfica obteniendo los valores a partir de la información recopilada de múltiples autores que tratan este tema, por tal razón se observa en la Figura 88, valores relativamente altos que puede sobre afectar la ecuación USLE completa sobreestimando el resultado.

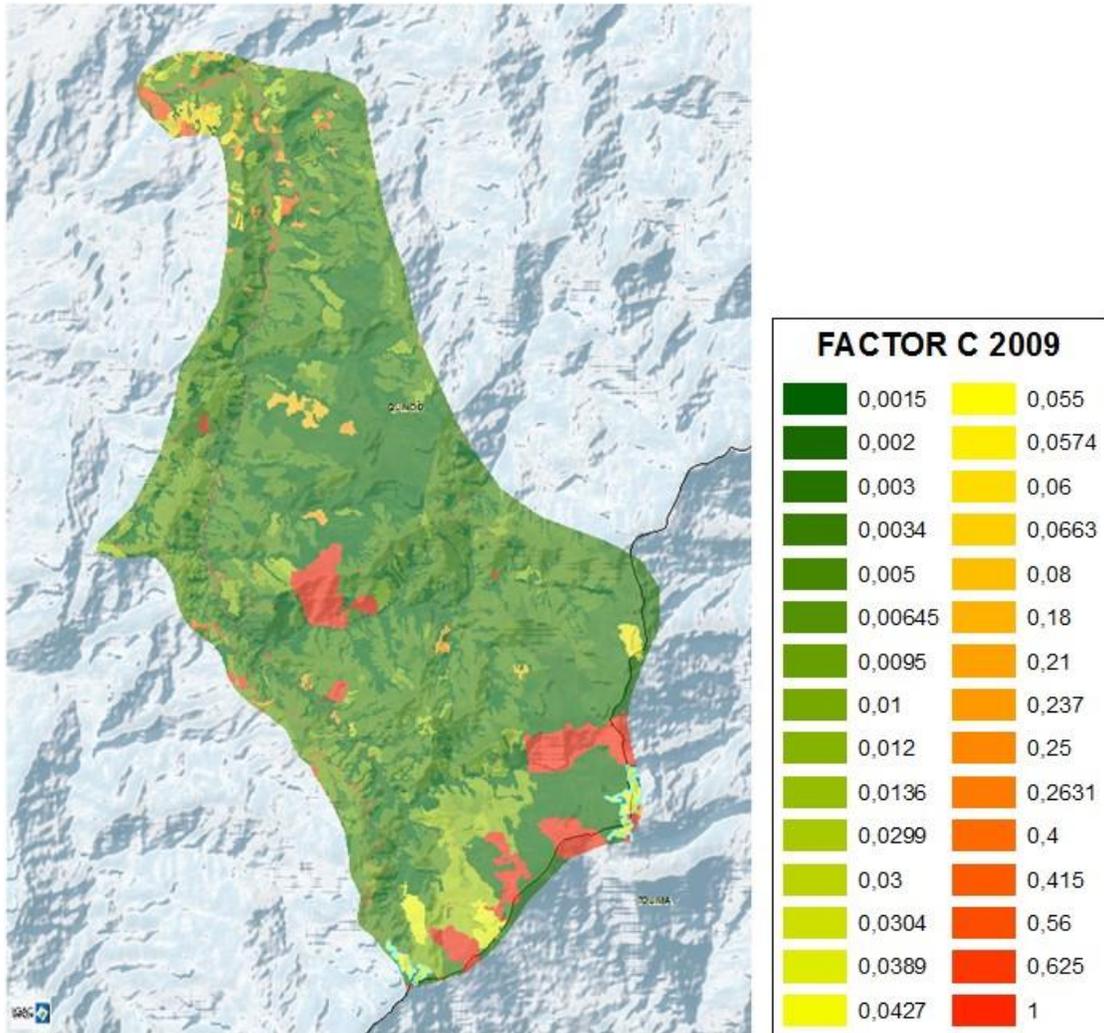


Figura 88. Valores de factor C para el periodo 2009. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019.

Pensando en el caso presentado para el 2009 se replanteo el método y se propuso un modelo basado en NDVI, como se describe en el marco metodológico, para el periodo 2019. Un modelo matemático es aquel que en alguna forma describe el comportamiento de una variable aleatoria de interés; parte de la relación de una variable dependiente y una o varias variables independientes. El modelo lineal es el más simple de todos ya que involucra solo una variable independiente, luego encontramos los modelos lineales múltiples que involucran más de una variable, seguidamente encontramos los modelos polinomiales de

segundo orden los cuales se caracterizan porque una de sus variables independientes se encuentra expresada como una potencia (Martínez, 2011; Salas, 2002).

Uno de las metodologías más usadas en modelos matemáticos es el análisis de regresión que utiliza la relación entre dos o más variables cuantitativas, de esta manera se pueden predecir una variable en función de otra u otras (Martínez, 1997). En este método estadístico se habla de Modelo I o modelo fijo, cuando los valores de X son seleccionados de antemano y el Modelo II o aleatorio, que aparece cuando los valores de X son tomados aleatoriamente; el Modelo II es útil cuando se habla de correlación (Tapias, 1995).

La variable de interés se conoce como variable dependiente y se denota como Y, un subíndice ( $Y_i$ ) identificara una unidad particular donde se tomó una determinada observación. Otras variables que aportan información sobre el comportamiento de la variable dependiente y que se incorporan al modelo como variables predictoras o explicativas se conocen con el nombre de variables independientes y se denotan mediante ( $X_i$ ) con subíndices que son necesarios para identificar las diferentes variables independientes (Martínez, 2011).

En el análisis de regresión comúnmente se pretenden tres propósitos principales que son descripción, control y predicción; de acuerdo al objetivo de cualquier estudio o investigación en particular se puede hacer énfasis en alguno de ellos, en dos o en todos a la vez (Martínez, 1997).

Generalmente los modelos de regresión se encuentran de la siguiente forma:

modelo lineal 
$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon$$

modelos lineales múltiples 
$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i + \varepsilon$$

modelos polinomiales 
$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \varepsilon$$

Donde:

$Y_i$  = Es el valor de la variable respuesta o dependiente en el ensayo i-esimo.

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$  = Son los parámetros del modelo o coeficientes de regresión respectivamente.

$X_i$  = Es una(s) constante(s) conocida(s). Referida a el valor de la(s) variable(s) independiente(s) en el ensayo i-esimo.

$\varepsilon$  = Corresponde al error aleatorio. (Martínez, 1997)

Para el caso particular de este estudio, se planteó un modelo de correlación, donde la variable dependiente es el factor “C” teórico y el índice de vegetación normalizado NDVI tomado como variable predictor. Para cada cobertura fue asignado un valor de factor C teórico. Con la información del NDVI se calcularon los estadísticos zonales para cada

cobertura; para luego establecer el modelo de correlación entre estas variables. El valor del coeficiente de correlación obtenido es  $r = -0.84$ , presentando una correlación significativa negativa, donde a menor valor de NDVI mayor valor de factor C.

En la Figura 89 se muestra esta correlación lineal junto al modelo y los parámetros obtenidos.

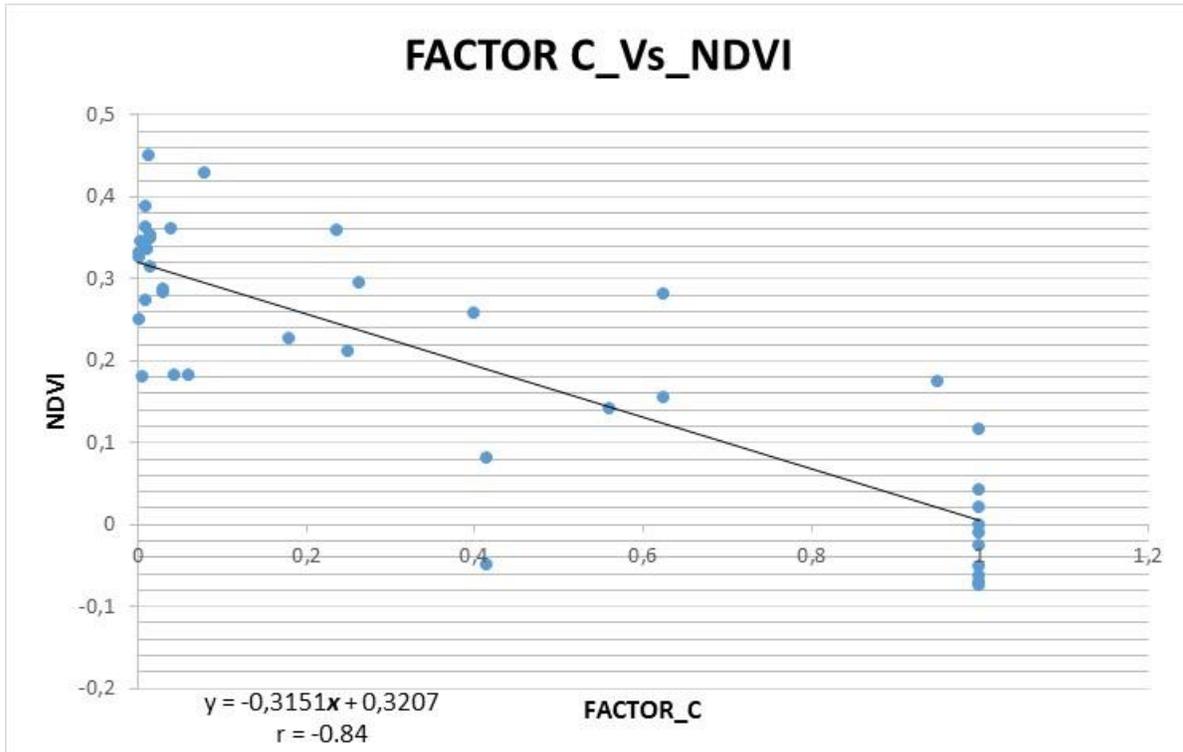


Figura 89. Correlación Factor C – NDVI. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019.

#### 4.4.1.10. Limitaciones y Alcances del Modelo

El modelo obtenido para estimar el factor C en función del NDVI, presenta valores atípicos, debido a que el índice NDVI presenta valores negativos, y en relación al F\_C teórico y el valor calculado por el modelo, se obtuvieron valores sobrestimados. Los valores mínimos y máximos teóricos para las coberturas de la zona de estudio son 0.0015 y 1 respectivamente, así mismo los valores mínimos y máximos del F\_C calculado por el modelo son 0.17 y 0.34, valores.

Para obtener valores más ajustados de F\_C teóricos implementaron los coeficientes de efecto de suelo desnudo, matriz de raíces finas de los Árboles y reconsolidación del suelo, en suelos no labrado planteados por Wissmeyer y Foster, (1982), para cada cobertura como se muestra en la Tabla 45.

Tabla 45. *Coefficientes de efecto de suelo desnudo Wissmeyer y Foster, (1982)*

COBERTURA	AJUSTAE T2179	COBERTURA	AJUSTAE T2179	COBERTURA	AJUSTAE T2179
99	0.0050	2235	0,138	22110	0.1920
231	0,011	3141	0,005	22122	0.0200
232	0,079	3142	0,045	22221	0.0700
233	0,005	3143	0,068	22222	0.1030
241	0,182	3144	0,02	22223	0.0380
242	0,92	3153	0,049	31111	0.0140
332	1	3221	0,005	31121	0.0030
333	1	3222	0.1680	31211	0.0060
511	1	3231	0.0340	31221	0.0050
2133	0,07	3232	0.0170	31511	0.0490
2213	0,168	3312	1	31521	0.0490
2226	0,168	3331	1	321111	0,011
2228	0,168	12115	1	321113	0,017

Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019.

Una vez aplicados estos coeficientes al modelo obtenido anteriormente se obtuvieron valores de F\_C más cercanos a los valores teóricos con una correlación del  $r=0.88$ , como se observa en la Figura 90.

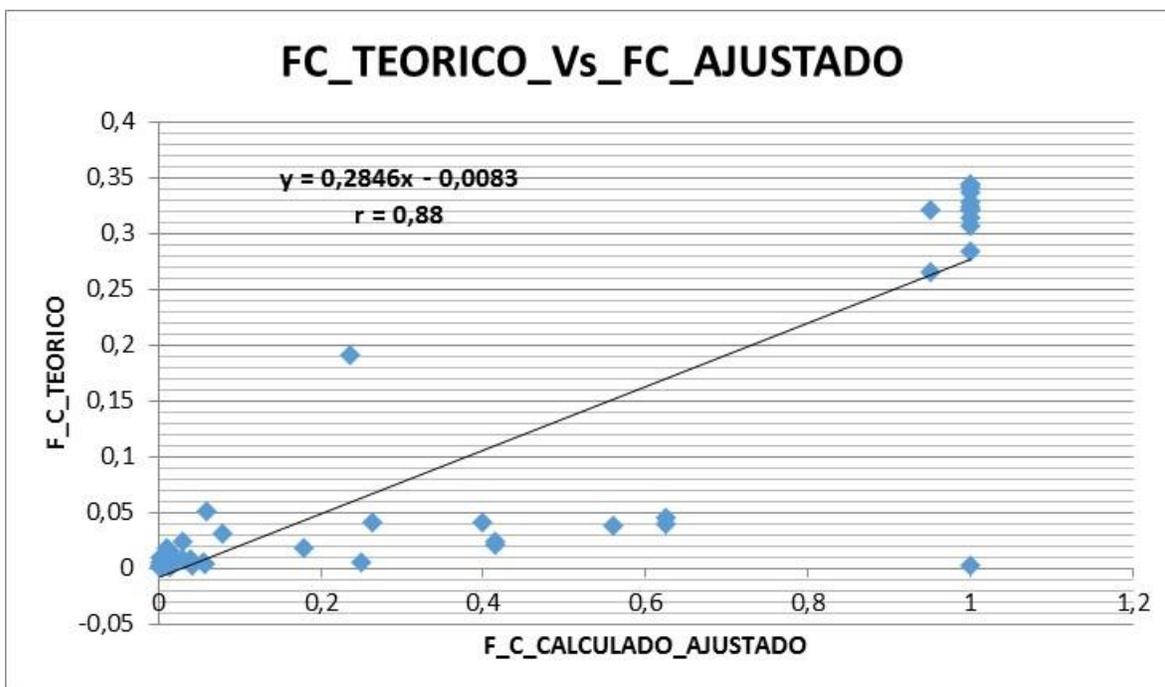


Figura 90. *Correlación Factor C teórico Vs Ajustado*

En resumen el factor C calculado para el periodo 2019 presenta valores más cercanos a cero lo que sugeriría cifras moderadamente razonables a la hora de correr el modelo completo de la ecuación universal de pérdida de suelo. En la Figura 91, observamos la espacialización del factor y los valores correspondientes a cada cobertura.

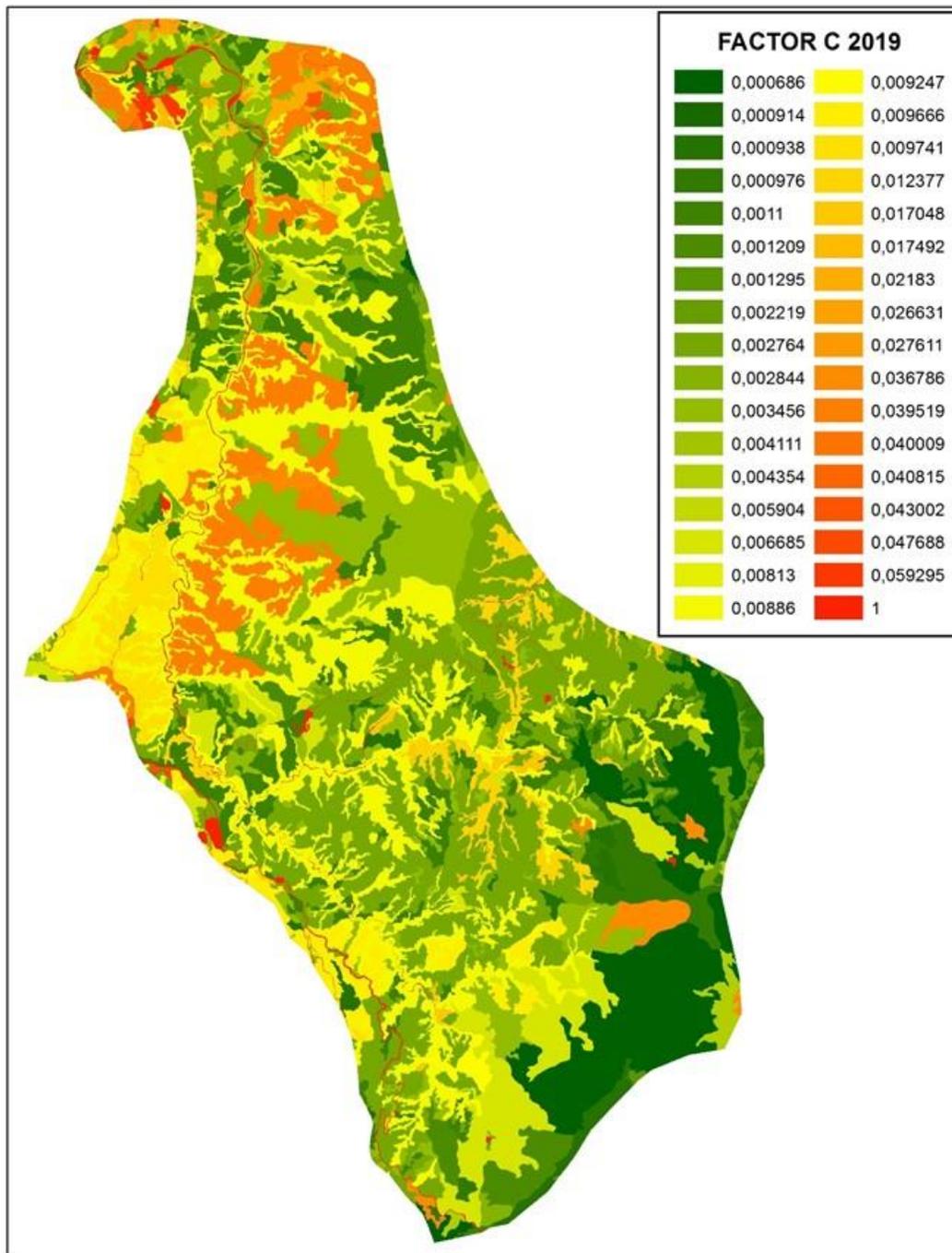


Figura 91. Valores de factor C para el periodo 2009. Fuente. Grupo interno de Coberturas de la tierra, Subdirección de Agrología IGAC, 2019.

---

**4.5. MODELO DE PÉRDIDA DE SUELO.  
FACTOR P – PRÁCTICAS DE  
CONSERVACIÓN. Proyecto Navarco**

---

Subdirección de Agrología

---

Héctor Jaime López Salgado

---

#### 4.5.1. Factor P (prácticas de conservación)

El factor prácticas de manejo (P), se utiliza para reflejar el impacto de prácticas agrícolas de carácter conservacionista tendientes a defender al suelo frente a las condiciones que pueden degradarlo por erosión, estas prácticas se conocen genéricamente como: Prácticas agronómicas y mecánicas de conservación de suelos, donde las primeras son de más fácil implementación y de costos más bajos.

Por ejemplo, el empleo de labranza siguiendo las curvas de nivel (cultivo en contorno) es tal vez lo más aplicable para la zona, dado que las plantaciones se establecen siguiendo en general las curvas de nivel. Su efectividad, disminuye el grado de pendiente del terreno y también la longitud de la ladera de erosión, adicionalmente el efecto protector es mayor si apilan los residuos de la cosecha y podas siguiendo el mismo patrón, el uso de cultivos o coberturas en fajas, también son coadyuvantes en la protección de las zonas de ladera.

La determinación de este factor se realiza por observación directa en la zona estudio, las prácticas en general son pocas las que se observan, En la cuenca baja no se aprecian practicas evidentes, los cultivos en contorno son pocos. El caso de las tierras dedicadas al aguacate, en los estadios iniciales de desarrollo en que se encuentran (en general menos de 3 años de iniciadas las plantaciones), aunque están sembrando en contorno su beneficio se espera sea satisfactorio en el mediano plazo, caso similar ocurre con las tierras bajo coberturas de bosques plantados, en las tierras dedicadas a la ganadería no existen prácticas y por ultimo las coberturas naturales este factor no se considera.

En Colombia son muy pocos estudios relacionados con la determinación del factor P, y se considera un poco aventurado asignar valores sin mayor sustento, Wischmeyer (1978) (Tabla 46), plantean algunos valores asociados a la pendiente, donde se puede observar que el beneficio de las prácticas de conservación es menor a medida que la pendiente aumenta, llevándolo a valores cercanos a 1

Con base en lo observado y comentado en párrafo anterior, cuando las prácticas de conservación no se aplican o no han realizado ninguna medida para protección de la erosión o son muy pocas, el valor de P es igual a 1.

Pendiente (%)	Cultivo en contorno o curvas de nivel		P para cultivo en terrazas
	P*	Longitud máxima de ladera (m)	
1 - 2	0,60	122	0,12
3 - 5	0,50	91	0,10
6 - 8	0,50	61	0,10
9 - 12	0,60	37	0,12
13 - 16	0,70	24	0,14
17 - 20	0,80	18	0,16
21 - 25	0,90	15	0,18

Tabla 46. Valores de P. Fuente Wischmeyer (1978), citado por Mancilla 2008

---

## 5. ANÁLISIS PROCESOS EROSIVOS. Proyecto Navarco

---

### Subdirección de Agrología

---

Joan Sebastián Gutiérrez Díaz

Edwin Francisco Grisales Camargo

Camilo Andrés Camacho Hilarión

Héctor Jaime López Salgado

---

## 5.1. ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA POTENCIAL DE SUELO POR EROSIÓN (USLE) POR SUBCUENCA

El análisis de la distribución espacial de la pérdida potencial de suelo por erosión, obtenida del modelo USLE se realizó mediante estadísticas zonales agregadas por las subcuencas de la zona de estudio, previamente delimitadas. Se delimitaron 19 subcuencas y con base en esta delimitación se calcularon medidas descriptivas para cada subzona, como se muestra en la Tabla 47.

Tabla 47. *Estadísticas zonales de la pérdida potencial de suelo por erosión por subcuencas delimitadas en el área de estudio.*

CUENC A	PRO M	MIN	MA X	DESVE S T	CV_PROM	MEDIAN	Post Hoc Analysis_USLE
C2	20.01	0.086	200	24.0	119.7%	15.64	A
C3	16.47	0.006	200	23.0	139.5%	7.45	B
C10	13.22	0.003	200	33.6	254.1%	4.64	C
C4	12.78	0.005	200	28.1	219.6%	4.55	D
C9	8.57	0.004	200	12.6	147.5%	4.51	D
C8	9.38	0.036	200	30.2	321.8%	3.88	E
C7	7.08	0.013	200	12.7	179.0%	3.23	F
C0	17.97	0.014	200	43.5	242.3%	2.92	G
C1	13.40	0.013	200	39.0	290.9%	2.61	H
C5	6.97	0.045	200	16.4	236.0%	2.54	H
C14	8.59	0.005	200	30.3	352.1%	2.31	I
C16	3.61	0.014	200	11.3	314.1%	2.10	J
C13	6.68	0.008	200	23.7	354.6%	2.03	K
C18	7.80	0.009	200	28.9	370.9%	1.81	L
C17	3.67	0.002	200	13.1	357.9%	1.69	M
C15	4.78	0.002	200	12.6	264.0%	1.47	N
C6	4.45	0.006	200	9.9	222.4%	1.47	N
C11	4.13	0.003	200	16.7	403.9%	1.46	N
C12	4.49	0.005	200	15.7	350.7%	1.33	O

PROM: promedio. MIN: valor mínimo. MAX: valor máximo. DESVEST: desviación estándar. CV\_PROM: coeficiente de variación del promedio. MEDIAN: mediana.

Se observan diferencias marcadas entre la media y la mediana para todas las subcuencas, lo cual señala que el promedio podría no ser un dato representativo de cada subcuenca para una posterior comparación; por esta razón, se consideró comparar las medianas, ya que son medidas de tendencia central más estables ante valores extremos. Acompañado de esto, se observa que el coeficiente de variación de la media supera el 100% en todos los casos, sugiriendo la presencia de valores extremos.

En este caso el análisis de varianza para detectar diferencias significativas en pérdidas potenciales de suelo por erosión se llevó a cabo con las medianas por subcuenca y posteriormente se realizó la comparación de estas medianas para determinar el ordenamiento relativo de subcuencas con relación a la variable evaluada, pérdida potencial de suelo. Los resultados se muestran en la Figura 92.

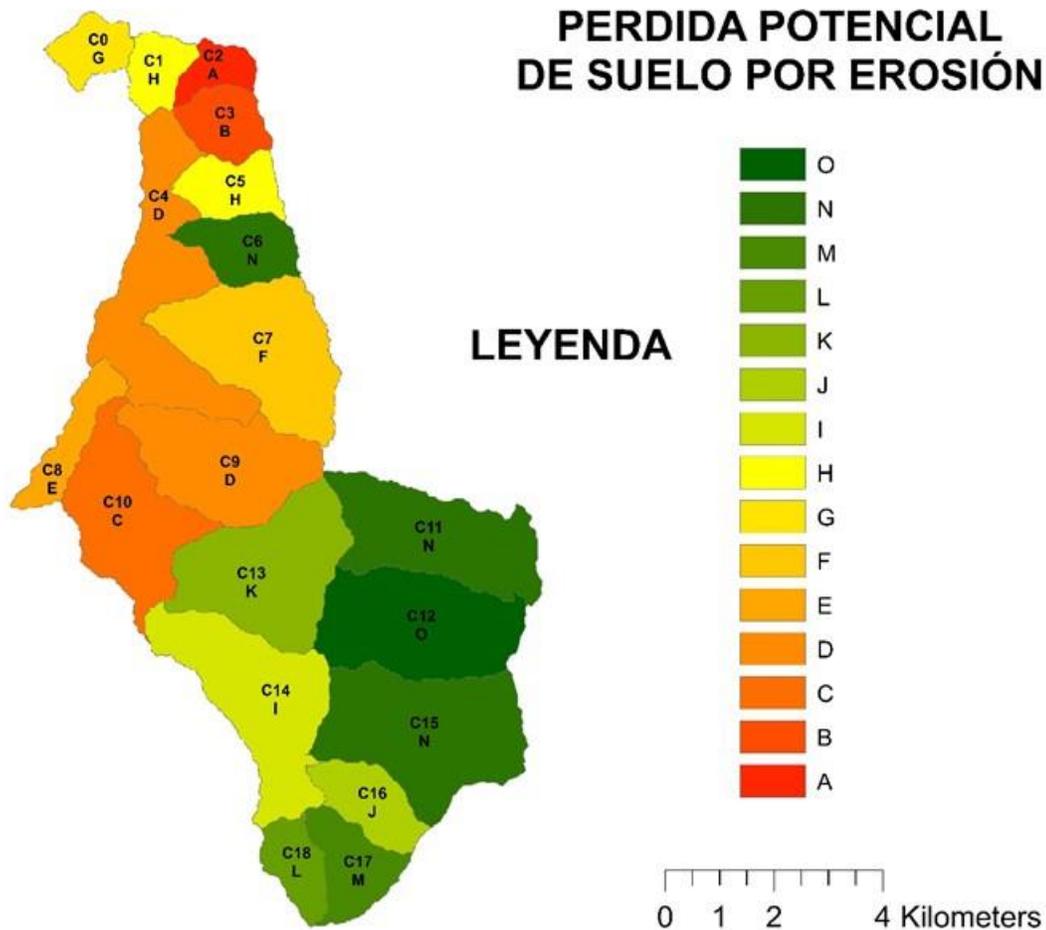


Figura 92. Clasificación de subcuencas con relación a pérdida potencial de suelo por erosión. Las letras iguales representan subcuencas que no difieren estadísticamente.

## 5.2. ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA POTENCIAL DE SUELO POR EROSIÓN (USLE) POR CLASE DE EROSIÓN

Los resultados de los procesos erosivos obtenidos, por los métodos indirectos, como lo es la fotointerpretación la cual, aunque revisten algún grado de subjetividad, permiten realizar aproximaciones hacia la tipificación y clasificación de los procesos erosivos y de remoción

en masa, con posibilidad de proponer en el futuro programas y actividades dirigidas a la corrección de los problemas identificados.

El análisis de la pérdida potencial de suelo y su relación con las clases de erosión determinadas por fotointerpretación, se realizó mediante el cálculo de estadísticas descriptivas por clases delimitadas. Los resultados se muestran en la Tabla 48.

Se observan diferencias marcadas entre la media y la mediana para todas las clases, lo cual señala que el promedio podría no ser un dato representativo para una posterior comparación; por esta razón, se consideró comparar las medianas, ya que son medidas de tendencia central más estables ante valores extremos.

El análisis de varianza para detectar diferencias significativas en pérdidas potenciales de suelo por erosión se llevó a cabo con las medianas por clase identificada y posteriormente se realizó la comparación de estas medianas para visualizar la correspondencia del modelo USLE con lo interpretado a partir de imágenes satelitales.

Tabla 48. ***Pérdida potencial de suelo por erosión de acuerdo a clases determinadas mediante fotointerpretación.***

CLASE	PROM	MIN	MAX	DESVEST	CV_PROM	MEDIAN	Post Hoc Analysis_USLE
TERRITORIOS ASOCIADOS A RED VIAL	146.07	0.10	200.00	65.36	44.7%	184.15	A
TERRACEO LAMINAR Y	14.64	0.00	200.00	19.86	135.7%	8.64	B
CARCAVAS LAMINAR Y	61.44	0.13	200.00	88.60	144.2%	5.13	C
SURCOS	13.19	0.01	200.00	28.81	218.4%	4.73	C
SIN EVIDENCIA	6.26	0.00	200.00	16.54	264.3%	3.29	D
AFLORAMIENTO ROCOSO	2.62	0.02	9.62	1.83	69.7%	2.07	E
TERRACEO CARCAVAS Y	11.23	0.01	200.00	29.47	262.5%	2.04	E
TERRACEO	4.19	0.00	200.00	17.10	408.4%	1.52	F
LAMINAR	8.01	0.01	200.00	29.28	365.8%	1.44	G

Las letras iguales representan subcuencas que no difieren estadísticamente.

Los valores medianos más altos de pérdida potencial de suelo se relacionaron con territorios asociados a redes viales donde el suelo para el modelo USLE está expuesto, este no se considera en el análisis por ser una cobertura no agropecuaria, en el caso del terraceo y laminar definido por fotointerpretación se encuentra una relación coincidente, y los valores más bajos se relacionaron con zonas de erosión laminar. Es de notar que las clases combinadas definidas por fotointerpretación igualmente muestran pérdidas de suelos en el modelo USLE.

Cabe considerar el comportamiento de la pérdida de suelo por clase y por subcuenca, por lo tanto, se presentan en la Tabla 49, las estadísticas agregadas de la variable objetivo por subcuenca y clase de erosión identificada.

Tabla 49. **Pérdida potencial de suelo por erosión de acuerdo a clases determinadas mediante fotointerpretación, en cada subcuenca de la zona de estudio.**

CUENCA_CLASE	PROM	MIN	MAX	DESVEST	CV_PROM	MEDIAN	Post Hoc Analysis_USLE
C11_CARCAVAS	103.390	0.132	200	99.499	96.24%	200.000	A
C10_TERRITORIOS ASOCIADOS A RED VIAL	153.410	0.100	200	59.542	38.81%	193.555	A
C14_TERRITORIOS ASOCIADOS A RED VIAL	52.400	0.174	200	64.765	123.60%	28.593	A
C9_TERRACEO CARCAVAS Y	29.725	3.411	114.61	14.393	48.42%	27.749	A
C3_TERRACEO LAMINAR Y	28.746	0.061	200	25.112	87.36%	26.053	A
C4_TERRACEO CARCAVAS Y	24.368	2.160	200	16.297	66.88%	23.678	A
C2_TERRACEO LAMINAR Y	26.095	0.156	200	25.497	97.71%	22.812	A
C5_TERRACEO	24.281	0.063	200	27.257	112.25%	22.742	A
C3_TERRACEO CARCAVAS Y	23.575	1.853	56.71	10.592	44.93%	21.746	A
C9_CARCAVAS	34.437	0.927	200	47.981	139.33%	20.694	A
C6_TERRACEO	17.581	0.095	56.05	16.492	93.81%	20.045	A
C9_TERRACEO LAMINAR Y	18.991	0.004	200	13.152	69.26%	18.898	A
C7_TERRACEO LAMINAR Y	15.878	0.037	199.21	13.396	84.37%	16.838	A
C10_TERRACEO LAMINAR Y	17.198	0.003	200	19.855	115.44%	16.773	A
C10_TERRACEO CARCAVAS Y	19.984	0.294	200	31.257	156.41%	15.849	A
C2_LAMINAR SURCOS Y	16.022	0.217	200	15.791	98.56%	14.965	A
C2_SIN EVIDENCIA	18.494	0.249	200	22.741	122.97%	12.655	A
C1_LAMINAR SURCOS Y	10.409	0.014	200	15.763	151.45%	7.932	A
C4_TERRACEO LAMINAR Y	13.823	0.036	200	17.996	130.19%	7.416	A
C4_LAMINAR SURCOS Y	10.372	0.524	200	29.193	281.46%	5.945	A
C3_SIN EVIDENCIA	7.455	0.056	200	13.686	183.57%	5.121	A
C0_SIN EVIDENCIA	7.983	0.040	200	16.169	202.54%	4.791	A
C8_CARCAVAS	53.516	0.316	200	85.830	160.38%	4.782	A
C14_SIN EVIDENCIA	8.767	0.024	200	24.218	276.24%	4.740	A
C10_LAMINAR SURCOS Y	5.055	0.028	200	10.796	213.57%	4.717	A
C9_SIN EVIDENCIA	6.885	0.021	200	10.821	157.17%	4.717	A
C13_CARCAVAS	74.677	0.279	200	94.538	126.60%	4.554	A
C10_SIN EVIDENCIA	6.973	0.004	200	19.015	272.69%	4.464	A
C13_SIN EVIDENCIA	9.181	0.040	200	24.566	267.58%	4.433	A

C4_SIN EVIDENCIA	6.978	0.020	200	16.157	231.55%	4.261	A
C8_SIN EVIDENCIA	7.225	0.036	200	20.957	290.05%	4.248	A
C1_SIN EVIDENCIA	6.239	0.176	200	15.704	251.72%	4.208	A
C8_LAMINAR	4.658	0.160	156.93	6.521	140.00%	4.122	A
C8_LAMINAR SURCOS Y	7.876	0.201	200	26.851	340.93%	3.880	A
C14_CARCAVAS	4.021	0.843	9.99	2.393	59.52%	3.864	A
C0_LAMINAR SURCOS Y	15.669	0.014	200	34.060	217.38%	3.590	A
C5_SIN EVIDENCIA	5.478	0.045	200	9.533	174.01%	3.539	A
C7_SIN EVIDENCIA	5.689	0.014	200	12.207	214.56%	3.205	A
C15_AFLORAMIENTO ROCOSO	3.335	0.017	8.41	1.884	56.49%	3.183	A
C4_TERRACEO	12.619	0.005	200	16.484	130.63%	3.125	A
C0_TERRACEO LAMINAR Y	7.006	0.163	200	21.332	304.48%	3.085	A
C0_TERRACEO	3.729	0.346	200	16.091	431.51%	2.369	B
C6_SIN EVIDENCIA	4.784	0.032	200	10.191	213.02%	2.180	C
C3_TERRACEO	13.751	0.057	200	24.016	174.65%	2.152	C
C16_SIN EVIDENCIA	3.638	0.014	200	11.354	312.08%	2.124	C
C8_TERRACEO CARCAVAS Y	6.594	0.283	200	24.371	369.60%	2.071	C
C18_SIN EVIDENCIA	6.763	0.009	200	22.019	325.58%	2.038	CD
C17_LAMINAR SURCOS Y	64.283	0.175	200	91.624	142.53%	2.007	CDE
C1_TERRACEO CARCAVAS Y	2.319	0.808	13.95	1.535	66.18%	1.987	DE
C15_TERRACEO	2.159	0.024	200	4.047	187.46%	1.935	DE
C16_TERRACEO	2.697	0.212	200	8.084	299.75%	1.920	E
C5_TERRACEO LAMINAR Y	6.269	0.053	200	17.385	277.31%	1.893	E
C5_LAMINAR	23.912	0.867	200	51.466	215.23%	1.893	EF
C4_LAMINAR	9.680	0.014	200	29.349	303.20%	1.871	EF
C11_TERRACEO CARCAVAS Y	10.833	0.071	200	39.936	368.66%	1.858	EF
C15_TERRACEO CARCAVAS Y	2.242	0.059	25.03	2.119	94.54%	1.815	EF
C18_TERRACEO	9.204	0.042	200	36.143	392.69%	1.766	EF
C17_SIN EVIDENCIA	3.260	0.002	200	9.376	287.64%	1.728	F
C1_TERRACEO	8.609	0.237	200	30.145	350.16%	1.702	F
C14_TERRACEO CARCAVAS Y	8.646	0.012	200	34.332	397.09%	1.675	F
C17_TERRACEO LAMINAR Y	1.796	0.077	8.38	1.047	58.29%	1.661	F
C12_TERRACEO CARCAVAS Y	2.353	0.235	105.66	5.437	231.09%	1.659	F
C2_TERRACEO	2.983	0.131	21.48	3.733	125.11%	1.614	F
C12_TERRACEO	2.214	0.005	200	5.973	269.82%	1.601	F

C1_TERRACEO LAMINAR	Y	7.960	0.044	200	28.292	355.43%	1.591	F
C12_TERRACEO LAMINAR	Y	1.569	0.317	7.33	0.756	48.20%	1.591	F
C14_TERRACEO		5.656	0.005	200	26.252	464.14%	1.545	F
C11_TERRACEO		2.529	0.011	200	10.847	428.95%	1.526	F
C11_AFLORAMIENTO ROCOSO		1.556	0.027	9.62	1.062	68.27%	1.520	F
C8_TERRACEO LAMINAR	Y	6.465	0.036	200	20.472	316.63%	1.447	F
C18_TERRACEO LAMINAR	Y	1.457	0.249	3.82	0.620	42.56%	1.432	FG
C13_TERRACEO		2.944	0.008	200	12.954	440.09%	1.420	FG
C13_TERRACEO CARCAVAS	Y	1.589	0.135	14.13	1.365	85.90%	1.320	GH
C3_LAMINAR		6.962	0.006	200	26.770	384.53%	1.244	GHI
C14_LAMINAR		31.193	0.068	200	71.304	228.59%	1.237	GHI
C10_LAMINAR		8.473	0.042	200	33.717	397.95%	1.235	GHI
C9_TERRACEO		2.129	0.007	200	6.651	312.44%	1.223	GI
C2_LAMINAR		22.047	0.086	200	58.750	266.48%	1.204	GIJ
C10_TERRACEO		4.523	0.071	200	22.362	494.42%	1.200	GIJ
C18_TERRACEO CARCAVAS	Y	11.561	0.044	200	42.103	364.17%	1.150	HIJ
C15_SIN EVIDENCIA		5.142	0.002	200	13.385	260.31%	1.114	IJ
C11_SIN EVIDENCIA		4.783	0.003	200	14.766	308.69%	1.087	J
C9_LAMINAR SURCOS	Y	1.215	0.074	5.33	0.653	53.75%	1.063	J
C1_LAMINAR		6.820	0.013	200	27.059	396.77%	1.032	J
C7_TERRACEO		3.440	0.013	119.97	8.039	233.70%	0.995	J
C11_TERRACEO LAMINAR	Y	1.107	0.026	2.38	0.733	66.27%	0.945	JK
C12_SIN EVIDENCIA		5.947	0.010	200	19.461	327.26%	0.926	JK
C14_TERRACEO LAMINAR	Y	7.865	0.013	200	34.203	434.88%	0.908	JK
C6_LAMINAR		2.395	0.129	46.35	6.152	256.84%	0.885	JKL
C17_TERRACEO		1.254	0.043	8.38	1.376	109.66%	0.804	JKL
C13_TERRACEO LAMINAR	Y	1.283	0.050	11.77	1.300	101.38%	0.795	KL
C13_LAMINAR SURCOS	Y	0.811	0.067	4.93	0.633	78.07%	0.780	L
C0_LAMINAR		10.031	0.014	200	35.570	354.61%	0.766	L
C9_LAMINAR		1.776	0.126	17.25	2.346	132.11%	0.718	L
C6_TERRACEO LAMINAR	Y	0.795	0.006	46.10	1.501	188.66%	0.593	M
C13_LAMINAR		3.213	0.032	200	21.291	662.73%	0.583	M
C7_TERRACEO CARCAVAS	Y	0.331	0.101	0.80	0.224	67.67%	0.282	N
C17_LAMINAR		26.874	0.026	200	70.290	261.55%	0.157	N

Las letras iguales representan subcuencas que no difieren estadísticamente.

Lo anterior resulta útil para relacionar el comportamiento del modelo USLE con la erosión foto interpretada, por subcuenca, observando que la subcuenca 17, localizada al sur del área de estudio, presentó los valores medianos más bajos de pérdida de suelo, en zonas en las que se identificó erosión laminar.

Los valores más altos de pérdidas potenciales de suelo se relacionaron con zonas identificadas como cárcavas, localizadas en la subcuenca 11.

Los modelos USLE/MUSLE siguen estando limitados a procesos de erosión laminar y en surquillos, y no sirven para calcular erosión ocasionada por flujo concentrado en cárcavas y cauces de ríos ni para estimados de erosión generados por movimientos en masa. Rodríguez (2009) (Tabla 50).

Tabla 50. **Calificación de la pérdida potencial de suelos. Sector río Navarco**

<b>Pérdida de suelo (t/ha-1.año-1)</b>	<b>Calificación de pérdida</b>
Menor de 10	Ligera
10 a 25	Baja
26 a 50	Moderada
51 a 100	Alta
Mayor de 100	Muy alta

Fuente Pérez. S. (2001). Citado por. Castro (2017).

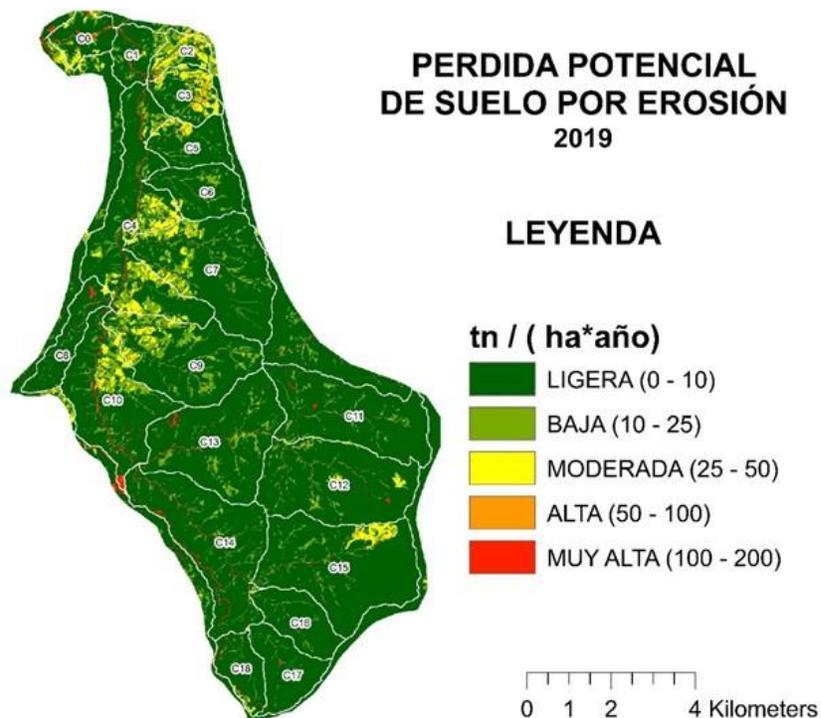


Figura 93. **Perdida potencial de suelo por erosión 2019.**

En la Figura 93 se observa que la pérdida de suelo con valores inferiores a  $10 \text{ t/ha} \cdot \text{año}^{-1}$  es lo común para la zona de la cuenca del río Navarco en análisis. La pérdida potencial de suelo en la zona del río Navarco, varía de ligera baja, al utilizar los rangos de calificación propuestos por Castro (2017), para la zona cafetera del departamento del Quindío.

En el sector central se evidencia un grado mayor que alcanza el concepto de moderada, Las categorías altas y muy altas se encuentran dispersas, muy localizadas hacia los drenajes y ocupan poca extensión. Se resalta que las pendientes dominantes son e y f (25 a 75%), favorecen la ocurrencia a la erosión, al igual que factor R agresividad de la lluvia en el rangos de moderado, con valores que van de 6.000 a 7.000  $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1}$ , Factor K que es erodabilidad o susceptibilidad de los suelos a la erosión con valores bajos y cobertura dominante en pastos y bosque que protegen el suelo, mientras los dos primeros factores propenden por que exista erosión, los dos últimos en contrapeso muestran una buena defensa frente a los dos primeros. Para el análisis no se consideran las prácticas de conservación, ya que su bondad se verá en algunos años, en especial en las zonas que cambian de uso a coberturas perennes.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Flórez, A., (2003). Colombia: evolución de sus relieves y modelados. Bogotá: UNIBIBLOS.
- IDEAM, (2019). Clasificación climática de Caldas - Lang. 2014. Servicio de Mapas Web. Bogotá: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IGAC, (2017). Metodología Elaboración de cartografía geomorfológica aplicada a levantamientos de suelos M401700-02/17.V1. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Subdirección de Agrología.
- IGAC, (2018). Guía Glosario de términos geomorfológicos aplicados a levantamientos de suelos G40700-03/18.V3. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Subdirección de Agrología.
- IGAC, (2018). Guía Interpretación de materiales geológicos a partir de sensores remotos para la cartografía geomorfológica aplicada a levantamientos de suelos G401700-04/18.V1. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Subdirección de Agrología.
- IGAC, (2017). Leyenda de interpretación geomorfológica aplicada a levantamientos de suelos FM40700-01/17.V4. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Subdirección de Agrología.
- SGC, (1984). Geología de la plancha 224 Pereira. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC, (1984). Geología y Geoquímica de la Plancha 224 Pereira. Medellín: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC, (1985). Geología de la plancha 243 Armenia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC, (1985). Reseña Explicativa del Mapa Geológico Preliminar de la Plancha 243 Armenia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC, (1982). Geología de la plancha 244 Ibagué. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

- SGC, (1982). Geología y Prospección Geoquímica de las Planchas 244 Ibagué y 263 Ortega, Departamento del Tolima, Colombia. Ibagué: Servicio Geológico Colombiano.
- Aguilar, M.A. (2002.). Fotointerpretación. Uruguay: Facultad de Ingeniería. Insituto de Agrimensura. Departamento de Geomática.
- Alvarado C, M., Colmenero R, J., Valderrábano, & Luz, M. d. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala, México. Ciencia ergo-sum. Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva [en línea] , 317-326.
- Anaya, G. (1991). Manual de Conservación del suelo y del Agua. Colegio de Postgraduados. México.
- Bergsma, I. E. (1989). Interpretación de fotografías aereas para levantamientos de la erosión y conservacion de suelos. Bogotá.
- Chang, K. T., & Liu, J. K. (2005). Landslide Features Interpreted By Neural Network Method Using A. Taiwan.
- Chuvieco, E. (2010). Teledetección ambiental- Nueva Edición Actualizada. Madrid.
- CIAF. (1981). Levantamientos de cobertura terrestre y uso de la tierra. Bogotá.
- ESRI. (s.f.). <https://www.esri.com>. Recuperado el 02 de 09 de 2019, de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/editing/geodatabase-topology-rules-for-polygon-features.htm>
- FAO, PNUMA, UNESCO. (1980). Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma.
- Fausto Guzzetti, A. C. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. Italia.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update Vol (11). Landslides , 167-194.
- IDEAM. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100000. Bogotá: Scripto Ltda.
- IDEAM. (2014). WMS. Clasificación climática de Caldas - Lang. 2014. Recuperado el 04 de 09 de 2019, de <http://www.ideam.gov.co:geoapps.ideam.gov.co:8080/geoserver/Clima/wms?>
- IDEAM, U.D.C.A. (2015). Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por erosión. IDEAM- MADS-U.D.C.A. Bogotá D.C.
- IDEAM, U.D.C.A. (2015). Síntesis. Estudio nacional de la degradación de suelos por eosión en Colombia . Bogotá D.C.
- IGAC. (2013). Estudio semidetallado de suelos departamento del Quindío. Bogotá.
- IGAC. (2010). Ficha Técnica ortofotomosaico Quindío 1:10000. Bogotá D.C.

- IGAC. (2014). Instructivo. Códigos para los levantamientos de suelos. Bogotá D.C.
- IGAC. (2018). Interpretación de materiales geológicos a partir de sensores remotos para la cartografía geomorfológica aplicada a levantamientos de suelos. Bogotá D.C.
- IGAC. (2005). Interpretación visual de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de cobertura y uso de la tierra . En CIAF. Bogotá D.C.
- IGAC. (2017). Metodología elaboración de cartografía geomorfológica aplicada a levantamientos de suelos. Bogotá D.C.
- McCalpin, J. (1984). Preliminary age classification of landslides for inventory mapping. Proceedings of the 21st Engineering Geology and soils Engineering Symposium. Moscow. University of Idaho.
- Metternicht, G., Hurni, L., & Gogu, R. (2005). Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial system for hazard assessment in mountainous environments. Le Servier - Remote Sensing of Environment 98 , 284-303.
- PMA:GCA. (2007). Publicación Geológica Multinacional, N°4. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas. Movimientos en Masa en la Región Andina: una guía para la evaluación de amenazas.
- QGIS, P. (08 de 08 de 2017). QGIS User Guide Release 2.14. Recuperado el 02 de 09 de 2019, de [https://docs.qgis.org/2.14/es/docs/gentle\\_gis\\_introduction/topology.html](https://docs.qgis.org/2.14/es/docs/gentle_gis_introduction/topology.html).
- Ramirez, F. A. (2010). Riesgo a la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera. CENICAFE Avances Técnicos 60(1) , 58-71.
- Rios, J. (2018). Erosión hídrica y evolución del relieve en las cuencas de los ríos Grande y San Andrés, Antioquia- Colombia. Bogotá D.C.
- Rivera, I. (2007). Procesos erosivos de sectores productivos montañosos en el trópico. Avances Investigación en Ingeniería N°6 , 145-152.
- SGC . (1982). Geología de la Plancha 244 Ibagué. Bogotá.
- SGC. (2004). Cartografía Geológica aplicada a la zonificación geomecánica del departamento del Quindío. Bogotá.
- SGC. (2017). Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. Bogotá D.C. .
- SGC. (1984). Geología de la Plancha 224 Pereira. Bogotá.
- SGC. (2009). Geología de la Plancha 243 Armenia. Bogotá.
- SGC. (1984). Geología y geoquímica de la plancha 224 Pereira Informe 1931. Medellín.
- SGC. (1982). Geología y prospección geoquímica de las planchas 244 Ibagué y 263 Ortega departamento del Tolima Colombia escala 1:100.000. Memoria explicativa. Ibagué.

- SGC. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000. Bogotá D.C.
- SGC. (1985). Reseña explicativa del mapa geológico preliminar plancha 243 Armenia Escala 1 : 100.000. Bogotá.
- SGC. (s.f.). SIMMA Sistema de Información de Movimientos en Masa. Recuperado el 09 de 2019, de REPORTE DE REGISTROS DE INVENTARIO ENCONTRADOS: <http://simma.sgc.gov.co/#/public/results/>
- SGC. (s.f.). SIMMA Sistema de Información de Movimientos en Masa . Recuperado el 09 de 2019, de REPORTE DE REGISTROS DE CATÁLOGO ENCONTRADOS: <http://simma.sgc.gov.co/#/>
- Suarez, J. (1998). Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigación sobre erosión.
- Varela, J. (1982). Notas sobre problemas de erosión y su mapeo. Centro interamericano de fotointerpretación. Unidad de suelos y agricultura.
- Vargas, G. (2000). Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa. Boletín de Geología 22 (37) , 39-55.
- Varnes DJ. R.L. Schuster, & R. (1978). Slope movement types and processes. Special Report 176. Landslides: Analysis and control , 11-33.
- Varnes, D. (1958). Landslides types and procesos, en Ecke, E.b.,ed., Landslides and engineering practice. Special Report 28: Highway Research Board, National Academy of Sciences , 20-47.
- Westen, C. (2013). Guidelines for the generation of 1:50.000 scale landslide inventory, susceptibility maps, and qualitative risk maps, illustrated with case studies of the provinces Thanh Hoa and Nghe An. University of Twente.
- IDEAM. (2008). Manual de Control de Calidad para el Procedimiento de Cobertura de la Tierra. Bogotá.
- IGAC. (2010). Conerturas y Usos de la Tierra del Departamento del Quindio. Bogotá
- IGAC. (2017). Elaboración del mapa de coberturas de la tierra escala 1:25.000. Bogotá. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente, IDEAM & Cormagdalena. (2008). Manual de Control de Calidad para el Procedimiento de Cobertura de la Tierra. Bogotá.
- Vink, A. P. (1975). Land Use in Advancing Agriculture. Obtenido de <http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3090215>

- Castro Quintero, A. F., Lince Salazar, L. A., & Riaño Melo, O. (2017). Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia. *Revista de Investigación agraria y ambiental*, 8(1).
- Echeverry Tafur, L., & Obando Moncayo, F. H. (2010). Erosividad de las lluvias en la región centro sur del departamento de Caldas, Colombia. *Facultad Nacional Agraria*, 1(62), 5307-5318.
- Gómez Aristizabal, Á. (abril- junio de 1973). Sistema I.U.M para determinación del uso y manejo de los suelos de los suelos de ladera. *Cenicafe*, 2(62), 72-86.
- Guío Martínez, V. H., Cely Reyes, G., & Moreno Pérez, D. F. (2015). Determinación y mapeación de la erosividad de la lluvia en la cuenca del embalse de la copa. *Ingenio magno*, 34-46.
- Ramírez Ortiz, F. A., & Hincapie Gómez, E. (2009). Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de Caldas. *Cenicafe*, 2(60), 173-189.
- Rivera, P. H., & Gómez, A. A. (1991). Erodabilidad de los suelos de la zona cafetera central de Colombia. *Cenicafé*, 3(42), 67-88.
- UNESCO. (2006). Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas, y sub-húmedas secas de América Latinay el Caribe. (3).
- Velasco, I., & Cortes. (2017). Indices de Forunier modificado y de concentración de la precipitación como estimadores del factor de riesgo a la erosión en Sinaloa, México. En *Area tematica 2: erosión de suelos y desertificación* (págs. 431-434).
- DESMET, P. J. J. y GOVERS, G. (1996). Comparison of Routing Algorithms for Digital Elevation Models and Their Applications for Predicting Ephemeral Gullies. *International Journal of GIS* 10:311-331.
- HICKEY, R. (2000). Slope Angle and Slope Length Solutions for GIS. *Cartography*, v. 29, nº 1, pp 1-8.
- MOORE, I. D., y NIEBER, J. L. (1989). Landscape Assessment of Soil Erosion and Nonpoint Source Pollution. *Journal of the Minn. Acad. Sci.* 55(1):18-25.
- MOORE I. y WILSON J. (1992). Length-Slope Factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified Method of Estimation. *J. Soil and Water Conservation* 47(5) 423-428.
- MOORE. I. D. y BURCH G. J. (1986). Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects. *Trans. ASAE* 29, 1624-1630, 1640.

- VAN REMORTEL, R., HAMILTON M., y HICKEY R., 2001, Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data. *Cartography*, v. 30, no. 1, pp. 27-35
- WESHLER, S. P. (1999). DEM Uncertainty: Evaluation and Effect on Topographic Parameters. Ph.D. Dissertation. State University of New York College of Environmental Science and Forestry (SUNY CESF), Syracuse, NY. USA.
- WISCHMEIER, W.H. y SMITH D.D. (1978). Predicting Rainfall-Erosion Losses: A Guide To Conservation Planning. Agriculture Handbook (AH) 537. U.S. Dept. of Agriculture, Washington, DC. USA.
- CORTOLIMA. (2013). PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA. DEL RÍO TOTARE. Tolima.
- GeoSpatial. (2013). GeoSpatial . Obtenido de GeoSpatial Soluciones Espaciales para Infraestructura.: <http://www.geospacial.com.co/imagenes-de-satelite/geo-eye-1.html>
- Gilabert, J., González-Piqueras, J., & Haro-García. (1997). Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de Teledetección.*, 1-10.
- Martínez, R., N. Martínez y MV, Martínez. (2011). Diseño de Experimentos en Ciencias Agropecuarias y Biológicas con SAS, SPSS, R y Statistix. Fondo Nacional Universitario. Bogotá, D.C. Colombia
- Salas Eljatib, Christian. (2002). Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de Roble-Laurel-Lingue. *Bosque (Valdivia)*, 23(2), 81-92. Recuperado en 29 de Diciembre de 2013, de [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-92002002000200009&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002002000200009&lng=es&tlng=es). 10.4067/S0717-92002002000200009.
- Martínez, R., & Martínez, N. (1997). Diseño de experimentos. Análisis de datos estándar y no estándar. 1ª ed. Fondo Nacional Universitario, Bogotá.
- Tapias (1995). *Dasometría: Algunas Aproximaciones Estadísticas a la Medición Forestal*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Arrouays, D., Legacherie, P. y Hartemink, A. (2017). Digital soil mapping across the globe. *Geoderma regional* 9, 1-4.
- Cenicafe .1975 Manual de conservación de suelos de ladera. Federación de Cafeteros. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Chinchiná, Caldas
- Dokuchaev V. (1967). Russian Chernozem. In: Monson S, ed., Israel Program for Scientific Translations Ltd., (for USDA-NSF), Jerusalem.

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) e Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS). (2015). Status of the World's Soil Resources-Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- Franklin, J. (1995). Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Prog. Phys. Geogr.* 19, 474–499.
- G. R. Foster, D. K. McCool, K. G. Renard, and W. C. Moldenhauer. 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. In Soil and Water Conservation Society. *Journal of Soil and Water Conservation* 36(6):355-359 [www.swcs.org](http://www.swcs.org).
- Kempen, B., Brus, D.J., Stoorvogel, J.J., Heuvelink, G.B.M., De Vries, F. (2012). Efficiency comparison of conventional and digital soil mapping for updating soil maps. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 2097–2115.
- Lagacherie, P. y McBratney, A.B. (2006). Chapter 1 spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. *Dev. Soil Sci.* 3–22.
- Legros, J. P. (2006). *Mapping of the Soil*. Science Publishers. Lausanne.
- Mancilla Escobar, G. 2008. Apuntes docentes Uso y conservación de suelo (USLE) en el campo forestal.
- McBratney, A. B., Field, D. J. y Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203–213.
- McBratney, A.B., Mendonça-Santos, M.L., Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52. doi:10.1016/S0016-7061(03)00223-4.
- McKenzie, N.J. y Ryan, P. J. (1999). Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* 89, 67–94.
- Minasny, B. y McBratney, A. (2016). Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, 264, 301–311.
- Montenegro H, Malagón D. 1990. *Propiedades físicas de los suelos*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- RAMÍREZ O., F.A.; HINCAPIÉ G., E. 2009. Riesgo a la erosión en la zona cafetera central del departamento de Caldas. *Cenicafé* 60 (2): 173-189.
- RIVERA P., J. H.; LAL, R.; AMÉZQUITA C., E.; MESA S., O; CHAVES C., B. (2010). Predicción de la erodabilidad en algunos suelos de ladera de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 61 (4): 344-357.

- Scull, P., Franklin, J., Chadwick, O. A. y McArthur, D. (2003). Predictive soil mapping: A review. *Progress in Physical Geography*, 27, 171–197.
- Wischmeyer, W. H. y D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook N° 537. Washinton. USA.
- Zhang, G. Feng, L. y Song, X. (2017). Recent progress and future prospect of digital soil mapping: A review. *Journal of Integrative Agriculture* 16(12), 2871- 2885.
- Leandro Bejarano, M. Banguerd, E Madero, E Amézquita. 2002. Usos y manejos conservacionistas del suelo evaluados bajo dos nuevos indicadores edáficos Parte 1: Índice de desprotección del suelo *Revista Suelos Ecuatoriales*. Volumen 32.
- Marisela Pando Moreno, Maritza Gutiérrez Gutiérrez, Alfonso Maldonado Hernández, José Luis Palacio Prieto. A. Eduardo Estrada Castellón. 2003. Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM Num. 51, 2003, pp. 23-36*
- RAMÍREZ O., F.A.; HINCAPIÉ G., E.; SADEGHIAN KH., S.; PÉREZ G., U. Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. *Cenicafé* 58(1):40-52. 2007.
- Prado-Hernández, Jorge V.; Rivera-Ruiz, Pedro; de León-Mojarro, Benjamín; Carrillo-García, Mauricio; Martínez-Ruiz, Antonio CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE PÉRDIDAS DE SUELO USLE Y MUSLE EN UNA CUENCA FORESTAL DE MÉXICO: CASO EL MALACATE *Agrociencia*, vol. 51, núm. 3, abril-mayo, 2017, pp. 265-284 Colegio de Postgraduados Texcoco, México  
Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30250596002>
- Forero M.C. y López H. J. 1986. Estudios Básicos para un plan de ocupación del espacio de la cuenca del rio Sinú. CIAF-Centro Interamericano de Fotointerpretación.CVS. 240p.
- Cortés. L. A., Malagón, C. D. 1984. Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Edit. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 360p.
- FAO. 1983. Guidelines land evaluation for rainfed agriculture. FAO Soil bulletin 52, Roma 237 págs.
- FAO, 1984. Land evaluation for forestry . FAO paper No 48, Roma.
- FAO (1979), A provisional methodology for soil degradation assessment, Roma, Italia.
- DANIEL F. JARAMILLO J. 2002. INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE CIENCIAS MEDELLÍN

- Mauricio Lugo Ruiz, 2016 Estimación de la erosión hídrica en los suelos de la microcuenca Tzalá, San Marcos, Guatemala Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras
- Guio V.H., Cely Reyes, G. y Moreno Pérez, D. F. (2015). Determinación y mapificación de la erosividad de la lluvia en la cuenca del embalse de La Copa, Boyacá. Ingenio Magno, 6, pp. 34-46
- Rodríguez Parisca, Oscar Simón. Conservación de suelos y agua: una premisa del desarrollo sustentable / Oscar Simón Rodríguez Parisca. - - Caracas: Universidad Central de Venezuela, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, 2009.
- USDA. 1993. User's guide, Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Department of Agriculture. Agriculture Handbook.
- APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PREDICCIÓN DE PERDIDAS DE SUELO EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES
- Ings. Agrs. Carlos B. Irurtia y Gustavo Cruzate
- Técnicos del Instituto de Suelos del INTA  
<http://edafologia.ugr.es/gestionsuelos/grupoa/tema5.pdf>
- APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PREDICCIÓN DE PERDIDAS DE SUELO EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES Por Ings. Agrs. Carlos B. Irurtia y Gustavo Cruzate Técnicos del Instituto de Suelos del INTA Castelar
- FAO Conservation Guide N°1.1977. Predicting soil losses due to sheet and rill erosion (Arnoldus H. M. J. ). pp 99-124.
- Pérez. S. (2001). Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando sistemas de información geográfica.
- Castro Q, A.F. 2017. Determinación del riesgo a la erosión potencial hidrica en la zona cafetera del Departamento de Quindío Universidad de Manizales Facultad de ciencias e Ingeniería Programa Maestría en Tecnologías de información geográfica Manizales