

**ANALISIS DE LOS PROCESOS EROSIVOS EN LAS VERTIENTES DE LA
MICROCUEENCA HATO VIEJO MUNICIPIO DE CHITAGÁ**

**LILIANA SOLANO VILLAMIZAR
C.C 1094277636**

**PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, 2017**

**ANALISIS DE LOS PROCESOS EROSIVOS EN LAS VERTIENTES DE LA
MICROCUEENCA HATO VIEJO MUNICIPIO DE CHITAGÁ**

**LILIANA SOLANO VILLAMIZAR
C.C 1094277636**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERA AMBIENTAL**

**Directores: PHD. MARIA ESTHER RIVERA
Msc. JESUS RAMON DELGADO**

**PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

Pamplona, 2017

Dedicatoria

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres que me dieron la vida, educación, me han apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, son mi ejemplo de perseverancia y constancia, pero más que nada, por su amor, porque Sacrificaron mucho de sus vidas para que yo pudiera construir la mía y no saben lo eternamente agradecida que me encuentro, son los pilares de mi vida y los dueños de mis triunfos

A mi hermano y demás familiares por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme acompañado, guiado y por bendecirme, para llegar hasta donde he llegado, por ser mi fortaleza en los momentos difíciles, por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias, felicidad y por hacer realidad este sueño anhelado.

A mis padres por su apoyo, amor incondicional y por darme la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mi hermano por ser mi acompañante y parte importante en mi vida, por apoyarme y llenar mi vida de alegría con cada una de sus travesuras.

A la universidad de Pamplona y en especial al programa de ingeniería ambiental por darme la oportunidad de estudiar y ser una profesional.

A mis directores de tesis, PhD. Maria Esther Rivera y Msc. Jesus Ramón Delgado por su esfuerzo y dedicación, que con sus conocimientos, experiencia, paciencia y motivación han logrado sacar lo mejor de mí para terminar este proceso.

A mis profesores porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación.

A mis amigos por confiar, creer en mí, por ser mi apoyo y por haber hecho de esta etapa un trayecto de experiencias maravillosas que nunca olvidare. Son muchas las personas que han formado parte de mi vida a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Muchas gracias y que Dios los bendiga.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	11
INTRODUCCION	12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
3. JUSTIFICACION	14
4. OBJETIVOS	15
4.1 Objetivo general	15
4.2 Objetivos específicos	15
5. ALCANCES Y LIMITACIONES	16
6. MARCO REFERENCIAL.....	17
6.1 MARCO CONTEXTUAL.....	17
6.2 ANTECEDENTES.....	18
6.3 MARCO TEORICO.....	21
➤ Factores que intervienen en los procesos erosivos.....	22
➤ Medición de la erosión y la sedimentación a nivel de cuencas hidrográficas	29
➤ Modelos de erosión	30
6.4 MARCO LEGAL.....	32
7. METODOLOGIA	34
7.1 Reconocer los principales factores físicos y antrópicos desencadenantes de la erosión del área de estudio.	34
7.2 Analisis de las características geomorfológicas de la cuenca que influyen en los procesos erosivos.	37
7.3 Evaluación de los factores determinantes de la degradación de suelos por erosión	38
➤ Estimación de la perdida de suelo mediante la aplicación del modelo rusle	38
➤ Susceptibilidad de erosion en laderas	43
8. RESULTADOS.....	46
8.1 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LA CUENCA QUE CONTROLAN LOS PROCESOS EROSIVOS.....	46
8.2 FACTORES FÍSICOS Y ANTRÓPICOS DESENCADENANTES DE LA EROSIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	49

8.3	EVALUACIÓN DE LOS FACTORES DETERMINANTES DE LA DEGRADACIÓN DE SUELOS POR EROSIÓN	64
➤	Estimación de la pérdida de suelo mediante la aplicación del modelo usle.....	64
➤	Susceptibilidad de erosion en laderas	73
➤	Amenaza de deslizamientos de laderas.	80
	CONCLUSIONES	90
	RECOMENDACIONES	92
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factor K según el tipo de roca formadora del substrato superficial.....	40
Tabla 2. Factor c para coberturas según clasificación Land Cover.....	42
Tabla 3. Valores factor P.....	42
Tabla 4. Susceptibilidad y el detonante sísmico de precipitación en la estimación de la amenaza de movimientos de ladera.....	44
Tabla 5. Características morfométricas de la microcuenca de la quebrada Hato viejo.....	47
Tabla 6. Parámetros geomorfológicos de la microcuenca de la quebrada Hato viejo	47
Tabla 7.....	48
Tabla 8. Precipitación total mensual para la microcuenca Hato Viejo	50
Tabla 9. Precipitación máxima mensual para la microcuenca Hato Viejo	51
Tabla 10. clasificación de suelos de la microcuenca Hato Viejo según el sistema unificado de clasificación de suelos (U.S.C.S).	59
Tabla 11. Factor K para la Microcuenca quebrada Hato Viejo.....	65
Tabla 12. valores del factor k para unidades de suelo y litología cuenca quebrada hato viejo	65
Tabla 13. Clasificación de pendientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo	68
Tabla 14. Factor c establecido para las coberturas de la microcuenca de la quebrada Hato Viejo.....	70
Tabla 15. Sismos presentados en el municipio de Chitagá- Norte de Santander	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización quebrada Hato Viejo, municipio de Chitagá.....	17
Figura 2. Ordenes de corriente según Strahler para la quebrada Hato Viejo.....	24
Figura 3. Estructura del modelo para la aplicación de la ecuación universal USLE.....	32
Figura 4. Solicitud de serie de datos de precipitación diaria satélite TRMM.....	34
Figura 5. Proceso análisis granulométrico de los sedimentos de la quebrada Hato Viejo...	35
Figura 6. Imagen landsat 8.....	36
Figura 7. Parámetros morfo métricos calculados en Arc-Gis 10.2.2 para la microcuenca Hato Viejo.....	37
Figura 8. Esquema de los factores empleados en la estimación de pérdida del suelo mediante USLE.....	38
Figura 9. Ubicación estaciones pluviométricas (Chitagá, Presidente, Campo hermoso, Rincón).....	39
Figura 10. Interpolación factor R de las estaciones pluviométricas (Chitagá, Presidente, Campo hermoso, Rincón).....	39
Figura 11. Determinación de coberturas para la microcuenca Hato Viejo.....	41
Figura 12. Esquema de factores empleados en la determinación de la susceptibilidad de erosión en laderas.....	43
Figura 13. Medición de niveles y secciones, A- sección punto 3 lugar Cascaral, B- Mira 1 lugar La Esperanza.....	45
Figura 14. Frecuencia de altitudes de la microcuenca de la quebrada Hato viejo.....	48
Figura 15. Curva Hipsométrica de la microcuenca de la quebrada Hato viejo.....	48
Figura 16. Mapa orden de drenajes para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo.....	49
Figura 17. Distribución mensual de las precipitaciones en la microcuenca Hato Viejo.....	50
Figura 18. Curvas IDF para la microcuenca Hato Viejo.....	52
Figura 19. Mapa Geológico para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo.....	52
Figura 20. Formaciones neis de Bucaramanga en la microcuenca Hato Viejo, A-lugar la esperanza, B-lugar El Cascaral.....	53
Figura 21. Formaciones Capacho en la microcuenca Hato Viejo, A-B- lugar El cascaral..	54
Figura 22. Depósitos en la microcuenca Hato Viejo, A- Confluencia quebrada con el rio Chitagá, B-Lugar La Capilla.....	54
Figura 23. Vegetación de paramo y subparamo en la microcuenca Hato Viejo, A-B Lugar Correales.....	56
Figura 24. Matorral boscoso y arbustos en la microcuenca Hato Viejo; A- Lugar el Caimo, B- La Esperanza.....	56
Figura 25. Cultivos de fresa y ciruela en la microcuenca Hato Viejo, A-Finca el Tablón, B-Finca Los Caobos.....	56
Figura 26. Pastizales y matorral en la microcuenca Hato Viejo; A-s Finca el Tablón, B-Lugar el Cascaral.....	57
Figura 27. Imagen satelital quebrada Hato viejo -2014.....	58
Figura 28. Imagen satelital quebrada Hato viejo -2016.....	58

Figura 29. Imagen satelital quebrada Hato viejo -2017	58
Figura 30. curvas granulométricas puntos de muestreo microcuenca Hato Viejo; A- Muestra 1, B-Muestra 2.....	59
Figura 31. curvas granulométricas puntos de muestreo microcuenca Hato Viejo, A- Muestra 3, B- Muestra 4, C-Muestra 5, D-Muestra 6	60
Figura 32. Cárcavas en la parte alta de la microcuenca Hato Viejo	61
Figura 33. Erosión por surcos en la parte media de la microcuenca Hato Viejo	61
Figura 34. Deslizamientos en laderas en la parte alta de la microcuenca Hato Viejo	62
Figura 35. Flujos torrenciales en la quebrada Hato Viejo.....	62
Figura 36. Flujos torrenciales en la quebrada Hato Viejo.....	62
Figura 37. Mapa del uso potencial del suelo para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo	63
Figura 38. Mapa con el Factor R para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo	64
Figura 39. Mapa con el Factor K para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo	66
Figura 40. Mapa de subfactor L para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo	67
Figura 41. Mapa de pendiente para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo.....	67
Figura 42. Mapa de factor Ls para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo	68
Figura 43. Mapa de factor C para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo.....	69
Figura 44. Mapa de factor P para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo	70
Figura 45. Mapa de factor erosión Hídrica Potencial para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo	71
Figura 46. Fotografías donde se evidencia la erosión hídrica en la microcuenca de la quebrada Hato Viejo	72
Figura 47. Mapa de erosión Hídrica Potencial para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo	72
Figura 48. Mapa de orientación de vertientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo.....	73
Figura 49. Mapa de curvatura de vertientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo	74
Figura 50. Mapa de curvatura de vertientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo	75
Figura 51. Mapa litológico para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo.....	76
Figura 52. Mapa de geotécnico para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo.....	77
Figura 53. Mapa uso del suelo para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo	78
Figura 54. Mapa de susceptibilidad de erosión en vertientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo	79
Figura 55. Mapa de susceptibilidad de erosión en vertientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo Fuente: Solano V, (2017).....	80
Figura 56. Sismicidad para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo	82
Figura 57. Mapa de amenaza de erosión en vertientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo	83
Figura 58. Mapa de erosión superficial potencial específica para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo	84
Figura 59. Variación de los niveles en los 5 puntos de muestreo en la quebrada Hato Viejo.	85

Figura 60. Variación de las precipitaciones diarias (julio- noviembre, 2017) en la microcuenca Hato Viejo..... 85

Figura 61. Cambios de la sección en el puente Hato Viejo tras los eventos presentados, A- 2013, B-junio 2015, C- Julio 2015, D -julio 2015, E -octubre 2015, F -Noviembre 2017.. 86

Figura 62. Hidrograma unitario triangular para la microcuenca Hato Viejo. 87

Figura 63. Variación de la sección punto 1 tras eventos presentados en el periodo de estudio. 87

Figura 64. Variación de la sección punto 2 tras eventos presentados en el periodo de estudio. 88

Figura 65. Variación de la sección punto 3 tras eventos presentados en el periodo de estudio. 88

Figura 66. Variación de la sección punto 4 tras eventos presentados en el periodo de estudio. 89

Figura 67. Variación de la sección punto 5 tras eventos presentados en el periodo de estudio. 89

RESUMEN

Los procesos de degradación de los suelos son dinámicos, crecientes y de preocupación mundial que requieren de la medición, vigilancia y control de dichos procesos fundamentales en el desarrollo de la región, en particular en el mantenimiento del equilibrio ambiental y la sostenibilidad económica y social.

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio, tratamiento, evaluación de la dinámica espacial de los cambios del uso del suelo y los procesos erosivos en la microcuenca Hato Viejo, Municipio de Chitagá, mediante el análisis de los factores determinantes como: el potencial erosivo de las gotas de lluvia, los componentes topográficos longitud y pendiente, textura del suelo, uso/cobertura y prácticas de conservación, además se evaluó la susceptibilidad y amenaza por erosión en las vertientes de la quebrada a partir de dos factores detonantes como la precipitación y la sismología; mediante la identificación, geoprocésamiento, modelamiento y análisis de los procesos, utilizando un sistema de información geográfica (SIG) para generar las salidas gráficas finales donde se representa la variabilidad espacio temporal de los procesos erosivos en la microcuenca, demostrando a nivel general que la pérdida de suelo neta de mayor magnitud predomina en pendientes escarpadas y abruptas, que influenciados por una amplia variabilidad de las precipitaciones aceleran la dinámica de los mismos.

Palabras clave: Erosión de suelos, intensidad de lluvias, erosión hídrica, conservación suelos.

SUMMARY

The processes of soil degradation are dynamic, growing and of global concern that require the measurement, monitoring and control of these fundamental processes in the development of the region, in particular in the maintenance of environmental balance and economic and social sustainability.

The objective of this work is the study, treatment, evaluation of the spatial dynamics of land use changes and erosion processes in the Hato Viejo micro-watershed, Municipality of Chitagá, through the analysis of the determining factors such as: the erosive potential of raindrops, topographic components, length and slope, soil texture, use / coverage and conservation practices. In addition, the susceptibility and erosion threat on the stream's slopes was evaluated from two detonating factors, such as precipitation and seismology; through the identification, geoprocessing, modeling and analysis of the processes, using a geographic information system (GIS) to generate the final graphic outputs where the temporal space variability of the erosion processes in the microbasin is represented, demonstrating at a general level that the loss of larger-scale net soil predominates on steep and steep slopes, which, influenced by a wide variability of rainfall, accelerate their dynamics.

Keywords: Soil erosion, rainfall intensity, water erosion, soil conservation.

INTRODUCCION

En la evolución de los sistemas montañosos de una cuenca intervienen numerosas variables hidrológicas, geomorfológicas, topográficas, vegetación etc. que en gran medida son controlados por las tasas de erosión y capacidad de transporte del sistema fluvial, que a su vez inciden en la evolución y morfología de las laderas (Roering et al., 2001; Reinhardt et al., 2007; Hurst et al., 2012) y puede ser un factor para la desestabilización de las mismas (Roering et al., 2007). Otros factores relacionados con el clima, como es la precipitación, pueden afectar la topografía y morfología de la cuenca, en temporadas de intensas precipitaciones, las tasas de erosión suelen incrementarse y producir una mayor concavidad en el perfil longitudinal (Schlunegger et al., 2011). Además de los factores tectónicos y climáticos, la litología puede producir cambios importantes en la topografía de los ríos debido a la distinta resistencia que tienen los materiales frente a los procesos de erosión (e.g. Hack, 1973; Gardner, 1983; Miller, 1991; Larue, 2008). De ahí la importancia que tiene una correcta utilización de los modelos hidrológicos, en el diagnóstico de la situación real de las cuencas hidrográficas sometidas a fenómenos torrenciales.

La degradación de los suelos y la ocurrencia de fenómenos torrenciales es un problema de preocupación mundial que requieren de la medición, vigilancia y control de dichos procesos fundamentales en el desarrollo de la región, en particular en el mantenimiento del equilibrio ambiental y la sostenibilidad económica y social, la determinación de la zonificación del territorio en base a grados de susceptibilidad a la erosión constituye un elemento fundamental de la planificación para el desarrollo, identificando las áreas frágiles y generando cartografía que permite caracterizar cualitativamente la variación espacial de los procesos erosivos, la quebrada Hato viejo no es ajena a esta problemática ya que es susceptible a estos fenómenos por tal motivo se realizó el monitoreo y seguimiento de la degradación de suelos en la quebrada cuyo propósito es disponer de información oportuna y de excelente calidad del estado actual de la microcuenca para la toma de decisiones con respecto a la prevención, manejo sostenible y restauración o rehabilitación de los suelos, realizando la identificación y zonificación de los procesos de erosión, análisis y evaluación de las causas que lo producen.

En el cumplimiento de los objetivos propuestos se analizó la producción de sedimentos en la quebrada Hato Viejo, la estimación de suelo erosionado en la cuenca mediante la ecuación universal de pérdida de suelo, que comprende los agentes generadores de erosión tales como el potencial erosivo de las gotas de lluvia, los componentes topográficos como la longitud y pendiente, además la textura del suelo, el uso/cobertura y prácticas de conservación del suelo, se evaluó la susceptibilidad y amenaza por erosión en las vertientes de la quebrada a partir de dos factores detonantes como la precipitación y la sismología, se contó con la herramienta del Sistema de Información Geográfica SIG, que dio los mecanismos para la interpretación de los resultados obtenidos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, la erosión del suelo constituye uno de los principales problemas de degradación ambiental en el municipio de Chitagá, donde han influido varios factores como las características propias del suelo, el relieve, la pérdida progresiva de la cobertura vegetal, producto de la intervención antrópica, además, no se realiza ningún control en las concesión de agua en las partes altas, permitiendo la infiltración; a esto se le suman problemas de expansión de la frontera agrícola, ya que en busca de mayor productividad y de mejorar la calidad de vida de la población. Así mismo, se ha invadido la ronda hídrica sin tener buenas prácticas agrícolas, no se realiza la rotación de cultivos generando mayor deterioro del suelo y la pérdida de material orgánico y minerales por otro lado, el uso de agroquímicos en exceso y alteración de las condiciones del suelo, han reducido la fertilidad y aumentando el poder erosivo. Todo lo anterior ha incidido en forma negativa produciendo deslizamientos, represas y flujos de lodo en la microcuenca Hato Viejo, ocasionando importantes pérdidas materiales, económicas y naturales; afectando la producción agropecuaria y servicios ambientales, ocasionando desabastecimiento de agua potable y sistema de riego para la vereda Llano Grande, alteración en la belleza paisajística, destrucción de hábitat y pérdida de biodiversidad.

Los procesos erosivos ocurren como respuesta rápida o lenta de la naturaleza donde influyen las características de la roca ante diferentes factores como las altas precipitaciones, la influencia sísmica de la región y la intervención antrópica, por tal motivo conocer los factores es de vital importancia para una adecuada planeación del territorio, por tal motivo con este proyecto se buscó responder la siguiente pregunta:

¿Qué factores intervienen en los procesos erosivos de la microcuenca Hato Viejo? Para así conocer la influencia de cada factor y buscar alternativas que disminuyan el riesgo de erosión generando un equilibrio ambiental y la sostenibilidad económica y social de la región.

3. JUSTIFICACION

La degradación de las tierras es uno de los principales desafíos del medio ambiente a nivel mundial y el desarrollo sostenible, por tal motivo en la Cumbre Mundial de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible (2002), se planteó que los países tomaran medidas para hacer frente a las causas de la desertificación y la degradación de los suelos, con el fin de conservar y recuperar las tierras.

En Colombia, la erosión constituye el proceso de degradación más importante debido a su magnitud en el territorio nacional; la microcuenca Hato Viejo, ubicada en el municipio de Chitagá, no es ajena a esta problemática que sumado a aspectos naturales y a la fuerte intervención antrópica le otorgaron cierta fragilidad ambiental ocasionando fenómenos de remoción en masa.

En este sentido, la presente investigación por medio de diferentes métodos, técnicas e instrumentos se establecerán diferentes etapas de zonificación, caracterización, análisis y evaluación de la degradación de suelos por erosión en las vertientes de la microcuenca para generar datos confiables que permitan formular una política sobre la conservación de los mismos y tomar decisiones acertadas para el control y prevención de los procesos de degradación como factor importante en la producción agropecuaria y en la prestación de servicios ambientales que contribuyen a la regulación de fenómenos como el cambio climático y la desertificación.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Caracterizar las formas y procesos de erosión de la microcuenca Hato Viejo, determinando los rasgos geomorfológicos de las formas erosivas y sus causas.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las características geomorfológicas de la cuenca que controlan los procesos erosivos.
- Reconocer los principales factores físicos y antrópicos desencadenantes de la erosión del área de estudio.
- Evaluar los factores determinantes de la degradación de suelos por erosión

5. ALCANCES Y LIMITACIONES

En este proyecto tiene como alcance la identificación, medición, vigilancia geoprocesamiento, modelamiento y análisis de los procesos erosivos en la microcuenca Hato Viejo con el propósito de disponer de información oportuna y de excelente calidad del estado actual de degradación de los suelos para la toma de decisiones con respecto a la prevención, manejo sostenible y restauración o rehabilitación de los suelos de la microcuenca y así establecer las causas que lo producen y las consecuencias en los aspectos ambientales.

Debido a las limitaciones de la información histórica sobre indicadores y factores ambientales específicos, y la no disponibilidad de instrumentos técnicos para mediciones de factores topográficos y geológicos se basó en datos teóricos establecidos, para realizar un análisis exhaustivo es necesario evaluar en un periodo de tiempo más largo.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1 MARCO CONTEXTUAL

La quebrada Hato viejo afluente del río Chitagá ocupa una superficie de 5,1 km² y se ubica en las veredas Llano Grande y Alto viento del municipio de Chitagá (Figura 1), desde su origen hasta su confluencia con el río Chitagá el recorrido total es de 4,37 km, su nacimiento se sitúa sobre la cordillera oriental en la franja montañosa sobre los 3365 msnm en el área estratégica denominada la Esperanza adquirida por el municipio.

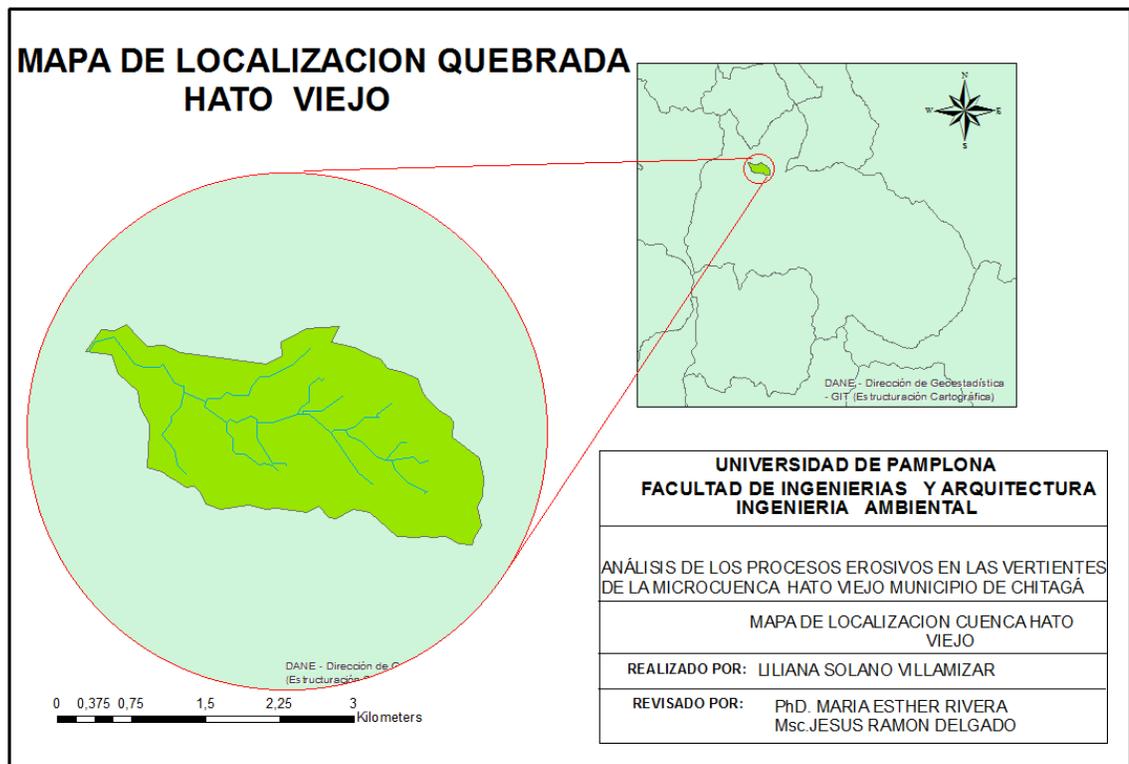


Figura 1. Localización quebrada Hato Viejo, municipio de Chitagá
Fuente: Solano V, (2017)

La quebrada sigue su curso en dirección este oeste donde atraviesa por estrechos valles encajado entre vertientes de pendientes pronunciadas formando acantilados. En su recorrido recibe aportes de afluentes considerables, destacándose el afluente denominado pantanitos que converge tras recorrer 2,4km desde el origen de la quebrada a 2415 msnm que le aporta aguas turbias y cantidades considerables de sedimentos debido a su alto poder erosivo.

Sus suelos son usados con carácter agropecuario y forestal destacándose los cultivos de durazno, papa, fresa, hortalizas en el transcurso a 3,09 km de su origen, a 2276 msnm se localiza la captación de agua potable para la vereda Llano Grande y del sistema de riego para el uso agropecuario de dicha vereda

En todo el recorrido de la quebrada se observan sedimentos de diferentes diámetros el canal formado es amplio debido a acontecimientos anteriores, se evidencia la erosión de las vertientes, y el desprendimiento de arboles y rocas que son transportados por el cauce.

6.2 ANTECEDENTES

Según estudios efectuados por Oldeman (1994), a escala global, la erosión hídrica es el proceso dominante en la degradación de los suelos, inducida por intervenciones humanas, el cual afecta cerca de 11 millones de km² (8,5 % de la superficie terrestre). En conjunto, la erosión hídrica, la eólica, la degradación química y la física afectan en diferentes niveles de intensidad; casi 20 millones de km², esto es el 15% de la superficie global, o 66% de las tierras potencialmente arables en el mundo.

Por otra parte, Morgan (1997) combinando análisis históricos y geomorfológicos comprobó que la erosión es un proceso natural, pero que la distribución de su intensidad, en el tiempo y en el espacio, es el resultado de la interacción de circunstancias físicas y humanas.

Zinck (2005) sostuvo que las propiedades edáficas y la posición de los suelos en el paisaje determinan su susceptibilidad a ser dañados por procesos como: la erosión laminar, la incisión de cárcavas y los movimientos en masa. La erosión en cárcavas constituye un serio problema, en ciertas áreas donde el clima, la litología, los tipos de suelos, las características del relieve y los usos del suelo favorecen los procesos de erosión. Al respecto, Zinck et.al (2001) considera que una cárcava, se inicia a partir de un entalle de surco, de un deslizamiento de suelo, o inclusive a partir de un conducto subterráneo de sufusión, y que las innovaciones tecnológicas y metodológicas para la recolección de datos para el reconocimiento de rasgos en la superficie del terreno y la modelización cartográfica en SIG, ofrecen interesantes posibilidades para vencer las limitaciones de la modelización determinística.

En Uruguay, estudios realizados por la Dirección de Suelos y Aguas del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP, 1989), indican que la pérdida bruta de los suelos en las áreas agrícolas concluyendo más del 80% de las tierras arables, están siendo afectadas por grados diversos de erosión, donde la alta intensidad y uso inadecuado de los suelos han provocado deterioro grave en las que constituyeron las mejores tierras agrícolas del país. De igual manera, Sganga (1999) evaluó la magnitud de la erosión en cárcavas en Uruguay, su tasa de crecimiento y desarrollo, las técnicas de uso y manejo, tendiente a recuperar las tierras afectadas.

En México Figueroa (2011), analizaron los cambios de uso del suelo y sus efectos sobre los procesos de degradación y los procesos hidrológicos en la cuenca endorreica de San Cristóbal de las Casas, en los Altos de Chiapas, encontrando que en los periodos estudiados no se presentó una marcada tendencia de cambio de uso, con excepción de las zonas urbanas y establecieron la tasa anual de erosión hídrica afectada en el periodo 1975-2000, aunque más que en su valor, en la distribución de las áreas degradadas en la cuenca. Posteriormente, Garduño (2006) en su estudio geotécnico asociado a procesos de remoción en masa del parque Francisco Zarco (Michoacán, México) estableció modelos geométricos mediante coeficientes de seguridad y desplazamientos admisibles.

En el caso de España, González (2004) elaboro el Análisis de procesos de erosión local en márgenes de cauces fluviales con curvatura en planta realizada por en Madrid proponiendo una nueva metodología para el cálculo de protecciones de escollera en tramos curvos que contempla tanto el incremento en la velocidad media de la corriente que se produce por efecto de la curvatura como la presencia de la velocidad debida a los movimientos secundarios que tienen lugar en una curva.

Mientras que Camargo, (2013) en la investigación “ Evaluación multitemporal de procesos de erosión en ladera mediante el uso de SIG y sensores remotos en la micro-cuenca torrencial ‘La Machirí’, estado Táchira-Venezuela” estimaron la evolución, estado, tipo y grado de los procesos de erosión en la micro-cuenca mediante el estudio multitemporal con un Sistema de Información Geográfica (SIG), a partir de fotografías aéreas, una ortofoto generada a partir de un Software Fotogramétrico Digital e imágenes satelitales. Bárbara Barría (2009) realizó el análisis de los procesos de erosión en conos volcánicos piroclásticos en el ambiente insular oceánico de isla de Pascua – Chile. Se realizaron análisis de los factores físicos que intervienen en la erosión, como el clima, la litología, los suelos, la morfología de ladera y la vegetación, además de las intervenciones humanas, con el objeto de precisar las condiciones favorables a la generación de procesos erosivos y establecer relaciones causales. Asi mismo, Vega (2008) realizo la evaluación de la erosión superficial por parcelas experimentales en suelos desnudos de la región de Coquimbo (Chile), analizando la erosión hídrica superficial junto al conglomerado de los procesos erosivos a través del método de parcelas de clavos de erosión.

Según, estudios realizados por Del Valle (2003) sobre el procesos de erosión y análisis de sus condicionantes en una región semiárida: la cuenca de cornialto (Bardenas, Navarra), encontrando los condicionantes de la erosión en la cuenca y determinaron la susceptibilidad de los suelos a la formación de conductos subsuperficiales y el riesgo de erosión por clases texturales.

Agustín Balbis (2005) mediante el análisis multitemporal para evaluación de erosión en el río Ctalamochita en la localidad de Villa Ascasubi se evaluaron las posibles causas que pudieron haber desencadenado los procesos de inestabilidad en el cauce y erosión lateral, para evitar el avance de dichos procesos y el agravamiento de las afectaciones a las obras de infraestructura existentes.

Entre los estudios a nivel nacional se destacan los realizados por el INDERENA en 1977, el IGAC (1988 - 1998) y el IDEAM (2001), los cuales coinciden en que el país presenta entre 50-55% con algún grado de erosión. Sin embargo, los datos de los diferentes grados de erosión no coinciden en su secuencia temporal, y esto imposibilita el análisis de la evolución de la degradación, su seguimiento y monitoreo.

El Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS, junto con los institutos del SINA y la Universidad Nacional, han formulado la Política Nacional para la Gestión Sostenible del Suelo (MADS, 2015) aprobada por el Consejo Nacional Ambiental el 13 de agosto de 2015. En esta política se establecen las seis líneas estratégicas para su ejecución. Particularmente, la línea estratégica 4 está relacionada con el monitoreo y seguimiento a la calidad de los suelos, y tiene como objetivo fundamental desarrollar los mecanismos y acciones que permitan implementar programas para evitar y mitigar los efectos de la degradación del suelo en Colombia.

En el marco de desarrollo de este programa, el MADS, el IGAC y el IDEAM trabajaron en el año 2010 sobre la elaboración del Protocolo de Identificación y Evaluación de los procesos de degradación de suelos por erosión, y se consideraron los niveles nacional, regional y local, documento que se constituyó en el soporte principal para la elaboración de la “Línea Base de la Degradación de Suelos por Erosión en Colombia” a escala 1:100.000 (IDEAM – MADS, 2014).

Buitrago J. (2011) desarrollo un modelo de visualización de erosión hídrica en el municipio de Samacá (Boyacá). El modelo de visualización incorporó los factores que inciden en la erosión como la erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo y el relieve, el uso y manejo de las tierras. La visualización espacial permitió observar las áreas con mayor riesgo a la erosión, y así establecer territorios de prioridad de manejo para su conservación.

El Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS (2012) realizó la cartografía de unidades geológicas superficiales y subunidades geomorfológicas, del municipio de gramalote norte de Santander, como base técnica en la identificación de los sitios más aptos para el establecimiento del nuevo casco urbano del municipio de gramalote norte de Santander.

Delgado (2011) en el informe geológico ambiental preliminar para el área de Pamplona estableció que la región se caracteriza por encontrarse litologías variadas que tienen edades desde Predevónico hasta sedimentos recientes. Las rocas más antiguas son los esquistos de la Formación Silgará y el Ortogneis. Rocas Cretácicas de las Formaciones Tibú Mercedes, Aguardiente y Capacho, Rocas ígneas del granito de Durania y depósitos coluviales y aluviales. Por sus origen, edad y exposición, las rocas más antiguas tienden a alterarse y formar suelos residuales superficiales, los cuales tienen bajas a muy bajas propiedades geomecánicas. Las rocas sedimentarias cretácicas se encuentran muy fracturadas y en algunos casos presentan niveles blandos. El fracturamiento de los macizos rocosos está relacionado al comportamiento estructural, que corresponde a un régimen compresivo asociado al levantamiento de la cordillera Oriental. Esto es, la presencia de fallas y plegamientos. En el caso de Pamplona, se tienen unos sistemas de fallas sub paralelos de

direcciones SE- NW que son cortados por sistemas de fallas que posiblemente son más recientes y de dirección SW- NE.

A nivel de local, la información en esta materia es escasa y según Esquema de Ordenamiento Territorial del Área Rural y Urbana del Municipio de Chitagá, Norte de Santander (2005), el municipio cuenta con una litología muy diversa, además la geología del área del municipio está enmarcada dentro del desarrollo geológico de la Cordillera Oriental de Colombia. En el tiempo límite Cretácico-Terciario comienza el levantamiento de la Cordillera Oriental mediante una fase inicial de inversión de fallas normales jurásicas y cretácicas tempranas, fase que fue más conspicua en el Mioceno superior-Plioceno inferior, cuando se configuraron las tres cordilleras y el levantamiento máximo se produjo durante el Pleistoceno; estos factores obligan a realizar estudios de manera sectorizada para caracterizar los distintos tipos de suelos, las geoformas de origen estructural con pendientes y contrapendientes son susceptibles a movimientos en masa y que cualquier perturbación en el estado puede generar movimiento en masa.

Según Flórez (2015), los factores que influyen en el proceso de remoción son las características propias del suelo, el cual es arenoso-arcillosos provocando que la cobertura vegetal no penetre las capas más profundas, las pendientes, torrentes y torrencialidad. Además, no se tiene ningún control en la concesión de agua en las partes altas, permitiendo la infiltración del agua; a esto se le suman problemas de expansión de la frontera agrícola, ya que en busca de mayor productividad y de mejorar la calidad de vida de la población, se ha invadido la ronda hídrica sin tener buenas prácticas agrícolas, utilizando agroquímicos en exceso sin tener en cuenta la rotación de cultivos y alterando las condiciones del suelo volviendo los terrenos más inestables; los productores no tienen un sistema de riego estructurado que suministre la cantidad de agua necesaria para evitar el desperdicio del recurso hídrico además de los procesos erosivos, deforestación, topografía del terreno manejo inadecuado de los residuos sólidos.

6.3 MARCO TEORICO

El estudio de los factores que alteran la estabilidad en una masa de suelo proporcionan herramientas de prevención y análisis, el análisis de los componentes que lo conforman es una herramienta de gran utilidad al momento de determinar problemas de erosión y posterior pérdida de suelo (Vélez 1999, Moreira 2014) y así poder cuantificar el coeficiente de erosión en un área determinada y determinar el comportamiento de una masa de suelo que sea afectada por un río o por la precipitación.

La erosión es un movimiento de suelo superficial, ocasionado por diversos factores, principalmente agentes hídricos y eólicos, que resulta en la reducción de la profundidad del horizonte superior, cambios en las características del suelo y la alteración de su capacidad para soportar el desarrollo de la planta (Christensen y McElyea, 1988), el clima, el suelo, la

topografía, las prácticas de conservación y manejo de cultivos, afectan la erosión del suelo (Arnáez, 2012)

6.3.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LOS PROCESOS EROSIVOS

Según Perles (1996) un aspecto fundamental de la erosión es su dimensión espacial, en virtud de la cual hay que entender el funcionamiento del proceso como un sistema, en el que existen claras relaciones de interdependencia topológica entre fenómenos adyacentes. Entendiendo la erosión como un sistema, los factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica se relacionan con el clima, las pendientes y las formas del terreno, las características del suelo o sustrato, la naturaleza de la cubierta vegetal y el manejo del territorio.

➤ CLIMA E HIDROLOGIA

El Clima controla en parte la acción erosiva de la precipitación por dos causas principales; el poder de desprendimiento del impacto de las gotas al golpear el suelo y la contribución de la lluvia a la escorrentía (Morgan, 2005).

De acuerdo a Morgan (1997) y García-Chevesich (2008) no existe un monto específico para calificar intensidades de precipitación como erosivas, puesto que el monto de erosión dependerá de las características del suelo y de las condiciones meteorológicas previas (contenido de humedad y estado estructural del suelo); por lo tanto, una determinada intensidad tendrá consecuencias diferentes, según sean las condiciones preexistentes.

Sin embargo, cuando la lluvia cae con gran intensidad, la velocidad de penetración del agua en el suelo es frecuentemente insuficiente para asegurar la infiltración. La llegada al suelo de una cantidad elevada de agua en un tiempo corto produce rápidamente escorrentía (Fournier, 1975 y Gonzales, 2006).

En una tormenta, las gotas de lluvia provocan la erosión por salpicadura, consolidando y dispersando el suelo. El efecto de consolidación que mejor se aprecia es la formación de costra superficial, habitualmente sólo de pocos milímetros de espesor, que resulta de la reducción de poros por compactación del suelo. El efecto más importante de la costra superficial es la reducción de la capacidad de infiltración y, por lo tanto, la promoción de mayor escorrentía superficial (Morgan, 1997 y Escobar, 2017).

Pese a que la intensidad de la tormenta se encuentra en directa relación con la erosión y sedimentación producida, son las de intensidad intermedia las que, en el largo plazo, producen la mayor cantidad de pérdida de suelo (Morgan, 2005), debido a una combinación entre período de retorno y erosión unitaria.

El agua de escorrentía es, al igual que la lluvia, un agente de ataque del suelo, pues fragmenta los terrones y los agregados con ayuda de la carga sólida que posee. Para un suelo dado, caracterizado por una velocidad de infiltración de agua determinada por sus propiedades físicas (granulometría, estado estructural, estabilidad de la estructura), existe una intensidad

máxima de lluvia de absorción de este suelo o capacidad máxima (Díaz 2001). De este modo, la lluvia en exceso no se infiltra y circula entonces por las laderas ejerciendo un efecto mecánico capaz de producir la separación de otras partículas, e incluso un fuerte desgaste (Fournier, 1975; Escobar, 2017).

Así mismo, es de gran importancia tener en cuenta las características físicas morfométricas de la cuenca ante la respuesta hidrológica de la misma. Entre estas características se resaltan:

Coefficiente de forma (Kf): El factor forma hace una relación entre el ancho promedio de la cuenca y el largo promedio de la cuenca. Esta última medida se obtiene con la longitud del cauce principal y se define por la ecuación 1.

$$kf = \frac{A}{l^2} \quad \text{Ec (1)}$$

Donde, Kf - Factor forma, A - Área de la cuenca en Km² y L - Longitud Axial de la cuenca o longitud del cauce principal.

Coefficiente de compacidad (Kc) propuesto por Gravelius, compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio. Kc se define como la razón entre el perímetro de la cuenca que es la misma longitud del parteaguas que la encierra y el perímetro de la circunferencia, el cálculo de este coeficiente se realiza mediante la siguiente ecuación 2

$$kc = \frac{0.28 P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ec (2)}$$

Donde, P es el perímetro y A es el área de la cuenca.

Índice de alargamiento (Ia): propuesto por Horton, relaciona la longitud máxima encontrada en la cuenca, medida en el sentido del río principal y el ancho máximo de ella medido perpendicularmente; se lo calcula de acuerdo a la fórmula siguiente donde: Ia es el Índice de alargamiento, Lm la longitud máxima de la cuenca y l el Ancho máximo de la cuenca, para valores superiores a 1, se trata seguramente de cuencas alargadas, mientras que para valores cercanos a 1, se trata de una cuenca cuya red de drenaje presenta la forma de abanico y puede tenerse un río principal corto

$$Ia = \frac{Lm}{l} \quad \text{Ec (3)}$$

Coefficiente de masividad (Km): Este coeficiente representa la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie (ecuación 4).

$$Km = \frac{Hm}{A} \quad \text{Ec (4)}$$

Donde, Km es el coeficiente masividad, Hm es el altura media de la cuenca y A es el área de la cuenca.

Orden de corriente. Existen diferentes métodos para obtener este índice (Gregory and Walling, 1985). En este estudio se utilizó el método de Strahler ya que es el más común, el más comprensible y el más fácil de relacionar con otros parámetros morfométricos. Este índice se obtiene mediante la agregación de corrientes, considerando una corriente de primer orden a aquella que no tiene afluentes, una de segundo orden aquella donde se reúnen dos corrientes de primer orden, una de tercero donde confluyen dos de segundo orden y así sucesivamente (figura 2).

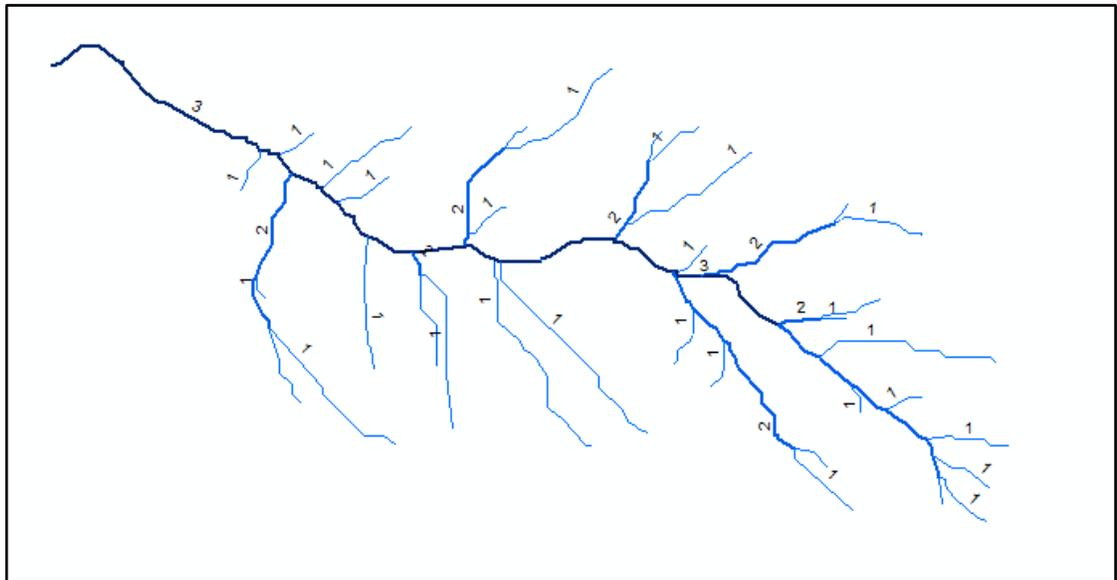


Figura 2. Ordenes de corriente según Strahler para la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

Densidad de drenaje (Dd). Se calcula dividiendo la longitud total de las corrientes de la cuenca por el área total que las contiene mediante la ecuación 5, donde L es la Longitud de las corrientes efímeras, intermitentes y perennes de la cuenca en (Km) y A el Área de la cuenca en (Km²)

$$Dd = \frac{L}{A} \quad \text{Ec (5)}$$

La densidad de drenaje varía inversamente con la extensión de la cuenca. Con el fin de catalogar una cuenca bien o mal drenada, analizando su densidad de drenaje, se puede considerar que valores de Dd próximos a 0.5 km/km² o mayores indican la eficiencia de la

red de drenaje. La red de drenaje toma sus características, influenciada por las lluvias y la topografía. Por esto se tiene que para un valor alto de Dd corresponden grandes volúmenes de escurrimiento, al igual que mayores velocidades de desplazamiento de las aguas, lo que producirá ascensos de las corrientes. En períodos de estiaje se esperan valores más bajos del caudal en cuencas de alta densidad de drenaje y de fuertes pendientes, mientras que en cuencas planas y de alta densidad de drenaje, se espera estabilidad del régimen de caudales, debido al drenaje subsuperficial y al aporte subterráneo (Walling, 2004).

Número de Escurrimientos es cantidad de afluentes naturales de la cuenca. Se contabiliza mediante SIG a través del número de segmentos marcados en el mapa digitalizado. Constituye una medida de la energía de la cuenca, de la capacidad de captación de agua y de la magnitud de la red fluvial.

Pendiente del cauce principal: La pendiente del cauce se la puede estimar por diferentes métodos, uno de ellos es el de los valores extremos, el cual consiste en determinar el desnivel H entre los puntos más elevado y más bajo del río en estudio y luego dividirlo entre la longitud del mismo cauce a partir de la ecuación 6, donde, S es la Pendiente media del cauce, H el desnivel entre los puntos más elevado y más alto y L la Longitud del cauce

$$S = \frac{H}{L} \quad \text{Ec (6)}$$

Tiempo de concentración (Tc) corresponde al lapso entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial. Existen una serie de fórmulas que permiten el cálculo de este tiempo desarrolladas por diversos autores, para este estudio se utilizó la ecuación 7, donde Tc es el Tiempo de concentración (min), L es la Longitud del cauce principal en (Km) y S es la Pendiente del cauce principal (m/m)

$$Tc = 0,06626 \left(\frac{L^2}{S} \right)^{0.385} \quad \text{Ec (7)}$$

➤ SUELOS Y LITOLOGÍA

Vergara (1966) y García (2006) considera que las características del substrato son muy importantes si se analiza que son capaces de hacer variar la permeabilidad y la capacidad de concentración de la energía erosiva del agua.

A este respecto, el concepto de erodabilidad de los suelos definido por Honorato y Cruz, (1999) e Ibáñez (2006), es la susceptibilidad de los suelos a la erosión, de acuerdo con sus propiedades intrínsecas, sin considerar aspectos climáticos o de cobertura vegetal y define la

resistencia del suelo a los procesos de desprendimiento y transporte, la erodabilidad varía con aquellas características que más afectan el equilibrio entre los procesos de escurrimiento e infiltración, tales como la textura del suelo, la estabilidad de los agregados, la resistencia al esfuerzo cortante, la capacidad de infiltración y los contenidos minerales y orgánicos (Morgan, 2005).

La materia orgánica del suelo cumple un papel similar a la de la arcilla reteniendo el agua, es también muy importante para mantener los agregados del suelo, para proporcionar así un suelo húmedo con permeabilidad elevada (Kirkby y Morgan, 2005) dentro de las propiedades más importantes, la composición granulométrica del suelo constituye un factor de su erosionabilidad. Los suelos arcillosos, mejor estructurados que los arenosos, tienen una resistencia mayor, pero sólo en tanto que la acción de las precipitaciones no haya provocado su dispersión. Si así ocurre, son tan susceptibles, si no más, que los suelos arenosos (Fournier 1975, Ibáñez 2006).

La resistencia del suelo a la erosión eólica depende más de su contenido de humedad que de la estabilidad de los agregados húmedos. Los suelos húmedos son menos erosionables que los suelos secos, pero, por otro lado, se ve afectada su resistencia a la erosión hídrica (Morgan, 2005). En este sentido, el suelo que ya está húmedo cuando la lluvia cae sobre él, alcanzará más rápidamente su tasa de infiltración final.

Con respecto a la naturaleza del suelo, Honorato, Cruz (1999) y Castro, (2013) señalan que los suelos derivados de cenizas y lavas volcánicas como los Andisoles, presentan una baja densidad aparente, elevada porosidad, alta retención de humedad y alta capacidad de fijación de fósforo. Estas características se asocian al comportamiento físico y físico-químico único de estos suelos en cuanto a erodabilidad, la cual es menor en comparación a los suelos no andisólicos.

Por otra parte, Rodríguez (2002) establece que la peculiar composición mineralógica de los andisoles, es la responsable de la existencia de esas propiedades físicas y mecánicas particulares, la cual explica además la elevada estabilidad estructural que presentan, la alta microporosidad y capacidad de retención de agua, alta conductividad hidráulica y velocidad de infiltración de agua y los altos límites de plasticidad. Por estas características admite que generalmente en condiciones normales el grado de erosión hídrica en andisoles es bajo.

La erosión aumentaría con la inclinación y longitud de la pendiente, como resultado del incremento de la velocidad y volumen de la escorrentía superficial. Por esto, la morfología del relieve tiene gran relevancia en la manifestación de las formas erosivas.

El efecto de la pendiente sobre la erosión es mayor para las condiciones tropicales donde la lluvia es más fuerte (Morgan, 2005). El relieve ondulado y/o las rupturas de pendiente son rasgos que posibilitan el comienzo de la erosión lineal, ya que debe existir un cierto grado de pendiente para que el agua escurra (Castro - Vicuña, 1990; Freitas et al., 2013).

La forma de la ladera influye en la velocidad y distribución que pueda alcanzar el agua; todo

esto es tanto más cierto cuanto más desprovisto de vegetación se encuentra el terreno (Royo, 1989; Nájera, 2016). Por esta razón, la morfología de la vertiente favorece o retarda la erosión en una ladera.

La pendiente de las vertientes convexas aumenta progresivamente hacia la parte baja y por tanto, también el agua de escurrimiento, desarrollando una mayor tendencia a producir algún tipo de erosión. Sin embargo, al igual que las vertientes de perfil plano, la inclinación del perfil convexo tiende a disipar la energía del escurrimiento, siendo menos probable que se produzca la concentración del agua que escurre por ellas y se genere erosión de tipo lineal.

En cuanto al largo de las laderas, Kirkby - Morgan (2005), lo definen como la distancia desde el punto de origen del flujo sobre la superficie hasta el punto donde la pendiente disminuye lo bastante como para que ocurra la deposición o hasta el punto en que la escorrentía entra en un canal definido.

De acuerdo con Peralta (1977) y Lienlaf (2003), en las laderas largas hay más probabilidades de que la escorrentía superficial se concentre, y al ocurrir esto, aumenta su energía erosiva.

Kirkby – Morgan (2005) basándose en las afirmaciones de otros autores, establecen que a medida que la longitud de la pendiente aumenta se supone que la erosión es más grave. Sin embargo, Morgan (2005) indica que, debido a la gran cantidad de condiciones posibles, no puede existir una relación simple entre la pérdida de suelo y la longitud de la pendiente. En algunos casos, si el ángulo de la pendiente disminuye, las pérdidas de suelo descienden al aumentar la longitud como resultado de la deposición. El mismo autor señala que la erosión puede disminuir también, con el aumento de la longitud de la ladera si, como ocurre en pendientes escarpadas, el suelo tiene poca tendencia a formar costra y se mantiene la velocidad de infiltración más alta que en los terrenos de pendiente suave de la parte más alta de la ladera.

La exposición de laderas también está directamente relacionada con los procesos que producen la erosión, por una parte, por el diferente recalentamiento entre las laderas de exposición norte y las de exposición sur. Otra forma en que influye la exposición en la erosión, es por el desarrollo diferencial de la vegetación que se da en ambas laderas. Las vertientes de solana al estar expuestas durante mayor tiempo al sol, la retención de humedad es menor debido a la rápida evaporación, lo que implica una mayor sequedad. Esto influye en la cobertura vegetal, y es así como la densidad es menor y generalmente los suelos son más delgados (Donoso –Ghio 1986, Hernández et al. 2015).

De esta manera, las características descritas para las laderas de solana, fomentan la generación y desarrollo de procesos erosivos, con predominio de tipo lineal. Por otra parte, en las laderas de umbría, la humedad es mayor, lo cual posibilita el desarrollo de la vegetación y en consecuencia mejoran las condiciones del suelo, presentando de esta forma un menor potencial erosivo (Lienlaf, 2003).

➤ COBERTURA VEGETAL

Otro factor de importancia y que condiciona el proceso erosivo se relaciona con el tipo y estado de la cubierta del suelo. La erosión hídrica ocurre cuando los suelos están desprovistos de vegetación o esta se encuentra alterada (Kirkby y Morgan, 2005).

La efectividad de la vegetación para reducir la erosión de impacto depende directamente de la altura y continuidad de la copa de los árboles, así como la densidad de la cobertura superficial (pastos, hierbas y arbustos). Estudios demuestran que las hojas lobuladas, típicas de especies arbóreas latifoliadas, forman gotas cuyo diámetro dobla el de las gotas de lluvia (Brandt, 1989; Flanagan, 2013). Además, se dice que, a siete metros de altura de copa, las gotas que impactan el suelo lo hacen a una velocidad equivalente al 90% de su velocidad máxima, lo cual indica que, a mayor altura de copa, mayor erosión se produce.

El principal efecto de la cobertura vegetal, consiste en que la vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la precipitación y el suelo. La eficacia de una cubierta vegetal para reducir la erosión por impacto de las gotas de lluvia depende, sobre todo, de la altura y continuidad de la vegetación, y de la densidad de cobertura del suelo. Además, por medio de sus sistemas radiculares, le entrega resistencia al suelo y favorece la infiltración (Morgan, 2005).

En cuanto al mecanismo de protección, cuando las gotas de lluvia chocan contra la vegetación la energía de las gotas se disipa y no hay impacto directo sobre la superficie del suelo (Kirkby y Morgan, 2005). La vegetación provoca también efectos sobre la escorrentía, pues disipa la energía del agua en movimiento al aportar rugosidad al flujo y, en consecuencia, reduce su velocidad (Morgan, 2005).

De esta manera, la cobertura vegetal, cuando cubre una proporción suficiente de la superficie del suelo, puede jugar un papel importante en la reducción de la erosión. Una cubierta vegetal alterada aumenta las probabilidades de que se desencadenen procesos erosivos. El sobrepastoreo de las tierras conduce el debilitamiento de la cubierta de praderas y a la exposición del suelo desnudo (Kirkby y Morgan, 2005).

Las pendientes cubiertas completamente por vegetación, ya sea por praderas o bosques presentan una muy pequeña probabilidad de que se generen pérdidas de suelo. En FAO (1967) se plantea que las praderas perennes son la mejor cubierta vegetal posible para prevenir la erosión, puesto que una cubierta espesa de gramíneas disipa la energía de las gotas de lluvia, mantiene la humedad superficial del suelo, provoca que el avance del escurrimiento de agua sea más lento y, por lo tanto, produce una infiltración mayor y más prolongada.

➤ USO DE SUELO

La realidad actual hace que las características de las concentraciones de sedimento en los ríos dependan, casi exclusivamente, de las actividades humanas (manejo de la tierra) a nivel de

cuencas hidrográficas (García-Chevesich, 2008). El uso de la tierra es lejos el factor más importante dentro del conjunto de los factores que afectan la erosión y la sedimentación. Durante los últimos años se ha construido y urbanizado más terrenos que la suma de todas las áreas urbanas de los siglos anteriores (Terrence, 2002). Los sitios en construcción representan la actividad humana más devastadora, en términos erosivos, debido a la agresividad espacial y temporal asociada a éstos. Por esta razón, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha establecido estrictas regulaciones en cuanto al control de la erosión y la generación de sedimentos.

El hombre condiciona la erosión del suelo, ya que extrae de éste sus medios de subsistencia, por esto, el modo en que se utiliza la tierra también tiene gran influencia sobre la erosión del suelo y su productividad.

El uso del suelo es un elemento que adquiere gran importancia en aquellas áreas donde existe una tendencia natural al desarrollo de la erosión, por cuanto las actividades realizadas por el hombre, producen la pérdida de la cobertura vegetal protectora, así como de la capa orgánica, destruyen la estructura del suelo, lo que origina problemas de infiltración, todo lo cual desencadena la aceleración de los procesos erosivos y la destrucción de este recurso productivo; las probabilidades de que exista erosión del suelo son mayores en el caso de los cultivos que en de las praderas, en las que la vegetación crece de manera más densa (FAO, 2012). Sin embargo, la ganadería puede ser también el origen de graves deterioros del suelo si se dirige inadecuadamente. El exceso de pastoreo y el pisoteo destruyen la cobertura vegetal y la estructura superficial del suelo, produciendo erosión y degradación del medio (Fournier 1975, Nájera 2016)

6.3.2 MEDICIÓN DE LA EROSIÓN Y LA SEDIMENTACIÓN A NIVEL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Existen dos métodos para estimar la erosión y la sedimentación a nivel de cuencas hidrográficas: estimando los sedimentos en suspensión para correlacionarlos con el caudal, y midiendo la depositación de sedimentos en sectores específicos (Morgan, 2005).

La sedimentación producida en una cuenca, considerando la totalidad de los procesos de erosión y depositación, está representada por la cantidad de sedimentos que abandonan el área de drenaje a través de su río principal, en un período de tiempo dado. Para estimar la erosión de una cuenca, se deben establecer ciertas relaciones entre caudal y concentración de sedimentos. La exactitud de este método depende en gran medida de la frecuencia del muestreo. La mayoría de los estudios se basan en la toma de muestras de caudal en recipientes de volumen y peso conocidos, para luego llevarlos al horno y secarlos. Posteriormente, se determina la concentración de sedimentos por unidad de volumen de caudal (por ejemplo, gr/l). No obstante, es importante recordar que para cada ocasión se deben tomar al menos diez muestras, pues la variabilidad en los procesos erosivos es alta (García-Chevesich, 2008).

Por otro lado, también es común estimar tasas netas de erosión en cuencas por medio de la

acumulación de sedimentos en sectores donde la velocidad del caudal disminuye a tal punto que ocurre depositación. Dichos sectores pueden ser determinados en forma natural o artificial, para este propósito es fundamental conocer los niveles topográficos de los sedimentos depositados antes y después del período de tiempo en estudio. Además, es importante realizar las mediciones en los mismos puntos, pues la variabilidad espacial es un factor que debe omitirse (Sterk y Raats, 1996).

Para estimar la sedimentación en un canal específico, se deben establecer transectos de medición, en los cuales se determinará, cada cierto intervalo, la distancia entre el fondo del canal y la superficie de sedimentos, así como la distancia entre dicha superficie y la línea imaginaria que une ambos extremos del transecto. Posteriormente, al finalizar el período de tiempo determinado para el estudio, se estima la acumulación de sedimentos en los mismos puntos de medición anterior. De este modo, se determina un área para cada transecto, la cual se multiplica por la distancia entre estos, para determinar un volumen de sedimentos acumulados en el fondo del canal. Además, se debe estimar la densidad de los sedimentos en cuestión, mediante un muestreo aleatorio, determinando su variabilidad. (García-Chevesich, 2008).

6.3.3 MODELOS DE EROSIÓN

Existen numerosos modelos hidrológicos y erosivos, El modelo de Meyer y Wischmeier (1969), fue quizás el primero donde los resultados permiten apreciar la influencia que tiene la pendiente y la susceptibilidad del suelo en su erosión. Posteriormente, Foster y Meyer (1975) propusieron un que considera que la intensidad de erosión en una cárcava es linealmente proporcional a la diferencia entre la capacidad de transporte del flujo de escorrentía y el flujo total de sedimentos. Mediante las ecuaciones de transporte de Saint-Venant, surgieron diversos modelos como el modelo de Rose (Rose 1985, Sander y col. 1996), que supone que la intensidad de desprendimiento de sólidos es una función potencial de la intensidad de lluvia, Las simplificaciones aplicadas sobre las ecuaciones de transporte, despreciando los términos de aceleración local y convectiva, dan lugar a la expresión conocida como onda difusiva empleada en el modelo de Govindaraju y Kavvas (Govindaraju, 1995). Si además se desprecia el término de presión, se obtiene la onda cinemática, en la que se basa el modelo propuesto por Singh (Lane - col. 1988; Hernández, 2015).

Posteriormente, surgen modelos de solución numérica que se basan en los mismos principios de transporte, aunque emplean representaciones simplificadas de las características de las cuencas. Woolhiser y col. (1990) desarrollaron el modelo KINEROS, basado en la descomposición de la cuenca en planos, canales y embalses concatenados en cascada en las que el agua y los sedimentos circulan según la aproximación cinemática a las ecuaciones de transporte. Siendo un modelo de gran versatilidad, exige una gran información sobre la cuenca y sirve para episodios aislados.

El modelo EUROSEM (Morgan y col., 1998) es una adaptación de KINEROS con algunas mejoras. Es un modelo distribuido aplicable a parcelas y pequeñas cuencas, que simula bien los fenómenos de rotura de agregados, transporte y sedimentación de sedimento y predice la

escorrentía y la pérdida de suelo, ofreciendo como resultado hidrogramas y sedimentogramas de eventos de lluvia aislados.

Entre los modelos específicos de pérdida de suelo destaca la ecuación universal de pérdida de suelo, EUPS, (Wischmeier y Smith, 1958b, 1978), basada en medidas efectuadas realizadas durante más de cuarenta años por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. Aunque de carácter eminentemente práctico y simplificador, resume la amplia información adquirida durante esos años y a pesar de la difícil extrapolación de algunos de sus parámetros (e.g. Stocking y col, 1988.) ha sido usado con éxito en numerosas partes del mundo (e.g. Jansson 1982, § 16.3). Al mismo tiempo el modelo ha ido actualizándose, mejorando la definición de muchos parámetros. En la aplicación de dicho modelo se estiman seis factores que reflejan las influencias del clima R, de las características resistentes del suelo K, del relieve LS, de la cubierta de la superficie, C, y de las prácticas de protección, P: La pérdida media de suelo por unidad de tiempo A, suele expresarse en t/ha/año.

El factor climático R, fue determinado originalmente por Wischmeier y Smith (1958), como la suma anual para cada episodio de lluvia i , del producto de la energía cinética con la que las gotas de lluvia llegan al suelo E_c , por la intensidad máxima de precipitación registrada en períodos de 30 minutos.

El factor de erodibilidad K, estima la resistencia del suelo frente a los agentes erosivos, recogiendo la influencia de la textura y el contenido de materia orgánica. Sin embargo la relación más aceptada entre estas propiedades del suelo y su erodibilidad no representa bien el comportamiento de muchos tipos de suelos a la erosión hídrica (Hungry, 2001).

La topografía está expresada como el producto del factor de longitud de ladera L y el factor de pendiente S. En principio se usaron expresiones con parámetros empíricos. Posteriormente han sido propuestas diversas fórmulas alternativas de estimación del factor topográfico mejorando en ciertos aspectos las originales (McCool y col., 1987), aunque Moore y Burch (1986) demostraron con un modelo de erosión la bondad de las primeras.

El factor de cubierta C, resume la influencia de la cobertura vegetal, y de las prácticas de manejo del mismo sobre la erosión y ha sido muy empleado para comparar la repercusión que tienen las diferentes opciones de manejo en los planes de conservación, el factor C es estimado como una función de una serie de tres subfactores que resumen el impacto del cultivo previo y su manejo, la reducción de la erosión por la cubierta vegetal y la rugosidad del suelo, y la reducción de la escorrentía en lluvias de poca intensidad cuando la humedad precedente del suelo es baja (Renard y col., 1997)

El factor de prácticas de conservación P, estima la reducción de pérdida de suelo que se puede conseguir al aplicar alguna medida de protección. Al cociente entre la pérdida media de suelo y el factor de prácticas de conservación A/P, se le conoce como erosión potencial y representa la cantidad de suelo que puede llegar a erosionarse, independientemente de las técnicas de protección que se utilicen. (Ibáñez, 2012). En la figura 3 se establecen los

factores utilizados en determinación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la quebrada Hato Viejo.

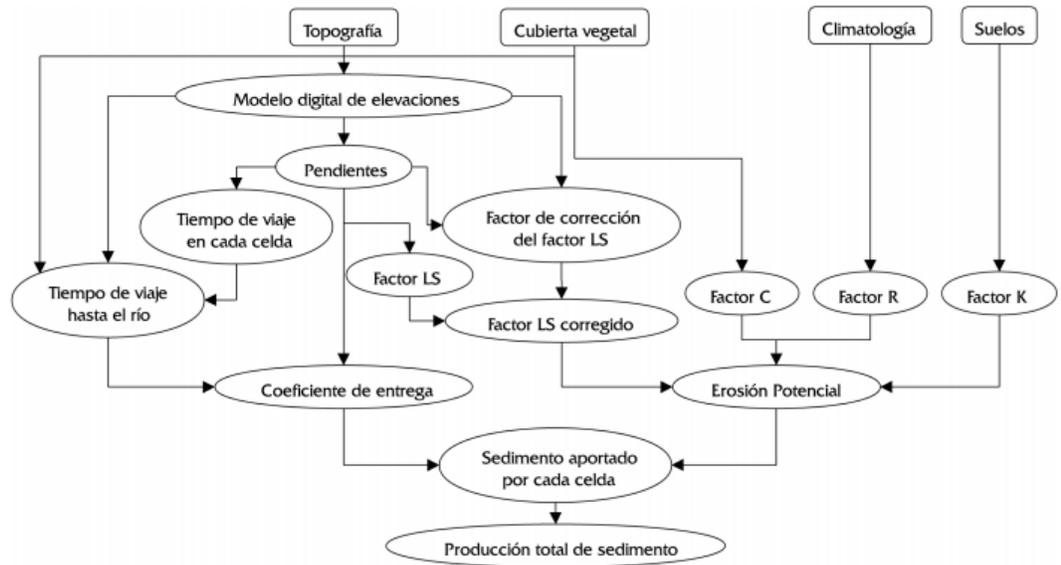


Figura 3. Estructura del modelo para la aplicación de la ecuación universal USLE

Fuente: Carvajal y Giráldez (2004)

6.4 MARCO LEGAL

La Constitución Política de 1991 establece el marco general para el uso, acceso y conservación de los componentes del ambiente (entre ellos el suelo); la misma, otorga una importancia fundamental al tema ambiental, al establecer como uno de los principios la obligación del Estado y de las personas de proteger las riquezas culturales y naturales de la nación.

Por otra parte, la Ley 99 de 1993 establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, le asigna dentro de sus funciones la de establecer los criterios ambientales que deben ser incorporados en la formulación de las políticas sectoriales y en los procesos de planificación de los demás Ministerios y entidades.

El Estado Colombiano ha firmado tratados, convenciones y declaraciones sobre protección ambiental, cabe destacar la Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente Humano, la Declaración de Nairobi (Kenia), la Declaración de Río de Janeiro sobre Ambiente y Desarrollo, el Convenio sobre Diversidad Biológica, el Convenio internacional de lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación y, la Cumbre mundial de Johannesburgo sobre Desarrollo Sostenible, donde

se ratificaron los compromisos para alcanzar un desarrollo sostenible y la obligación de los Estados de proteger los bienes ambientales, entre estos el suelo.

Específicamente, la Conferencia de las Partes (COP) en el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) determinó "fundar una iniciativa internacional para la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad del suelo como iniciativa fundamental transversal en el programa del trabajo sobre la biodiversidad agrícola, e invitó a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, y a otras organizaciones importantes, a que faciliten y coordinen esta iniciativa"

El Decreto Ley 2811 de 1974 señala que el uso de los suelos debe realizarse de acuerdo con sus condiciones y factores constitutivos y que se debe determinar el uso potencial y clasificación de los suelos según los factores físicos, ecológicos, y socioeconómicos de la región. Igualmente, señala que el aprovechamiento de los suelos debe efectuarse en forma tal que se mantenga su integridad física y su capacidad productora, lo cual es complementado con el deber de todos los habitantes de colaborar con las autoridades en la conservación y en el manejo adecuado de los suelos.

Mediante Resolución 0170 de 2009 del MADS se declaró el año 2009 como año de los suelos y el 17 de junio como Día Nacional de los Suelos; además se le asigna al Ministerio, entre otras la obligación de formular políticas y expedir normas, directrices e impulsar planes, programas y proyectos dirigidos a la conservación, protección, restauración, recuperación y rehabilitación de los suelos.

La Ley 388 de 1997, establece que, el ordenamiento del territorio se fundamenta en los siguientes principios: la función social y ecológica de la propiedad, la prevalencia del interés general sobre el particular y la distribución equitativa de las cargas y los beneficios. Igualmente, el ordenamiento del territorio municipal y distrital tiene por objeto complementar la planificación económica y social con la dimensión territorial, racionalizar las intervenciones sobre el territorio y orientar su desarrollo y aprovechamiento sostenible.

Por otra parte, la política nacional para la Gestión Integral Ambiental del Suelo (GIAS, 2013), hace énfasis en la necesidad de fortalecer la planificación ambiental que se desarrolla en el país, a partir de la inclusión del suelo desde su oferta ambiental, considerando sus vocaciones y aptitudes, y teniendo en cuenta sus vulnerabilidades frente a las amenazas de degradación, así como sus niveles de resiliencia, medidas de adaptación y de restauración.

Adicionalmente, el país cuenta con la Política Nacional de Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE, 2011), el Plan Nacional de Desarrollo Forestal, el Plan de Acción Nacional de Lucha Contra la Desertificación y la Sequía en Colombia, La Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible, El Plan Nacional de Restauración, y la Política Nacional del Recurso Hídrico (2010).

7. METODOLOGIA

La metodología planteada parte de una estructura lógica, integral y secuencial que permite el desarrollo de actividades tendientes a la elaboración del estudio de la identificación y evaluación de la degradación de suelos por erosión a escala local de la microcuenca Hato viejo, el cual se constituirá en una fase de zonificación, caracterización biofísica, análisis y evaluación de los proceso de degradación de suelos por erosión.

7.1 RECONOCER LOS PRINCIPALES FACTORES FÍSICOS Y ANTRÓPICOS DESENCADENANTES DE LA EROSIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Para determinar los factores físicos y antrópicos que influyen en los procesos erosivos en la quebrada Hato Viejo, se realizó la zonificación de campo y se hizo un análisis de las precipitaciones, geología, suelo, cobertura y usos del suelo.

➤ ANÁLISIS DE LAS PRECIPITACIONES

Respecto a la degradación de los suelos por erosión, se partió de la clasificación de sensibilidad respecto al tipo de clima representado en las unidades espaciales, a partir del análisis de frecuencia de la precipitación y de la intensidad de las lluvias partiendo de los datos de precipitación diaria obtenidos del satélite TRMM para serie de tiempo de 20 años en un área comprendida por las coordenadas $-72.6583, 7.1434, -72.6202, 7.1824$ correspondiente al área de la cuenca de la quebrada Hato Viejo (figura 4), a partir de la serie de datos obtenidos se realizó un proceso donde se determinó la precipitación máxima en 24 horas, determinando el coeficiente pluviométrico, curva masa, curvas IDF para diferentes periodos de retorno.

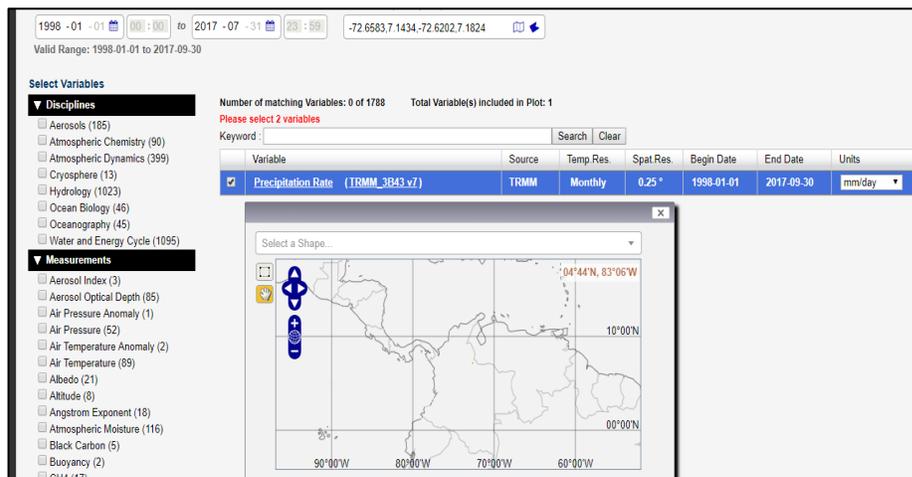


Figura 4. Solicitud de serie de datos de precipitación diaria satélite TRMM
Fuente: Solano V, (2017)

➤ GEOLOGIA

La geología es uno de los factores determinantes en los procesos erosivos para determinar la litología presentes en la zona de estudio se adquirió la plancha 110 a una escala 1:100000 de la base de datos del Servicio Geológico Colombiano, se procesó en el software ArcGis 10.2.2, el proceso de extracción perteneciente al área de estudio y mediante trabajo de campo, se verificó y se complementó las formaciones litológicas y geomorfológicas presentes.

➤ SUELOS

Para la determinación de este factor en la zona de estudio, se tomaron 6 muestras representativas aleatorias de sedimentos transportados por el cauce y del suelo presente en los deslizamientos de mayor magnitud. Las muestras se cuartearon en campo, obteniendo una muestra representativa de 2 kg, después de secada con la que se realizó los análisis de granulometría respectivo para cada muestra (figura 5), y posteriormente la clasificación de suelos según el sistema unificado de clasificación de suelos USCS



Figura 5. Proceso análisis granulométrico de los sedimentos de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

➤ COBERTURAS

Se obtuvieron las imágenes Landsat 8 (figura 6) de la USGS de diferentes años, que fueron procesadas con correcciones atmosféricas y geométricas y la aplicación de una máscara de nubes y a partir de una clasificación supervisada en el software Arcgis 10.2.2 y contrastada con trabajo de campo se establecieron las coberturas pertenecientes al área de influencia, evaluando como ha cambiado en el tiempo y como ha influido en los procesos erosivos.



Figura 6. Imagen landsat 8
Fuente: USGS, (2017)

➤ USO POTENCIAL DEL SUELO

En la determinación del uso potencial, se utilizó el Modelo de Digital de Elevación (MDE) de la microcuenca obtenido de la USGS con un pixel de 12,5 m; luego, se procedió a generar el mapa de pendientes en valores porcentuales, por medio del programa de análisis espacial ArcGis 10.2.2, cuya aplicación para el análisis se utilizó la herramienta >Slope, generando un mapa con la inclinación en porcentaje, se reclasificó Spatial Analyst>Surface Analysis>reclass determinando el potencial que tiene una unidad específica de suelo para ser utilizada en forma sostenida sin afectar su capacidad productiva.

Para el caso del uso del suelo, se analizaron los sistemas productivos y los usos del suelo apoyados por imágenes satelitales Landsat 8 y trabajo de campo.

7.2 ANALISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LA CUENCA QUE INFLUYEN EN LOS PROCESOS EROSIVOS.

Se empleó el software ARCGIS mediante un modelo digital de elevación obtenido de la USGS se determinaron los parámetros físico morfométricos de la cuenca (figura 7) como: Curva hipsométrica, Ancho, Factor forma coeficiente de compacidad (K_c), Factor de forma, Sistema de Drenaje, Densidad de drenaje, Extensión media de la escorrentía, Sinuosidad de las corrientes de agua. Características del relieve, Pendiente, Elevación media, Pendiente de la corriente principal, Tiempo de concentración y se evaluó su influencia en los procesos erosivos presentes en la zona de estudio.

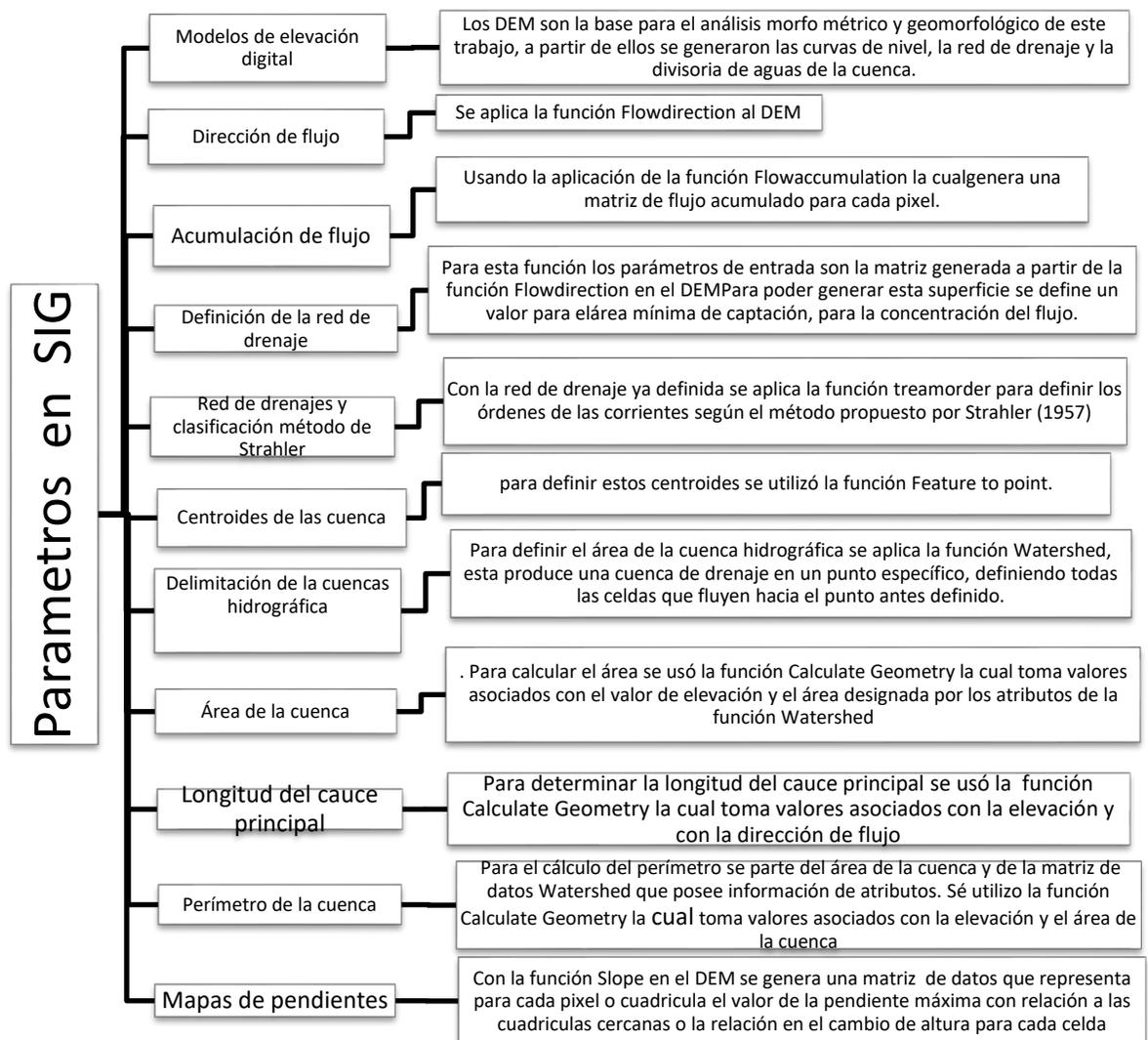


Figura 7. Parámetros morfométricos calculados en Arc-Gis 10.2.2 para la microcuenca Hato Viejo.
Fuente: Solano V, (2017)

7.3 EVALUACIÓN DE LOS FACTORES DETERMINANTES DE LA DEGRADACIÓN DE SUELOS POR EROSIÓN

➤ ESTIMACIÓN DE LA PERDIDA DE SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO RUSLE

Para el análisis de la pérdida de suelo en la quebrada Hato Viejo se determinaron los factores: LS, P, C, K, R. Así mismo, en la figura 8 se da el esquema de la metodología implementada para la obtención de la pérdida de suelo.

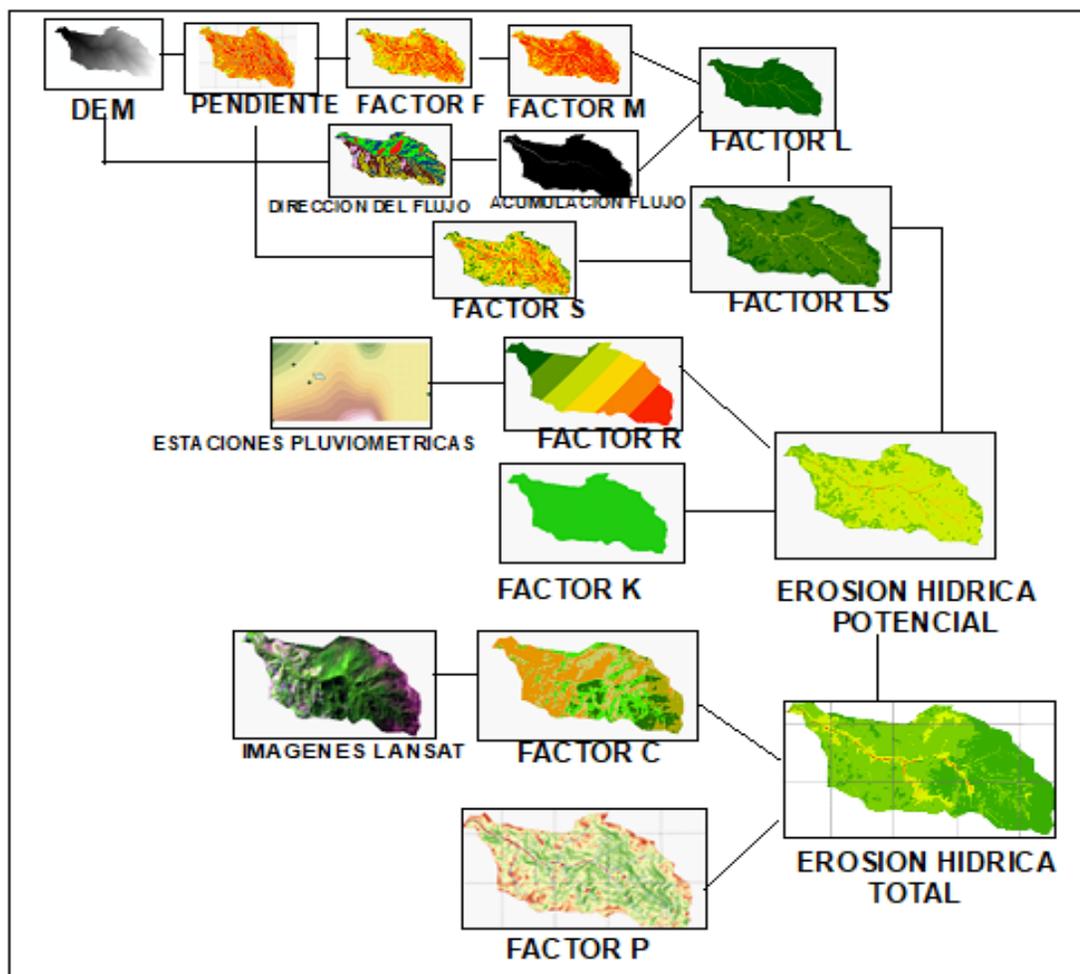


Figura 8. Esquema de los factores empleados en la estimación de pérdida del suelo mediante USLE

Fuente: Solano V, (2017)

➤ CALCULO FACTOR R Y CONSTRUCCIÓN DEL MAPA INDICE DE AGRESIVIDAD DE LLUVIAS

Para estimación del factor R, se utilizaron las precipitaciones medias mensuales de 4 estaciones pluviométricas (Chitagá, Presidente, Campo Hermoso, Rincón) cercanas a la zona de estudio (ver figura 9), las cuales fueron suministrados por el IDEAM; luego, se evaluaron los eventos mensuales por estación para determinar la intensidad en 30 minutos, y así determinar la energía unitaria, posteriormente, se obtuvo el mapa del Factor R y por último, se llevó a cabo la interpolación del factor R (figura 10)

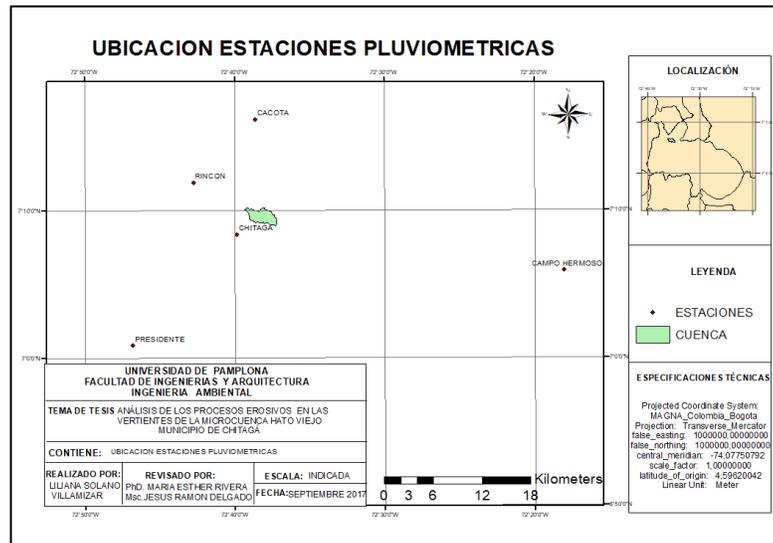


Figura 9. Ubicación estaciones pluviométricas (Chitagá, Presidente, Campo hermoso, Rincón)
Fuente: Solano V, (2017)

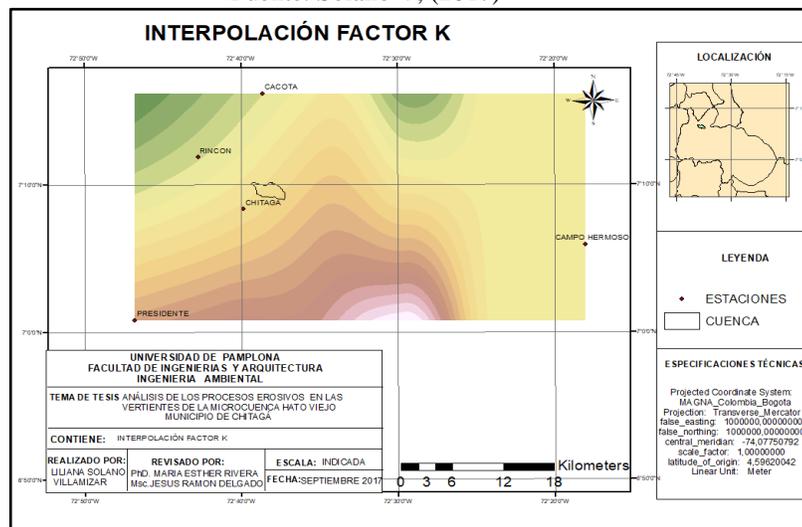


Figura 10. Interpolación factor R de las estaciones pluviométricas (Chitagá, Presidente, Campo hermoso, Rincón)
Fuente: Solano V, (2017)

➤ **CALCULO FACTOR K**

El Factor K o erodabilidad del suelo se determinó el potencial erosionable que tienen los suelos en la micro cuenca Hato Viejo y para ello, se tuvo en cuenta contenido de arena, limo, arcilla y carbono orgánico (ver ecuación 11), descargando el mapa edafológico elaborados por la FAO con información sobre las unidades de suelo. Para las zonas donde se encuentran macizos rocosos se determinó el factor K de acuerdo a los tipos de rocas formadoras superficiales de acuerdo a la clasificación establecida por Wischmeier y Smith (1978) establecidos en la tabla 1, se procedió a extraer el área en estudio utilizando el programa ArcGis 10.2.2, generando un mapa de los suelos existentes y se le asignó los valores respectivos de acuerdo a la unidad de suelo presente, para proceder a realizar el cálculo de la erodabilidad en la micro cuenca.

$$k = 0,1317 \times \%arena \times \%limoarcilla \times \%carbono\ orgánico \times \%arena \quad Ec (11)$$

Tipos de rocas formadoras del substrato superficial o litofacies	Rango del factor K (máx. – mín.)
Rocas correspondientes al estrato cristalino (granito, gneis) y rocas basálticas.	0,05 – 0,15
Rocas silíceas compactas (metamórficas, areniscas duras, cuarcitas)	0,10 – 0,25
Rocas sedimentarias bien consolidadas (calizas duras, dolomías, calcarenitas)	0,20 – 0,40
Rocas sedimentarias blandas (margas, yesos, formaciones flysh, calizas poco consolidadas, areniscas disgregables)	0,40 – 0,60
Rocas cuaternarias (depósitos recientes)	0,40 – 1,00

Tabla 1. Factor K según el tipo de roca formadora del substrato superficial
Fuente: Wischmeier y Smith (1978)

➤ **CALCULO FACTOR LS**

Se calcularon el grado de la pendiente en porcentaje (S), así como la longitud de la pendiente (L), para la obtención del factor S, así mismo, se procedió mediante el Modelo de Digital de Elevación (MDE) de la microcuenca, se generó el mapa de pendientes en valores porcentuales, por medio del programa de análisis espacial ArcGis 10.2.2, mediante la herramientas Spatial Analyst>Surface Analysis>Slope, generando un mapa con la inclinación en porcentaje. Para la obtención del factor LS, se multiplicaron los mapas de factor L y S, mediante el Sistema de Información Geográfica del programa ArcGis empleando la herramienta Spatial Analyst/raster calculator, Cuyo resultado fue un raster del factor LS con una resolución espacial de 12,5 metros.

➤ CALCULO FACTOR C

En la determinación del factor C se trabajó la imagen Landsat 8 de la USGS, la cual fue procesada con correcciones atmosféricas y geométricas y la aplicación de una máscara de nubes para obtener el Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI), 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, posteriormente mediante una clasificación supervisada se establecieron 9 categorías de coberturas para la zona de estudio verificadas en campo (figura 11).

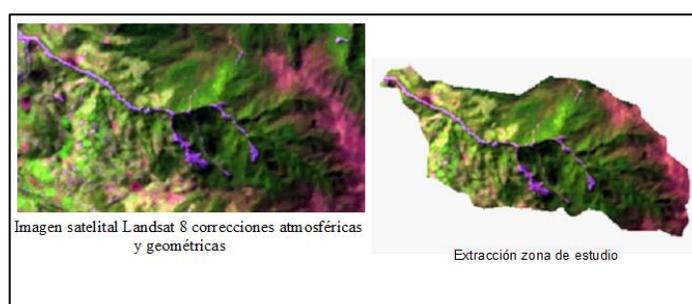


Figura 11. Determinación de coberturas para la microcuenca Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

Para obtener los diversos usos de suelos se reclasifica utilizando la clasificación propuesta por Dumas Salazar (2012), la cual se presenta a continuación en la tabla 2 que representa el factor c respecto al tipo de cobertura según la metodología Land Cover.

USO DEL SUELO CORINE LAND COVER	FACTOR C
Zonas industriales o comerciales	1,0
Zonas de extracción minera	1,0
Viñedos	0,525
Tierras de labor seco	0,435
Terrenos regados permanentemente	0,507
Terrenos principalmente agrícolas con vegetación natural	0,435
Tejido urbano discontinuo	1,0
Tejido urbano continuo	1,0
Pastizales naturales	0,130
Olivares	0,525
Mosaico de cultivos	0,435
Matorrales esclerófilos	0,153
Matorral boscoso en transición	0,153

Lámina de agua	0,0
Frutales	0,525
Espacios con vegetación escasa	0,9
Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes	0,435
Bosque mixto (inferior al 2%)	0,186
Bosque mixto (>2% hasta 7%)	0,086
Bosque mixto (superior al 7%)	0,041
Bosque de frondosas (inferior al 2%)	0,186
Bosque de frondosas (>2% hasta <7%)	0,086
Bosque de frondosas (superior al 7%)	0,041
Bosque de coníferas (inferior al 2%)	0,186
Bosque de coníferas (>2% hasta <7%)	0,086
Bosque de coníferas (superior al 7%)	0,041

Tabla 2. Factor c para coberturas según clasificación Land Cover
Fuente: Salazar (2012)

➤ CALCULO FACTOR P

El factor P se obtiene a partir del Modelo digital de Elevación, el cual en primera instancia mediante el software ArcGis 10.2.2 se le debe aplicar la herramienta Slope para calcular su pendiente en porcentaje, para la asignación de los valores de P se ha tenido en cuenta la tabla de valores del factor P formulada por Wischmeier y Smith (Sik Kim, 2006), en la cual se relacionan los valores de P de acuerdo a la pendiente del terreno, la geoforma del mismo y su uso, se muestra a continuación en la tabla 3

Pendiente del terreno (%)	Cultivo en contorno	Cultivo en franjas de contorno y surcos irrigados	Terraceo
1-2	0.6	0.3	0.12
3-8	0.5	0.25	0.1
9-12	0.6	0.3	0.12
13-16	0.7	0.35	0.14
17-20	0.8	0.4	0.16
21-25	0.9	0.45	0.18

Tabla 3. Valores factor P
Fuente: Wischmeier y Smit (1978)

SUSCEPTIBILIDAD DE EROSION EN LADERAS

Para el cálculo de susceptibilidad de erosión en vertientes en la quebrada Hato Viejo se definieron los factores o variables que intervendrán en la susceptibilidad definidos en la figura 12.

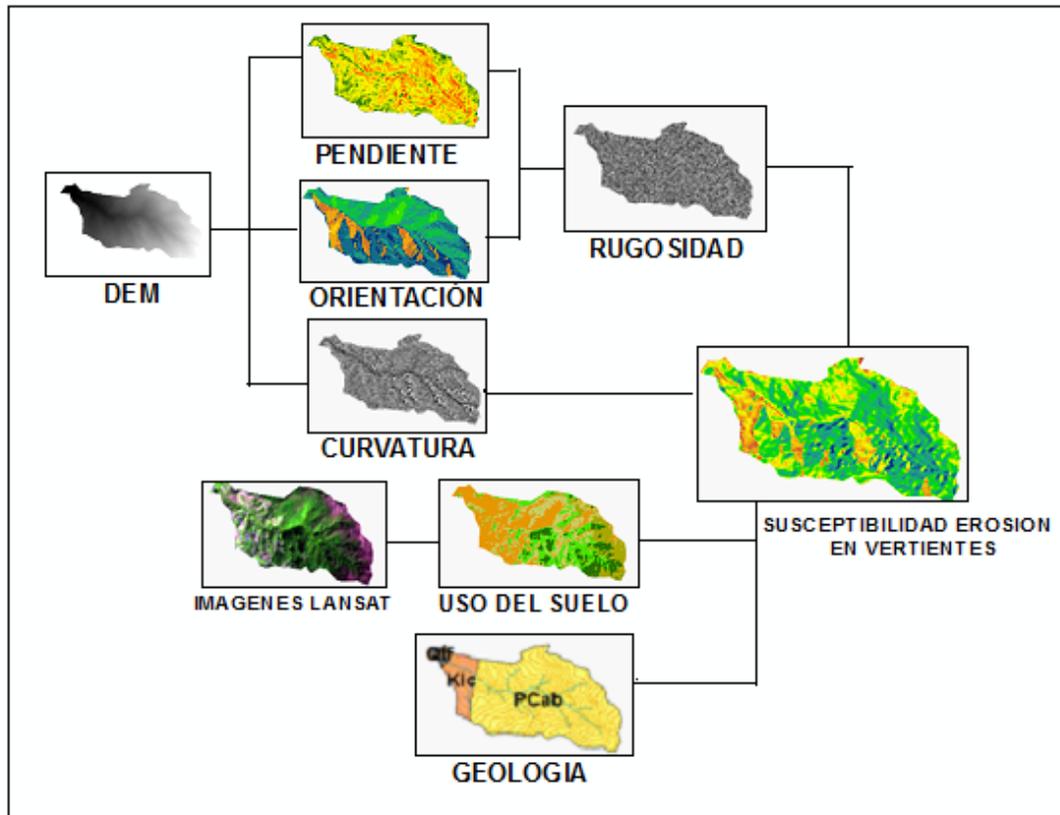


Figura 12. Esquema de factores empleados en la determinación de la susceptibilidad de erosión en laderas
Fuente: Solano V, (2017)

Para la determinación de la pendiente, orientación y curvatura se empleó el software ArcGIS 10.2.2 que mediante la función hydrology y a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) se calcularon las variables mencionadas, posteriormente con base en la orientación y pendiente se determinó la rugosidad del terreno

Para determinar las variables de litología y geotecnia se obtuvo la plancha geológica 110 del servicio geológico Colombiano correspondiente a la zona de estudio para extraer la información correspondiente a la litología, geomorfología y se complementaron con la observación de campo para establecer la geotecnia de los suelos presentes en la micro cuenca, posteriormente al obtener las variables requeridas para el análisis de la susceptibilidad, se implementó la técnica de evaluación multicriterio implementada en SIG y aplicada a la susceptibilidad a movimientos de ladera donde se le asigna la ponderación establecida mediante el método AHP en base a la opinión de expertos otorgan más

importancia a la pendiente:0,398, seguido de la litología: 0,203, la geotecnia:0,159, rugosidad:0,143, curvatura:0,060 y por último los usos del suelo:0,034. Una vez obtenidos los pesos de los factores, se obtiene finalmente un índice de susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante la suma lineal ponderada (Hervás de Diego y Barredo Cano, 2001).

AMENAZA DE EROSION EN LADERAS

Para el análisis de amenaza por erosión en laderas se evaluaron 2 detonantes la precipitación y la sismicidad para establecer la amenaza se combinaron la susceptibilidad los detonantes, utilizando las tablas relacionales presentadas en Llorente y palacios (2010) por su fácil aplicación, los mapas resultantes se superpusieron para obtener el mapa de la amenaza total

Susceptibilidad	Detonante	Amenaza
Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
Muy Alto	Alto	Muy Alto
Muy Alto	Medio	Alto
Muy Alto	Bajo	Medio
Alto	Muy Alto	Muy Alto
Alto	Alto	Alto
Alto	Medio	Alto
Alto	Bajo	Medio
Medio	Muy Alto	Alto
Medio	Alto	Alto
Medio	Medio	Medio
Medio	Bajo	Bajo
Bajo	Muy Alto	Medio
Bajo	Alto	Medio
Bajo	Medio	Bajo
Bajo	Bajo	Bajo
Muy Bajo	Muy Alto	Bajo
Muy Bajo	Alto	Bajo
Muy Bajo	Medio	Muy Bajo
Muy Bajo	Bajo	Muy Bajo

Tabla 4. Ssusceptibilidad y el detonante sísmico de precipitación en la estimación de la amenaza de movimientos de ladera.

Fuente: Llorente y Palacios (2010)

Para la determinación de la sismicidad en la zona de estudio se descargó del Servicio Geológico Colombiano el mapa de sismicidad en función de la aceleración, y para la precipitación utilizaron se utilizaron las precipitaciones máximas mensuales de 4 estaciones pluviométricas (Chitagá, Presidente, Campo hermoso, Rincón) y se complementó con el análisis de los datos satelitales TRMM donde se obtuvieron una serie de datos para el área de estudio a partir de los datos obtenidos se la precipitación máxima para diferentes periodos de retorno y se utilizó la interpolación con Arc Gis, IDW (Ponderación de distancia inversa) para determinar la precipitación máxima en el área comprendida por la micro cuenca Hato Viejo.

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Para el mapa de la tasa anual promedio de producción de sedimento por erosión superficial o tasa de erosión superficial potencial específica de la microcuenca Hato Viejo, se adoptó un tamaño de celda de 12,5 metros por 12,5 metros, con el criterio de definir adecuadamente la información.

Para llevar a cabo esta operación fue necesario contar con imágenes raster de cada una de las variables que intervienen en la fórmula de cálculo. Luego se operó entre ellas, calculándose el valor WC para cada casilla

Aún en las situaciones en las que la erosión superficial es la principal fuente de sedimentos, la diferencia entre valores medidos y calculados es importante para tal fin se realizaron mediciones de niveles y secciones en el cauce (figura 13) para evaluar la socavación y sedimentación del cauce, se establecieron miras en 5 puntos críticos donde la erosión pluvial se ha presentado en mayor proporción.



Figura 13. Medición de niveles y secciones, A- sección punto 3 lugar Cascaral, B- Mira 1 lugar La Esperanza.

Fuente: Solano V, (2017)

8. RESULTADOS

8.1 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LA CUENCA QUE CONTROLAN LOS PROCESOS EROSIVOS.

En el comportamiento de la cuenca inciden las características geomorfológicas propias de la cuenca, la mayor parte de estas propiedades actúan incrementando el volumen del flujo y la velocidad de su movimiento. (Ward y Robinson, 2000).

La cuenca de la quebrada Hato Viejo es una cuenca pequeña con 5,1 km² y perímetro de 11,66 km, se puede observar que al ser el factor de forma un valor bajo 0,55 se estima que la cuenca es menos propensa a que una tormenta cubra toda la superficie. El Índice de Compacidad (Kc) de 1,44, según la Relación de Forma de Horton (Rf) de 0,2058 nos indica que la cuenca es oval oblonga (Mármol, 2008).

De la tabla 5 y 6 se infiere que las características físicas, de relieve, forma indican es una microcuenca con pendientes abruptas y escarpadas, además se observa que el agua captada tiene recorridos cortos con escurrimientos rápidos, es decir, la recarga de agua es escasa, además por ser una cuenca oval oblonga tiende a presentar un flujo de agua más rápido en comparación con las cuencas alargadas logrando la evacuación del agua más rápido, lo cual se corrobora con lo dicho por Vich (1996).

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Área	km ²	5,104199
Perímetro	km	11,664194
COTAS		
cota mínima	msnm	2085
cota máxima	msnm	3655
CENTROIDE PCS: GCS_MAGNA		
x_centroide	m	760974,72
y_centroide	m	792172,99
z_centroide	msnm	2925,30
ALTITUD		
altitud media	msnm	2925,3
altitud más frecuente	msnm	2865
altitud de frecuencia media	msnm	2870
Pendiente		
pendiente promedio de la cuenca	%	29,59

DE LA RED HIDRICA		
longitud del curso principal	km	4,98
orden de la red hídrica	und	3
longitud de la red hídrica	km	12,112
pendiente promedio de la red hídrica	%	6,4

Tabla 5. Características morfométricas de la microcuenca de la quebrada Hato viejo
Fuente: Solano V, (2017)

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR	MÉTODO USADO
Factor forma	Kf	Adimensional	0.205811	Aritmético
Índice de compacidad	Kc	Adimensional	1.4456	Aritmético
Índice de homogeneidad	ih	Adimensional	0.5720839	Aritmético
Índice de alargamiento	ia	Adimensional	1.8166201	Aritmético
Relación de bifurcación	Rb	Adimensional	0.9772727	Aritmético
Densidad de drenaje	D	Km^{-1}	2.3730208	Aritmético
Pendiente	S	Adimensional	29.59	Aritmético
Frecuencia de cauces	F	Km ²	8.42443643	Aritmético
Pendiente media del cauce	Pm	Adimensional	0.315261044	Aritmético
elevación media	E	Metros	2925.3	Aritmético
Coeficiente de masividad	cm	Adimensional	0.54955	Aritmético
Coeficiente orográfico	Co	Adimensional	16.08	Aritmético

Tabla 6. Parámetros geomorfológicos de la microcuenca de la quebrada Hato viejo
Fuente: Solano V, (2017)

La topografía de la cuenca puede tener más afluencia sobre la respuesta hidrológica que la forma de la misma (Vich, 1996). Siendo estos parámetros de relieve determinantes en el análisis de los procesos erosivos presentes en la microcuenca de la quebrada Hato Viejo, por presentar gran cantidad de escurrimiento aumenta la capacidad de coleccionar agua y mayor erosión, además a mayor pendiente mayor velocidad de desplazamiento del agua, menor tiempo de concentración y menor infiltración.

Con respecto a los parámetros de relieve se determina que es una cuenca montañosa con altitudes medias y elevadas, el relieve es accidentado que presenta un Coeficiente Orográfico de 16,08 y con pendientes de la cuenca muy pronunciadas con un promedio de 29,59 % (figura 14) y del cauce principal de 6,4%. En la figura 15 se representa la Curva Hipsométrica para una cuenca en fase de madurez.

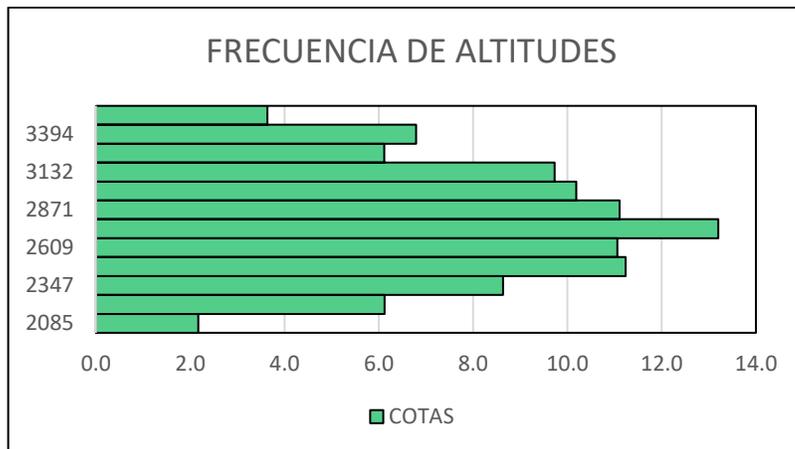


Figura 14. Frecuencia de altitudes de la microcuenca de la quebrada Hato viejo
Fuente: Solano V, (2017)

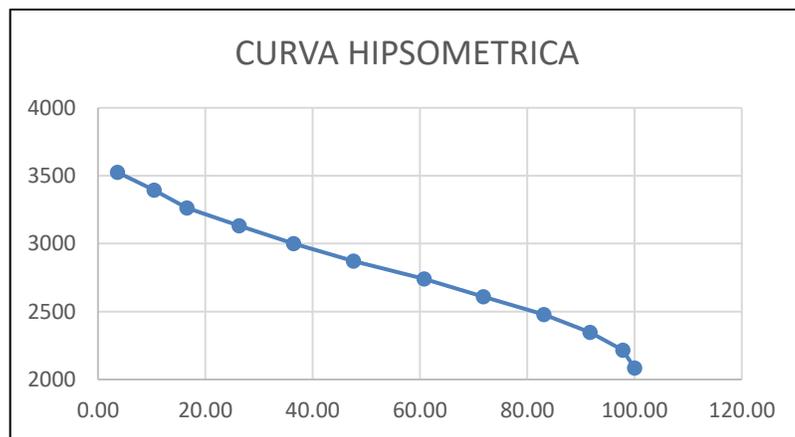


Figura 15. Curva Hipsométrica de la microcuenca de la quebrada Hato viejo
Fuente: Solano V, (2017)

En la tabla 7 se observa que el orden es 3 y longitud de la red de drenaje de la microcuenca Hato Viejo es 12,11 km, indicando mayor energía y mayor control estructural y en general, mayor erosión (figura 16)

ORDEN	LONGITUD (Km)
1	7,62352469
2	1,35428652
3	3,13455924
TOTAL	12,1123704

Tabla 7. Orden, longitud de la red de drenaje de la microcuenca Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

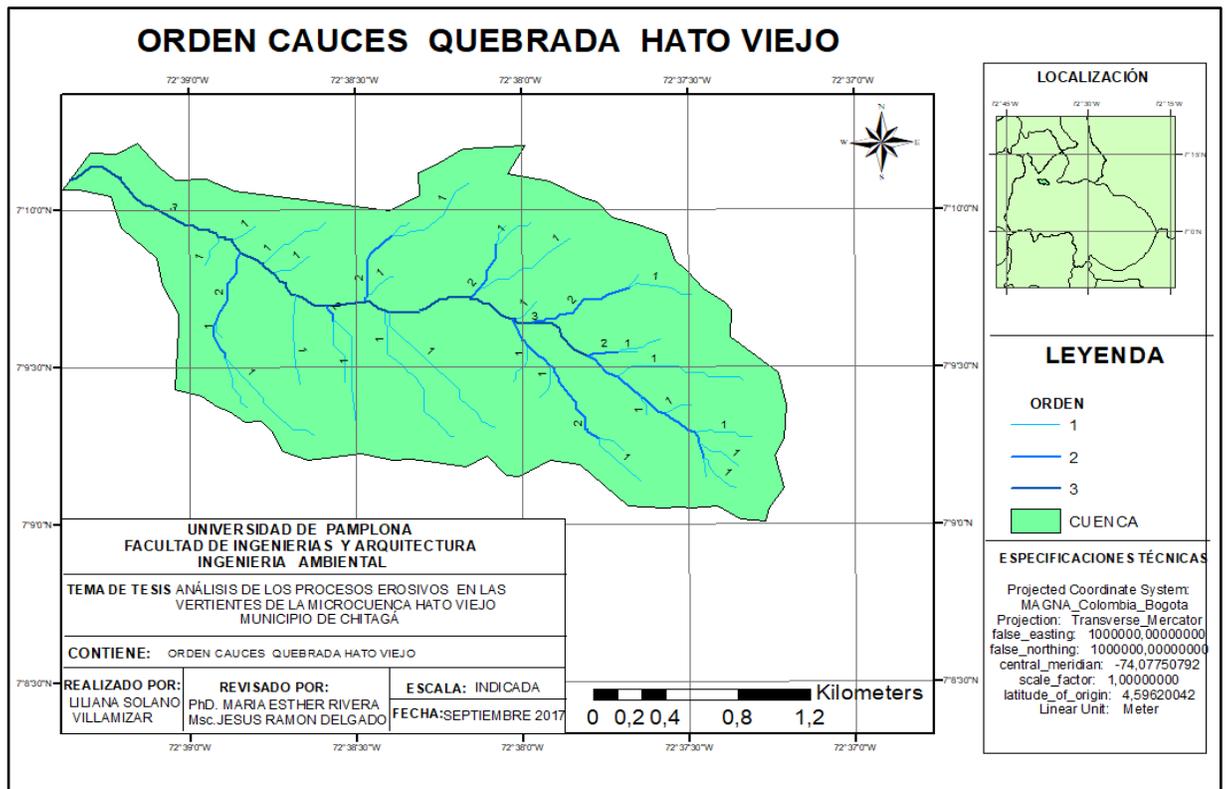


Figura 16. Mapa orden de drenajes para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

8.2 FACTORES FÍSICOS Y ANTRÓPICOS DESENCADENANTES DE LA EROSIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

ANÁLISIS DE LAS PRECIPITACIONES

Los movimientos de ladera causados por lluvias están relacionados con el volumen, intensidad y distribución de dichas precipitaciones. En consecuencia, es importante analizar las precipitaciones mensuales y anuales disponibles para la microcuenca Hato Viejo en el periodo 1998 - 2016 (Tabla 8), se observó que cae una precipitación media mensual de aproximadamente 173,1 mm/mes. Este valor, comparado con las precipitaciones del resto del país, lo sitúa entre las zonas con altas precipitaciones. Además, se observa (Figura 17), la región se caracteriza por tener dos estaciones; una seca, de noviembre a abril, y otra lluviosa, de mayo a octubre.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1998	55.5	128.1	112.0	235.9	264.4	266.7	229.9	202.9	207.4	279.2	248.4	167.1
1999	110.3	185.6	104.6	238.6	177.6	252.7	187.8	223.1	288.5	282.5	232.7	140.0
2000	107.4	119.5	152.9	203.0	236.3	218.6	218.1	165.1	293.3	245.3	212.8	121.1
2001	23.2	48.0	100.1	142.6	205.0	205.5	199.3	183.1	237.4	289.9	167.0	101.0
2002	61.1	35.5	180.8	225.0	272.7	263.3	169.1	133.4	190.8	175.1	122.0	89.8
2003	29.1	72.2	139.5	212.2	155.5	231.6	228.1	146.6	210.5	258.4	214.5	128.7
2004	57.2	58.5	115.3	220.0	303.1	286.5	194.9	238.5	295.3	248.2	200.6	106.5
2005	132.3	111.9	53.0	181.5	269.6	214.3	183.2	137.0	177.5	267.5	240.1	74.9
2006	100.1	69.7	164.4	236.2	291.2	230.4	220.1	216.3	213.5	288.4	160.2	98.6
2007	56.4	79.9	136.9	149.6	227.9	233.2	196.1	273.3	223.1	280.8	148.9	105.5
2008	74.6	88.4	105.2	196.5	313.4	242.0	186.2	261.6	176.1	311.9	245.1	124.1
2009	67.3	114.8	173.9	205.0	256.3	220.9	200.2	169.4	180.4	180.4	137.5	64.0
2010	22.0	51.3	83.8	174.7	287.3	242.1	209.8	216.6	281.8	293.6	283.4	245.5
2011	124.1	134.9	106.8	277.5	350.2	244.9	218.6	178.5	183.5	224.2	233.9	181.3
2012	54.6	37.3	135.5	262.7	265.1	212.4	193.0	190.5	176.6	290.9	142.9	105.5
2013	43.5	116.1	120.8	186.0	293.0	252.3	184.4	178.0	164.8	141.9	175.3	87.5
2014	32.5	104.8	74.1	131.3	166.0	156.5	219.0	154.2	143.4	188.1	167.8	61.7
2015	47.4	107.9	95.7	138.8	110.7	163.5	196.0	78.0	144.5	118.6	163.6	65.2
2016	36.4	47.6	70.6	184.8	151.5	170.4	150.8	133.8	136.3	146.3	221.6	94.3

Tabla 8. Precipitación total mensual para la microcuenca Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

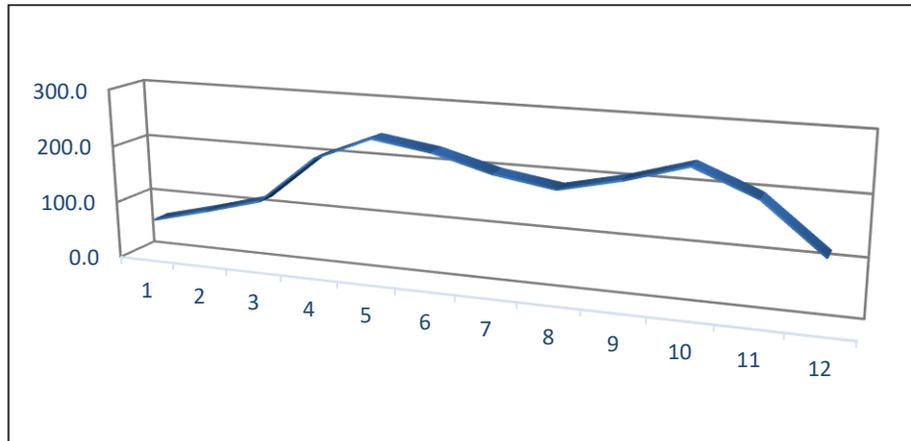


Figura 17. Distribución mensual de las precipitaciones en la microcuenca Hato Viejo.
Fuente: Solano V, (2017)

Partiendo de la hipótesis que a mayor lluvia diaria máxima, mayor es la probabilidad que se detone y se presenten procesos erosivos en la cuenca, se evaluaron las precipitaciones máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno, para lo cual se seleccionaron las

precipitaciones máximas (Tabla 9) de la base de datos del satélite TRMM para una serie de datos.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1998	33.4	30.8	29.0	41.0	43.5	73.2	37.9	37.7	39.0	58.9	17.6	25.0
1999	52.0	45.5	34.4	32.2	21.2	34.0	57.1	30.9	50.1	38.5	84.9	12.0
2000	29.1	58.9	41.0	71.9	41.6	40.9	72.1	36.5	52.1	40.0	39.7	71.0
2001	5.0	5.7	28.4	36.1	60.0	43.6	42.5	57.8	44.3	54.6	18.6	31.1
2002	28.2	5.5	39.3	79.8	42.4	34.0	35.3	36.7	37.0	29.0	27.8	28.3
2003	5.2	21.5	42.6	28.3	39.9	40.1	41.5	29.1	34.7	31.3	44.8	37.9
2004	34.5	16.6	17.2	42.7	46.3	62.1	39.6	60.8	56.8	29.9	108.4	16.3
2005	62.6	98.5	15.0	28.8	68.4	30.8	27.5	30.3	38.0	33.7	51.1	1.7
2006	55.0	31.0	40.9	47.8	65.8	23.7	57.9	47.8	68.4	72.5	53.5	22.4
2007	8.7	71.2	34.2	24.3	39.0	56.9	43.9	35.8	39.9	65.1	25.3	24.6
2008	2.9	13.1	30.4	54.8	105.8	55.9	39.6	52.0	32.6	43.8	48.5	12.1
2009	24.3	25.7	51.7	35.6	69.7	56.7	49.8	24.8	22.7	52.8	30.2	6.3
2010	10.5	20.1	20.2	32.5	51.0	29.7	37.6	37.7	59.6	74.1	59.8	24.4
2011	20.7	61.0	20.3	48.5	52.2	44.5	30.1	31.4	22.6	26.8	30.7	25.4
2012	20.3	10.0	19.2	77.8	43.8	42.3	22.9	30.6	40.8	55.9	41.0	13.5
2013	7.9	16.2	26.8	72.8	71.9	89.8	45.4	31.6	29.7	13.1	28.3	5.6
2014	6.2	58.0	8.1	23.9	47.1	26.3	23.6	40.7	29.9	40.0	56.5	10.3
2015	17.8	48.8	16.5	29.3	17.1	39.2	41.2	13.4	44.4	36.6	41.0	27.7
2016	12.7	19.3	15.8	55.0	27.3	53.7	32.9	46.0	22.5	35.9	44.8	36.7

Tabla 9. Precipitación máxima mensual para la microcuenca Hato Viejo

Fuente: Solano V, (2017)

Las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Témez, 1978). Junto con la definición de las curvas, surgen otros elementos a considerar, como son la intensidad de precipitación, la frecuencia o la probabilidad de excedencia de un determinado evento para la microcuenca Hato Viejo se establecieron las curvas IDF (Figura 18). Para determinar las precipitaciones y conocer su distribución temporal, para determinar la agresividad de las lluvias en la zona de estudio, en base a las intensidades de precipitación, para distintos períodos de retorno y así evaluar el índice de erosividad de la lluvia para diferentes frecuencias.

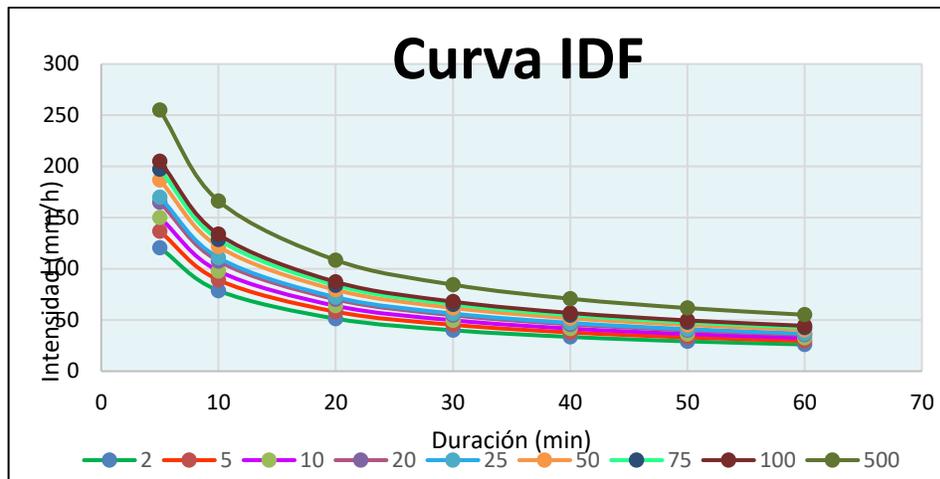


Figura 18. Curvas IDF para la microcuenca Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

GEOLOGIA

En la figura 19 se representan las unidades litológicas, las curvas de nivel y las fallas presentes para la microcuenca Hato viejo con edades que varían desde el Precámbrico hasta el cenozoico. Estas unidades agrupan rocas metamórficas del Precámbrico, rocas neis del mesozoico formación capacho y del cenozoico los depósitos cuaternarios.

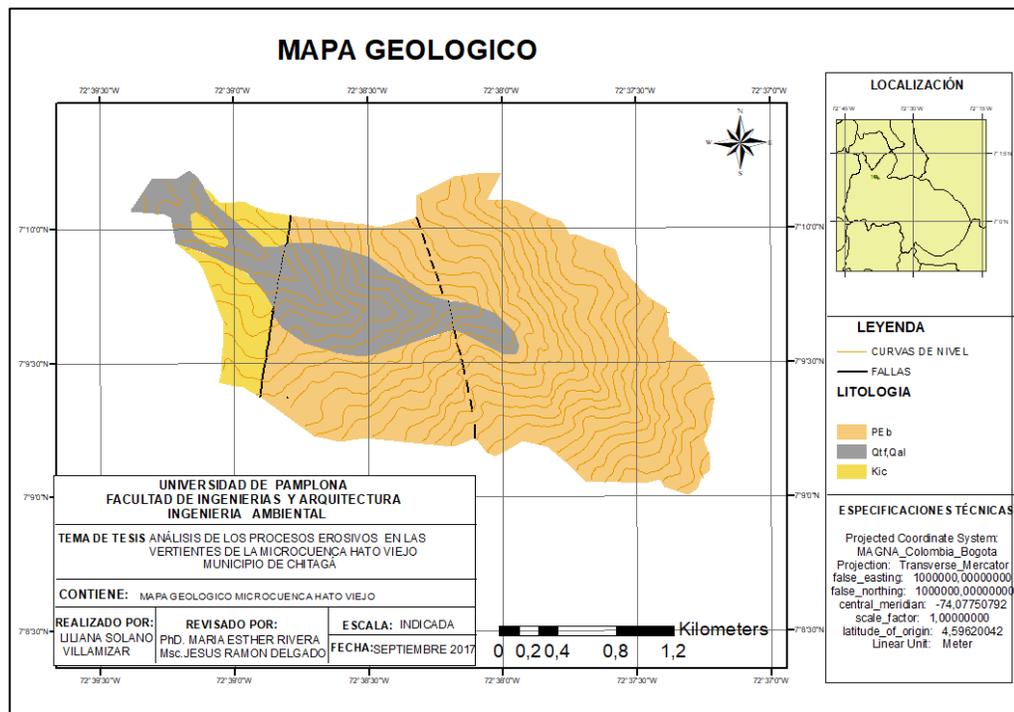


Figura 19. Mapa Geológico para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS PRESENTES EN EL ÁREA

Neis de Bucaramanga (PEb): Esta unidad fue inicialmente definida como Neis de Bucaramanga por Ward et al. (1973), quienes le dieron esa denominación a una secuencia de rocas sedimentarias, afectadas por metamorfismo regional de alto y medio grado, que presentan facies cordierita-anfibolita, predominantemente néisicas con zonas migmatíticas. Esta unidad, por sus características litológicas y su evolución geológica, podría denominarse Complejo Bucaramanga.

El Neis de Bucaramanga aflora en el borde nororiental de la microcuenca Hato viejo presenta buenos afloramientos en la parte alta y media de la microcuenca (figura 20), litológicamente la unidad se encuentra constituida por neises cuarzofeldespáticos, neises anfibólicos, anfibolitas y migmatitas; neises cuarzofeldespáticos con granates y cuarcitas con sillimanita; pertenecen a la subfacies-sillimanita cordieritaortoclasa-almandino de la facies cordierita-anfibolita, además formaciones de micas y muscobitas en el sentido de Winkler (1979) y Miyashiro (1973). Esta unidad se encuentra en contacto discordante con rocas de la Formación capacho del mesozoico y en contacto fallado con rocas cretácicas y terciarias.

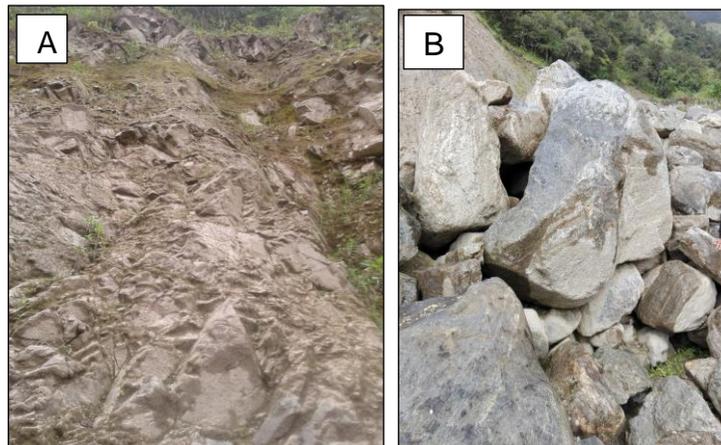


Figura 20. Formaciones neis de Bucaramanga en la microcuenca Hato Viejo, A-lugar la esperanza, B-lugar El Cascaral

Fuente: Solano V, (2017)

Formación Capacho (Kic) Nombre propuesto en 1888 por Sievers (en Julivert et al., 1968), para denominar unas calizas aflorantes en el pueblo Capacho Viejo, actualmente Independencia, Estado de Táchira (Venezuela). Posteriormente fue redefinida por Sutton (1946) y Rod & Maync (1954). En Colombia, el término se utilizó en la Concesión Barco, Norte de Santander (Richards, 1968) y en Santander (Ward et al., 1973; Vargas et al., 1976). En la microcuenca Hato Viejo la Formación Capacho aflora en el extremo noroccidental en la parte media de la cuenca (figura 21) y corresponde a un conjunto de lodolitas grises

laminadas, con nódulos calcáreos, intercalaciones de areniscas calcáreas muy fracturadas y calizas grises a negras, en capas delgadas, areniscas conglomerativas con fragmentos carbonosos y oxidos de hierro, limonitas, calcáreas y fosilíferas.



Figura 21. Formaciones Capacho en la microcuenca Hato Viejo, A-B- lugar El cascaral.
Fuente: Solano V, (2017)

Depósitos cuaternarios (Qd, Qal Qtf): En la microcuenca se presentan sectores con algunos depósitos coluviales y de derrubios, los cuales están agrupados en la unidad cuaternaria (Qd), considerada de edad pleistocénica. También se diferencié la unidad cuaternaria más joven (Qal), conformada por depósitos aluviales que están distribuidos a lo largo de los valles de la corrientes de la quebrada Hato Viejo (figura 22) conformando las terrazas y conos de deyección de la cuenca, estos depósitos son considerados holocénicos o muy recientes, además se presentan depósitos de terraza Qtf en la confluencia de la quebrada con el río Chitagá.

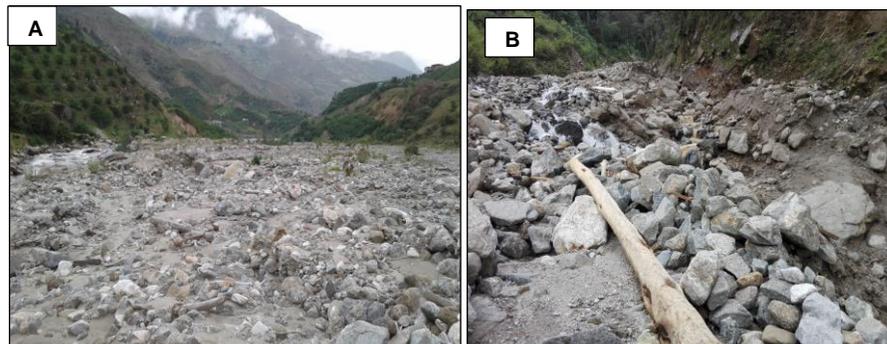


Figura 22. Depósitos en la microcuenca Hato Viejo, A- Confluencia quebrada con el río Chitagá, B-Lugar La Capilla
Fuente: Solano V, (2017)

FALLAS

La tectónica de la microcuenca Hato Viejo se encuentra afectada por la interacción de las placas tectónicas Nazca, Caribe y Suramérica, en esta zona se encuentran fallas inversas de cabalgamiento de dirección predominante N- S. destacándose la falla de Chitagá, morro Negro y fallas menores como la falla de Chucarima.

Falla de Chitagá se extiende de forma paralela a la falla de Morronegro. Sitúa en contacto rocas Precámbricas y Jurasicas al este con rocas del Cretáceo y Terciario al oeste, esta falla podría ser una extensión de la falla de Boconó en Venezuela. Su sentido de movimiento es sinistral (izquierda-lateral) y el trazo es marcado por escarpes prominentes continuos, cambios abruptos en la pendiente en ambos lados de la falla y alineación de cuchillas. (INGEOMINAS, 2011)

Fallas Morronegro se extiende por el noreste de la Cordillera Oriental de Colombia, este sistema de fallas presenta un cambio de dirección de NW a N. Desplaza rocas del Paleozoico y Cretácico, el componente vertical se invierte, en el norte el bloque oeste es levantado y el lado este es levantado hacia el sur.

El movimiento es sinistral en el sur y dextral en la parte norte. El trazo es marcado por escarpes prominentes continuos, alineación de drenajes, depresiones estructurales, alineación de cuchillas y valles, escarpes degradados y levantamientos locales. (INGEOMINAS, 2011)

COBERTURA VEGETAL

La vegetación actúa como cubierta protectora sin embargo la influencia del hombre han modificado las coberturas propias del lugar vegetación de paramo y bosque, para introducir coberturas de como pastizales, frutales, pastizales, cultivos transitorios.

La microcuenca aflora en el morro de los cachos zona donde se encuentra vegetación de paramo y subparamo (figura 23) que a pesar de ser un área estratégica destinada a la conservación del ecosistema, se realizan actividades agropecuarias que degradan el suelo generando erosión y pérdida de vegetación nativa.

En la parte media de la microcuenca donde las vertientes se ven altamente afectadas por procesos erosivos, aunque se presenta mayor densidad de la cobertura superficial y se observan especies arbóreas (figura 24 a, b) con copa alta con hojas palmadas y lobuladas que forman gotas de mayor tamaño dando lugar a procesos erosivos ya que las gotas se concentran en áreas focalizadas, excediéndose las tasas de infiltración y dando lugar al indeseado escurrimiento superficial que sumado a otros factores aceleran la erosión en la microcuenca, en la parte media y baja de la quebrada se observa arbustos y cultivos.

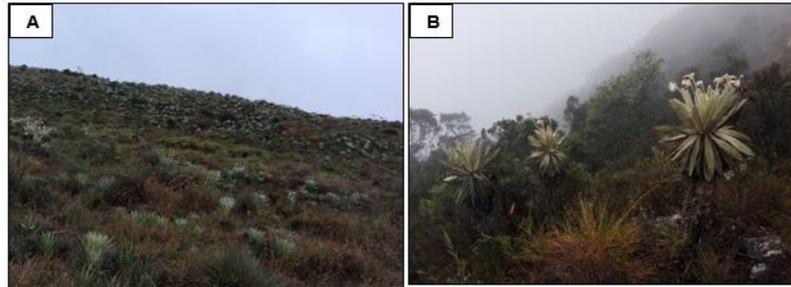


Figura 23. Vegetación de paramo y subparamo en la microcuenca Hato Viejo, A-B Lugar Correales
Fuente: Solano V, (2017)

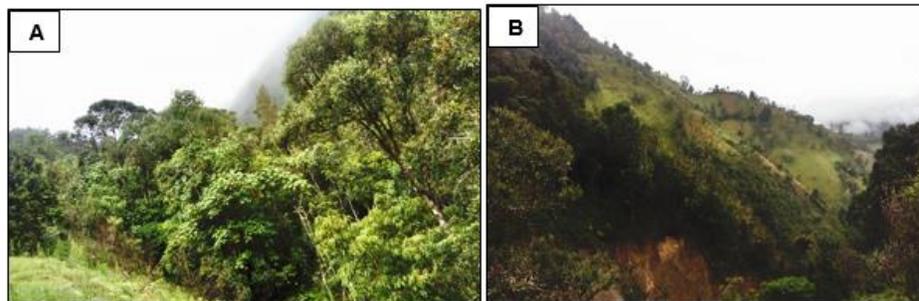


Figura 24. Matorral boscoso y arbustos en la microcuenca Hato Viejo; A- Lugar el Caimo, B- La Esperanza
Fuente: Solano V, (2017)

La influencia antrópica se ve reflejada en las zonas más bajas donde las coberturas han sido modificadas y destinadas a actividades agrícolas destacándose los cultivos de hortalizas, frutales y papa (figura 25 a y b), siendo la ganadería otro renglón importante en la microcuenca ya que un área considerada es destinada para pastizales(figura 26 a y b).



Figura 25. Cultivos de fresa y ciruela en la microcuenca Hato Viejo, A-Finca el Tablón, B- Finca Los Caobos.
Fuente: Solano V, (2017)



Figura 26. Pastizales y matorral en la microcuenca Hato Viejo; A-s Finca el Tablón, B-Lugar el Cascaral.
Fuente: Solano V, (2017)

En el transcurso del tiempo las coberturas han cambiado debido a diferentes factores así mismo los procesos erosivos han aumentado progresivamente presentándose deslizamientos en las laderas que a pesar de ser áreas con pendientes abruptas y escarpadas no aptas para actividades agropecuarias se realizan estas actividades sin adecuadas prácticas de conservación.

Las Figuras 27, 28 y 29 muestran una secuencia de imágenes temporales de la microcuenca Hato Viejo, Las imágenes cubren aproximadamente 5,1 km correspondiente al área de la cuenca y fueron extraídas de una imagen Landsat 8 standard de 185 km x 185 km.

La Figura 27, corresponde al 10-01-2014, y en el área de la microcuenca de referencia posee un NDVI de -0,052379 a 0,077 cuyos índices son prácticamente cero y con menor desarrollo que la de referencia.

En la Figura 28 se muestra la situación al 16-01-2016 y puede observarse cómo el NDVI de la referencia ha aumentado y varía de -0,507168 a 0,081955, observándose que algunas áreas blancas han elevado su NDVI, algunas notoriamente. Obviamente se trata de otras áreas en diferentes estados de evolución. En la Figura 29 el NDVI de referencia ha disminuido a -0,571466 a 0,0689074 evidenciando que las coberturas están en constante cambio por la influencia antrópica, y que por ser valores cercanos a 0 establece que en la cuenca sobre salen sistemas rocosos, altamente erosivos, con cantidades considerables de Biomasa y producción de agua.

En las imágenes Landsat de la microcuenca Hato Viejo representa en verde oliva a verde brillante indica las áreas forestales y en verde claro las praderas, en tonalidades rojo- magenta zonas con vegetación menos densa y en estado de crecimiento, violeta a áreas degradadas y sin cobertura estas áreas en las figuras corresponden a áreas afectadas por deslizamientos y flujos torrenciales, el verde claro son praderas naturales, marrón claro pastos sin irrigación, en tonos rosa a morados cultivos.

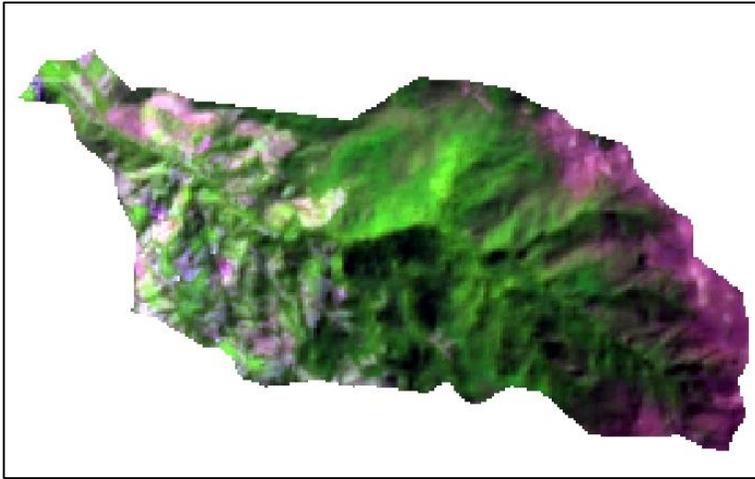


Figura 27. Imagen satelital quebrada Hato viejo -2014
Fuente: Solano V, (2017)

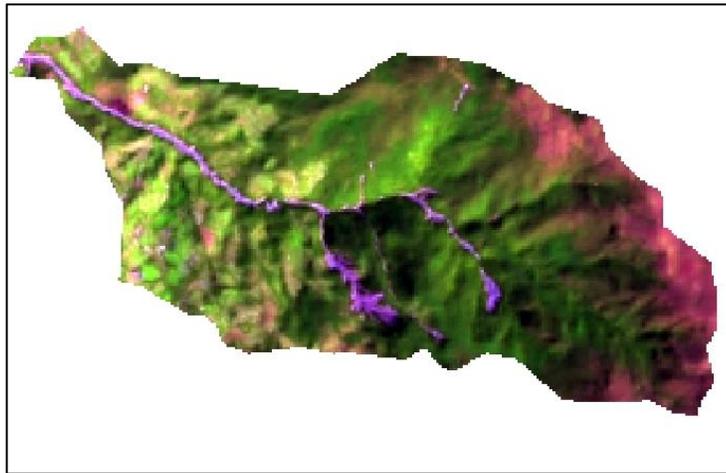


Figura 28. Imagen satelital quebrada Hato viejo -2016
Fuente: Solano V, (2017)

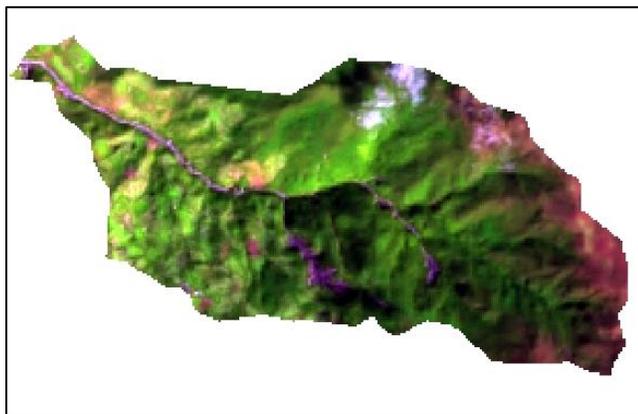


Figura 29. Imagen satelital quebrada Hato viejo -2017
Fuente: Solano V, (2017)

SUELOS

En la tabla 10 se observa la clasificación de sedimentos y suelos de la microcuenca Hato Viejo según el sistema unifica de clasificación de suelos en base al análisis granulométrico de cada muestra (figura 30 y 31) presentando suelos areno arcillosos con gravas y bloques que por la influencia de detonantes como la precipitación ocasionan el desprendimiento de estos materiales.

MUESTRAS DE SUELO	CLASIFICACION DE SUELOS USCS	DESCRIPCIÓN
Muestra 1	SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla mal graduadas.
Muestra 2	SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla mal graduadas.
Muestra 3	GC	Gravas arcillosas, mal graduadas de gravas, arena y arcilla
Muestra 4	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos.
Muestra 5	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arenas con pocos finos o sin ellos.
Muestra 6	GM	Gravas limosas mal graduadas mezclas de gravas, arena y limo.

Tabla 10. clasificación de suelos de la microcuenca Hato Viejo según el sistema unificado de clasificación de suelos (U.S.C.S).

Fuente: Solano V, (2017)

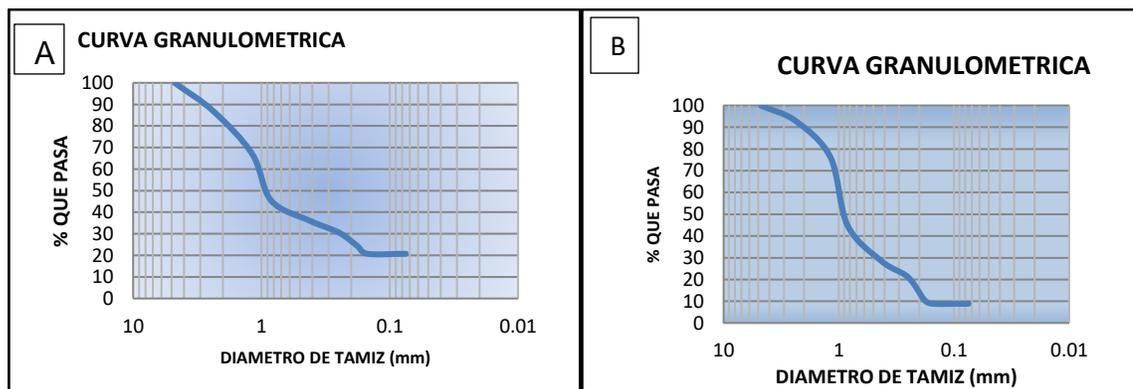


Figura 30. curvas granulométricas puntos de muestreo microcuenca Hato Viejo; A- Muestra 1, B-Muestra 2

Fuente: Solano V, (2017)

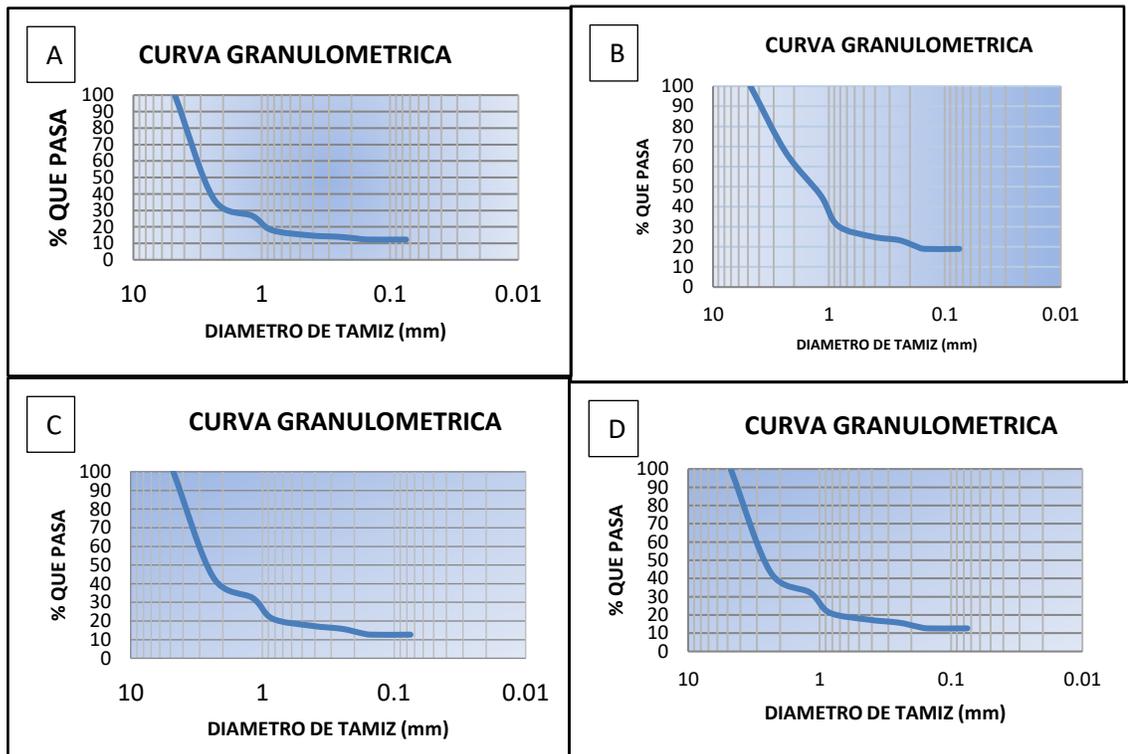


Figura 31. curvas granulométricas puntos de muestreo microcuenca Hato Viejo, A- Muestra 3, B- Muestra 4, C-Muestra 5, D-Muestra 6
Fuente: Solano V, (2017)

En el área de la microcuenca Hato Viejo se encontraron procesos activos en los taludes y laderas con movimientos hacia afuera y hacia abajo de los materiales; estos ocurren generalmente, a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, flujos o erosión siendo frecuente la presencia de cárcavas y surcos en el material expuesto.

En la microcuenca el tipo más común de movimiento fueron los flujos, seguidos por los deslizamientos, y eventual caída-desprendimiento, con secuencias de repetición. La totalidad de procesos identificados se encuentran en estado activo, los procesos son complejos y unos pocos compuestos; la velocidad predominante es rápida, los materiales involucrados son arenas, gravas y bloques.

Erosión en Cárcavas: en la microcuenca se presentan cárcavas o zanjas de gran tamaño (figura 32) causados por fuertes precipitaciones, como componentes principales del movimiento de laderas, y se caracterizan por su profundidad, que facilita el avance lateral y frontal por medio de desprendimientos de masas de material en las laderas de pendiente alta que conforman el perímetro de la cárcava.



Figura 32. Cárcavas en la parte alta de la microcuenca Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

Erosión en Surcos: se presentan surcos formados por la concentración de agua de escorrentía, arrastrando partículas y a su paso formando canales poco profundos, generalmente paralelos ya que siguen la dirección de la pendiente; estos forman una micro-red de drenaje donde al profundizarse se unen aumentando su tamaño dando lugar a la formación de cárcavas (Figura 33).



Figura 33. Erosión por surcos en la parte media de la microcuenca Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

Deslizamientos. En la microcuenca se presentan deslizamientos traslacionales y rotacionales estos procesos se presentan en las vertientes de la quebrada (figura 34), en medio de zonas montañosas, su causa principal es la desestabilización, a causa de las precipitaciones, escorrentía y fuertes pendientes, estos movimientos tiende a ser retrogresivos debido al escarpe semivertical por debajo de la corona, otras veces puede ampliarse por los escarpes semiverticales en los costados, que sugieren la ocurrencia de nuevos movimientos



Figura 34. Deslizamientos en laderas en la parte alta de la microcuenca Hato Viejo
Fuente: Solano, (2017)

Los Flujos se presentan movimientos de bloques grandes de roca y/o de material residual saturado que se mueve sobre una superficie de falla en las laderas, los materiales son poco consolidados, alterados y fracturados que absorben agua fácilmente y su saturación conduce a la formación de flujos. Es frecuente la ocurrencia de los flujos en la microcuenca Hato Viejo tal como ocurrido en los últimos tiempos destacándose lo ocurrido en el mes de agosto del 2015 donde fuertes aguaceros ocasionaron flujos que causaron graves afectaciones sobre algunas viviendas, vía nacional y pérdidas económicas, en la actualidad tras acción de eventos de alta intensidad de precipitación se presentan flujos de rocas y detritos (figura 35 y 36).



Figura 35. Flujos torrenciales en la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2015).



Figura 36. Flujos torrenciales en la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

USO POTENCIAL DEL SUELO

La clasificación técnica del uso del suelo busca cumplir objetivos prácticos específicos mediante la evaluación de limitantes, que permiten definir el marco global de su manejo, buscando siempre que el recurso suelo sea sostenible como productor de bienes y servicios. En la microcuenca Hato Viejo objeto de estudio, el uso inadecuado del suelo, es el principal factor en la inestabilidad de laderas ya que según el uso potencial (figura 37) son suelos destinados a la protección y uso forestal y en menor medida a actividades agropecuarias.

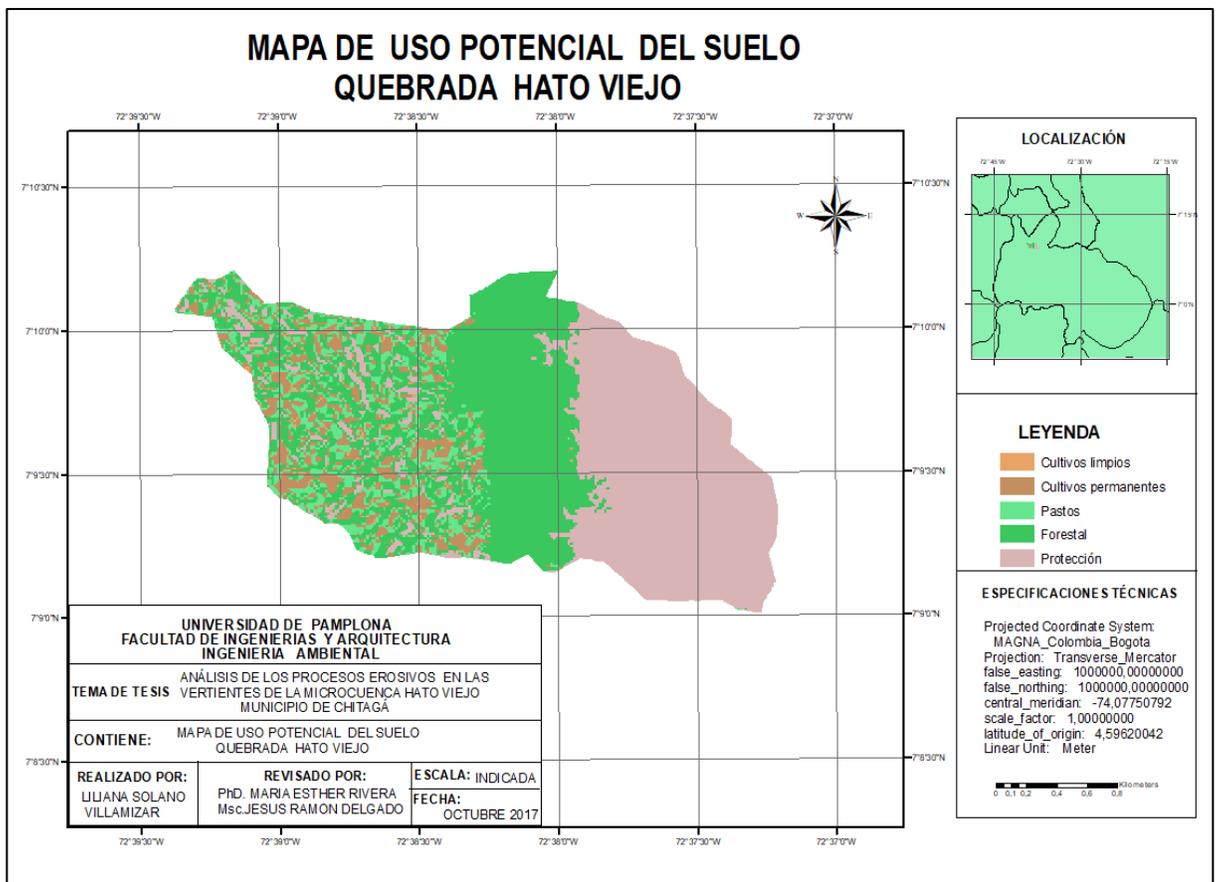


Figura 37 . Mapa del uso potencial del suelo para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano, (2017)

8.3 EVALUACIÓN DE LOS FACTORES DETERMINANTES DE LA DEGRADACIÓN DE SUELOS POR EROSIÓN

ESTIMACIÓN DE LA PERDIDA DE SUELO MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO USLE

Mediante la aplicación de USLE se determinó la degradación del suelo por erosión hídrica y se estimaron los factores.

FACTOR R

En la Figura 38 se muestra el Mapa del Factor R para la Cuenca de la quebrada Hato Viejo, presentándose valores mayores de erosividad de lluvia en las partes altas y media de la quebrada donde se han presentado deslizamientos y se evidencia la agresividad de las lluvias.

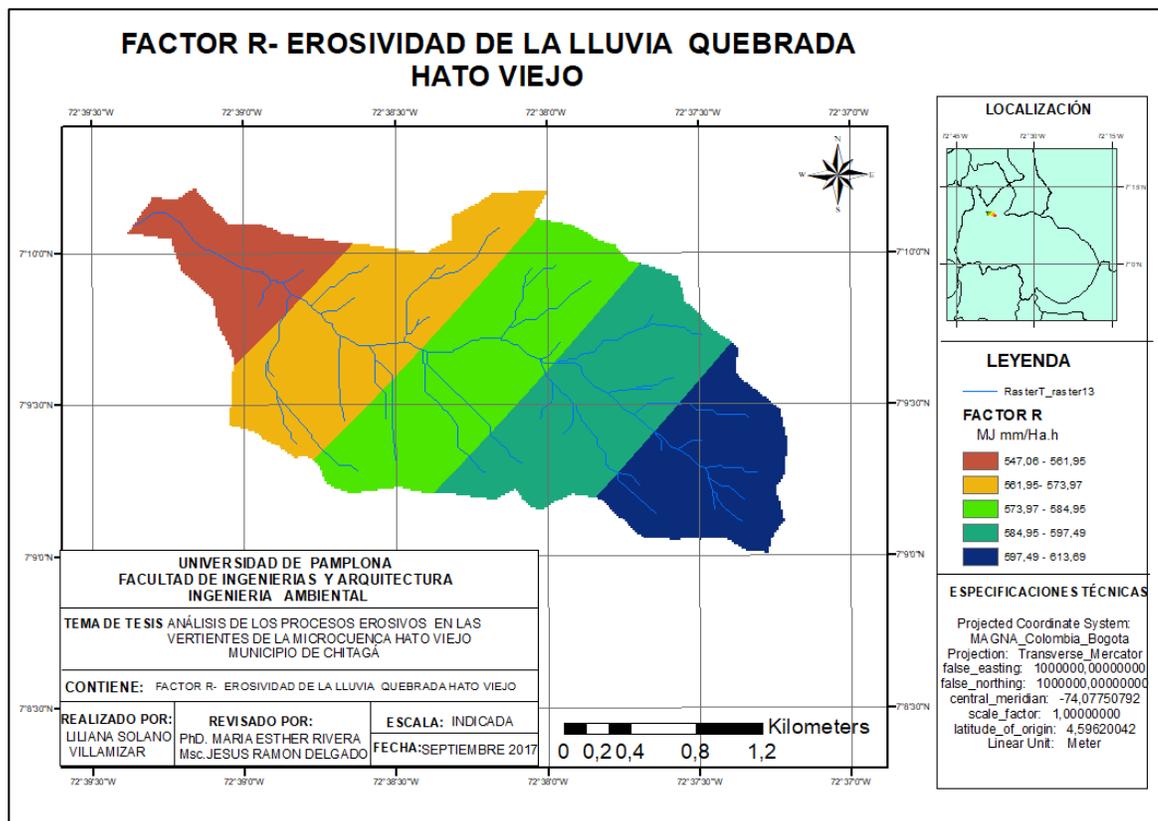


Figura 38. Mapa con el Factor R para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

FACTOR K

De acuerdo con la textura presente en la cuenca, se estableció que el contenido de arena, limo, arcilla y materia orgánica presentes en la tabla 11, determino la permeabilidad. Además se estableció los valores de K para las formaciones de rocas teniendo en cuenta las unidades litológicas presentes en la zona de estudio. En la tabla 12 se establecen los valores de K para las unidades de suelo y formaciones de rocas presentes en la cuenca que varían de 0,082971 a 0,7 Mjmm/ha, así mismo se muestra en la figura 39 donde se establece que la zona donde se ubican los depósitos es más susceptible a erosionarse seguido de las formaciones de rocas sedimentarias blandas.

UNIDAD DE SUELO	ARENA %	LIMO %	ARCILLA %	CARBONO ORGANICO %	FACTOR K(WILLIAMS) (Mjmm/ha.a)
LC	64.3	12.2	23.5	0.63	0.082971

Tabla 11 Factor K para la Microcuenca quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

VALORES DEL FACTOR K PARA UNIDADES DE SUELO Y LITOLOGÍA CUENCA QUEBRADA HATO VIEJO	
Gneises cuarzofeldespáticos, migmatitas, granulitas, anfibolitas, ortogneises, cuarcitas y mármoles.	0,1
Rocas sedimentarias blandas (Shales, calizas, fosforitas, cherts y cuarzoarenitas)	0,5
Depósitos recientes	0,7
Suelo luvisol cromico	0,082971

Tabla 12 valores del factor k para unidades de suelo y litología cuenca quebrada hato viejo
Fuente: Solano V, (2017).

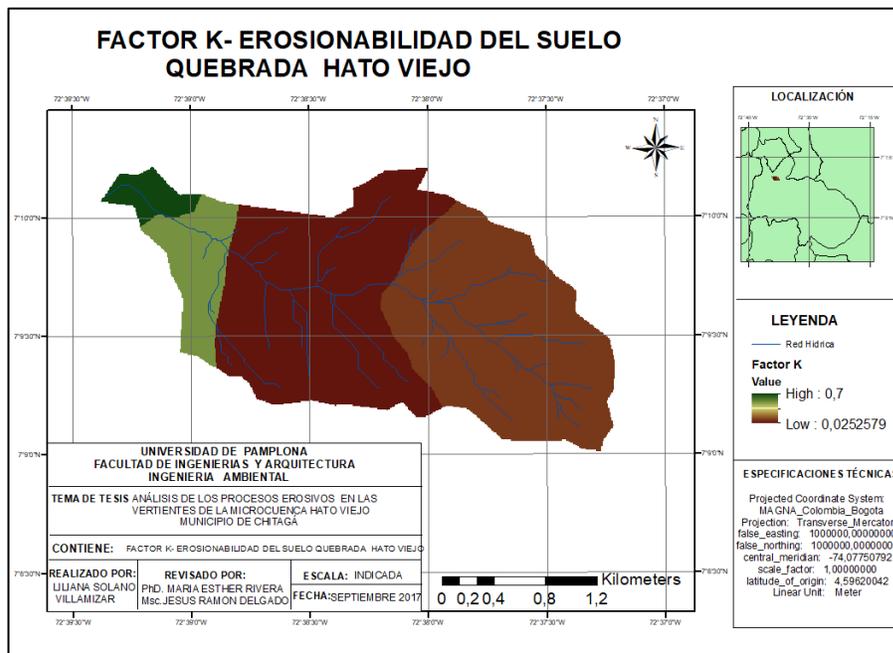


Figura 39. Mapa con el Factor K para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

FACTOR LS

Dado que el factor L hace alusión a las longitudes de las pendientes este presenta valores altos y por ende una mayor concentración en las zonas de ladera donde las pendientes son similares (Figura 40). Caso contrario se evidencia en la figura 41 que representa el factor S el cual al depender exclusivamente de las pendientes presenta sus valores más altos en zonas donde hay variaciones fuertes de pendientes, es por eso que las pendientes más fuertes se presentan en segmentos de las zonas de ladera.

Los dos factores presentan un comportamiento similar en las zonas más planas y sobre el cauce de la quebrada Hato Viejo, por ende no hay una variación notable de pendientes reflejadas en la figura 42 que representa el factor LS, el efecto combinado de la pendiente y la longitud de los terrenos expuestos a la erosión laminar y en surcos. La mayor parte del área de la cuenca presenta susceptibilidad de erosión alta y muy alta con respecto a la pendiente dado que un 74,4 del área total es abrupta y el 12,7 escarpada siendo estas áreas donde se evidencia suelos degradados y deslizamientos rotacionales y traslacionales.

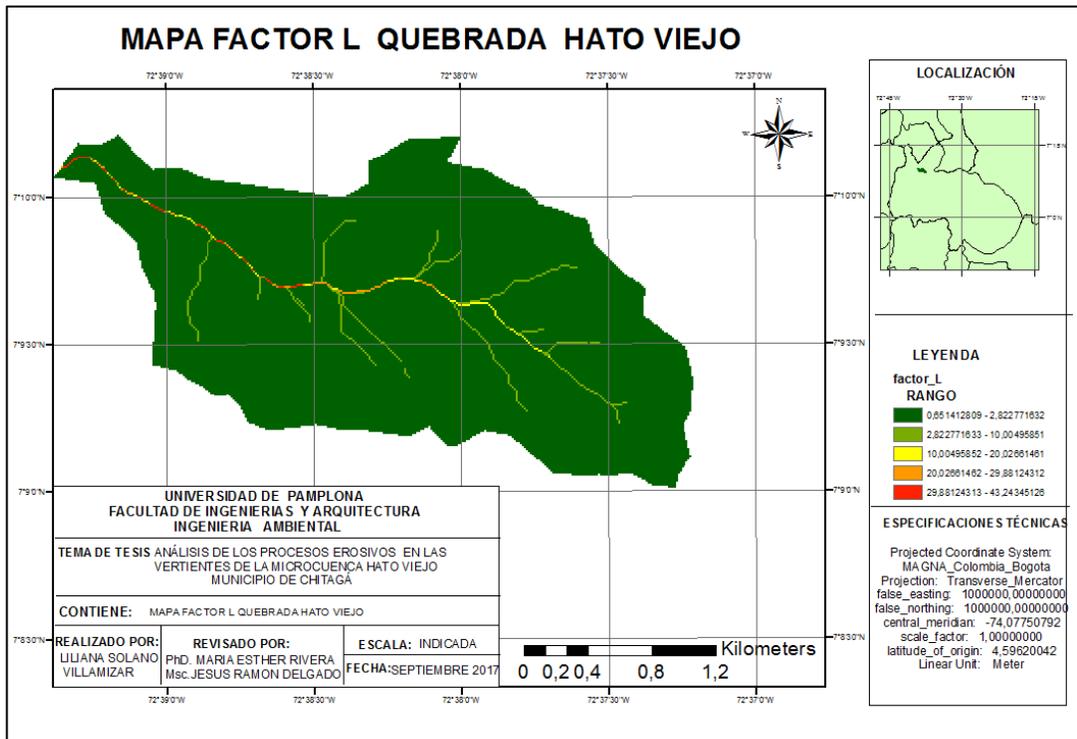


Figura 40. Mapa de subfactor L para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

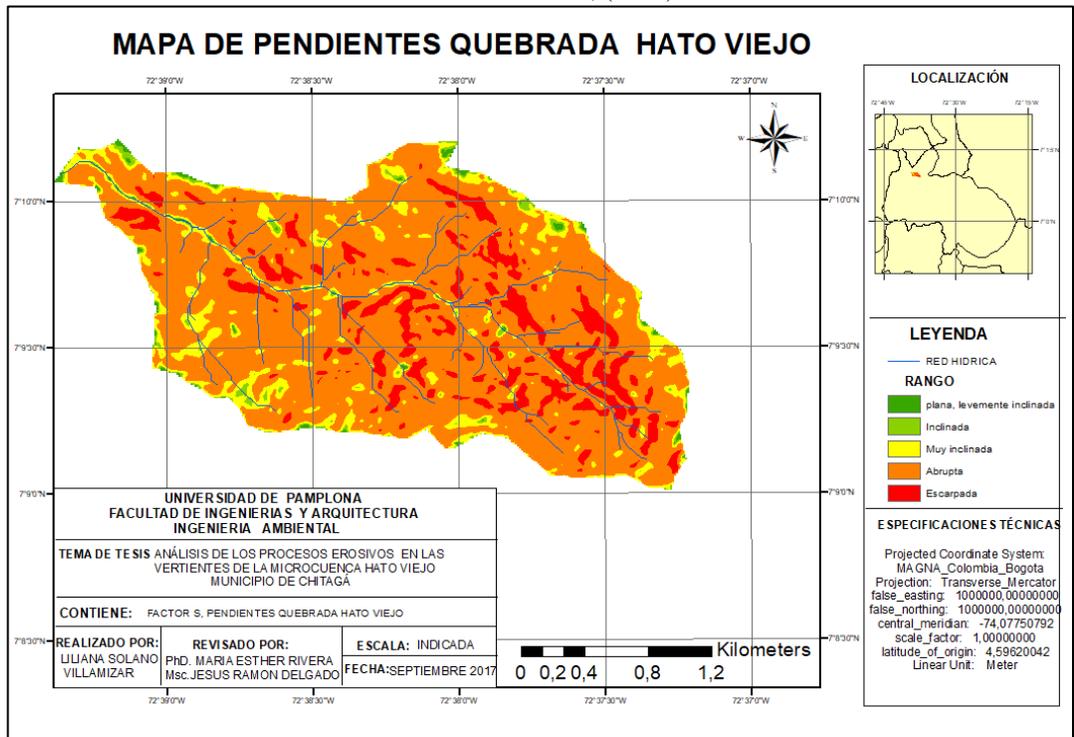


Figura 41. Mapa de pendiente para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

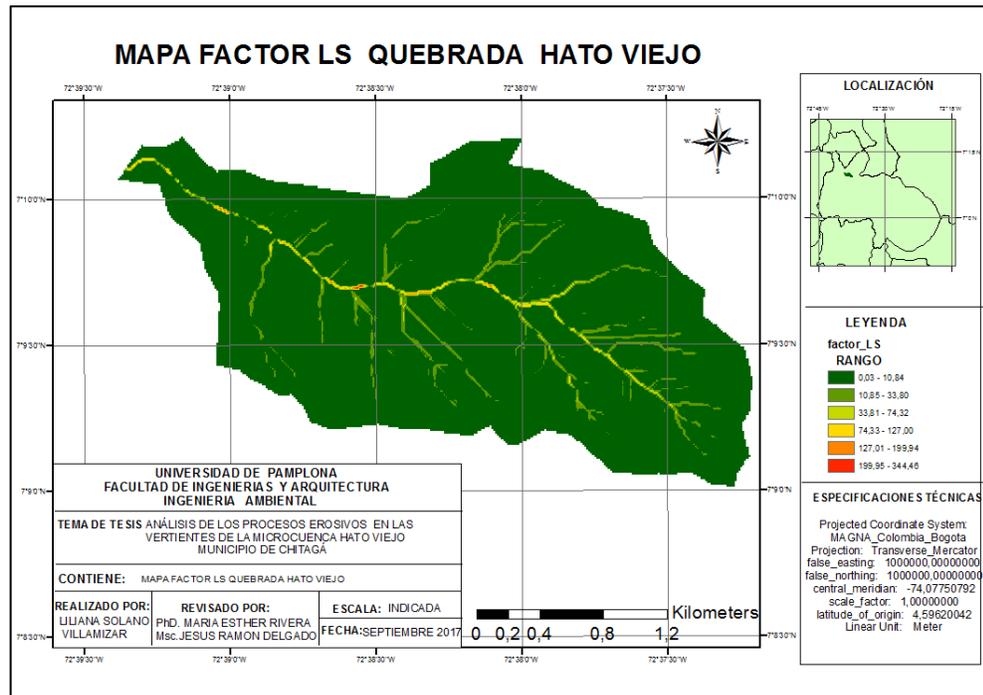


Figura 42. Mapa de factor Ls para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo
 Fuente: Solano V, (2017).

En la tabla 13 se clasifica la pendiente según el grado de susceptibilidad, presentando en un 74,4 % pendientes abruptas y 12,7 escarpadas lo que indica que es altamente susceptible a la erosión hídrica.

RANGO	AREA	% AREA	DESCRIPCION	SUCEPTIBILIDAD EROSIÓN
0-7	44218,75	0,85	plana, suavemente inclinada	muy baja
7-11	94062,5	1,8	inclinada	baja
11-19	536562,5	10,3	muy inclinada	media
19-40	3884375	74,4	Abrupta	alta
>40	665156,3	12,7	Escarpada	muy alta

Tabla 13. Clasificación de pendientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
 Fuente: Solano, (2017).

FACTOR C

Por otro lado, en la figura 43 se representa el factor C para cada cobertura presente en la zona de estudio. En las zonas donde hay cobertura vegetal de bosque natural denso identificada en el mapa con color verde oscuro, no existe una pérdida considerable de suelo, así como en las zonas de paramo y subparamo, esto se debe a que la misma vegetación no permite la pérdida del suelo ya que de una u otra forma esta amortigua la caída y salpicadura de las gotas de agua, así mismo se aprecia que en las zonas con colores verdes claros encontramos cobertura vegetal baja y por ende la pérdida de suelo por salpicadura del agua es mayor.

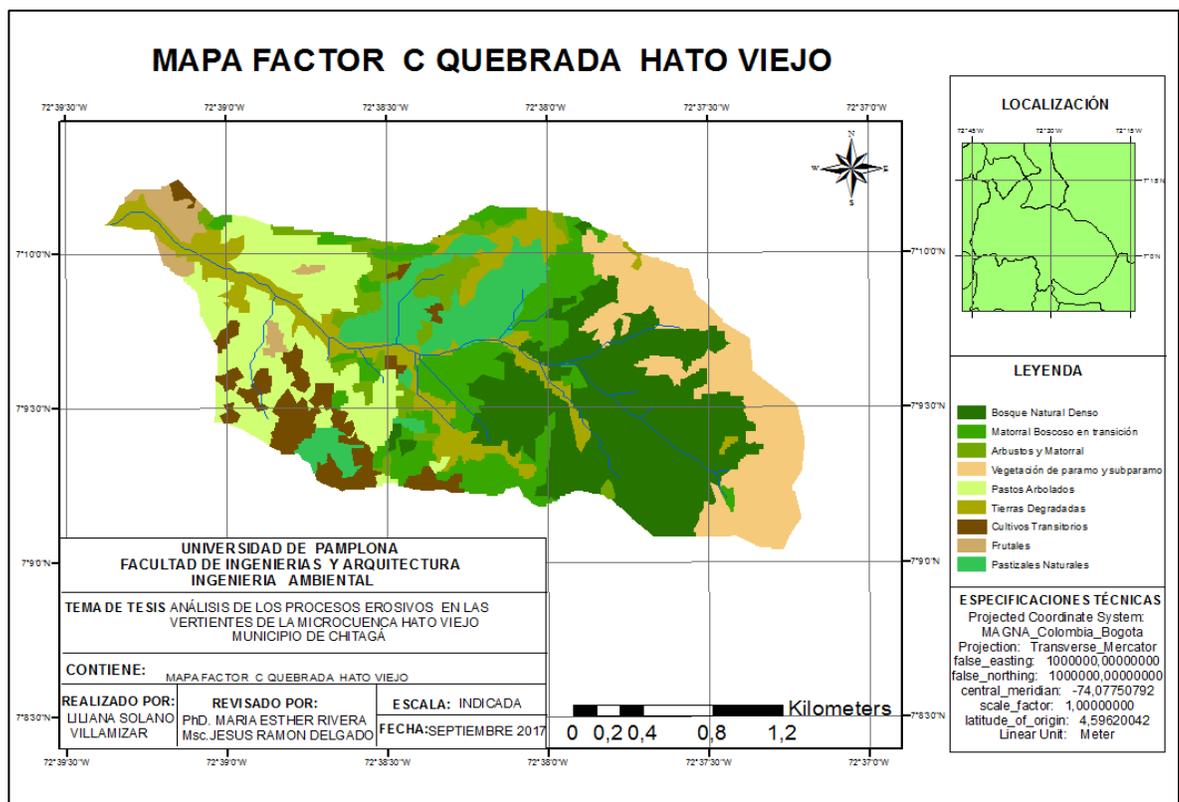


Figura 43. Mapa de factor C para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo

Fuente: Solano V, (2017).

En la tabla 14 se establece la clasificación de coberturas para la cuenca de la quebrada Hato Viejo según la metodología Land Cover, donde se definieron 9 categorías: bosque natural denso, matorral boscoso en transición, arbustos y matorral, vegetación de paramo y subparamo, pastos arbolados, tierras degradadas, cultivos transitorios, frutales, pastizales naturales, siendo las zonas de bosque natural las de mayor abundancia con un 25,7 % del área de la cuenca, aunque las zonas cultivables corresponde a un 7,8 % del área total, estas áreas están comprendidas por frutales principalmente durazno y ciruelo con un 2,3% y cultivos transitorios como papa, maíz, hortalizas un 5,5 %, sin embargo las practicas inadecuadas hay acelerado de manera progresiva la degradación del suelo.

COBERTURA	AREA (m ²)	% AREA	FACTOR C
Bosque Natural Denso	1323410	25.7084645	0,041
Matorral Boscoso en transición	644568.9	12.5213476	0,086
Arbustos y Matorral	250077.8	4.85799279	0,186
Vegetación de paramo y subparamo	738266.6	14.3415122	0,001
Pastos Arbolados	750721.7	14.5834641	0,1
Tierras Degradadas	563896	10.9542019	1
Cultivos Transitorios	285977.6	5.55537964	0,435
Frutales	119991.7	2.33094986	0,525
Pastizales Naturales	470849.5	9.14668746	0,13

Tabla 14. Factor c establecido para las coberturas de la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

FACTOR P

Las prácticas de conservación realizadas hacia la zonas de laderas son muy altas, tal y como se puede apreciar en la figura 44, en las zonas donde hay concentración de pendientes elevadas se refleja una conservación alta. Y en las zonas con menor inclinación se ve una baja práctica de conservación.

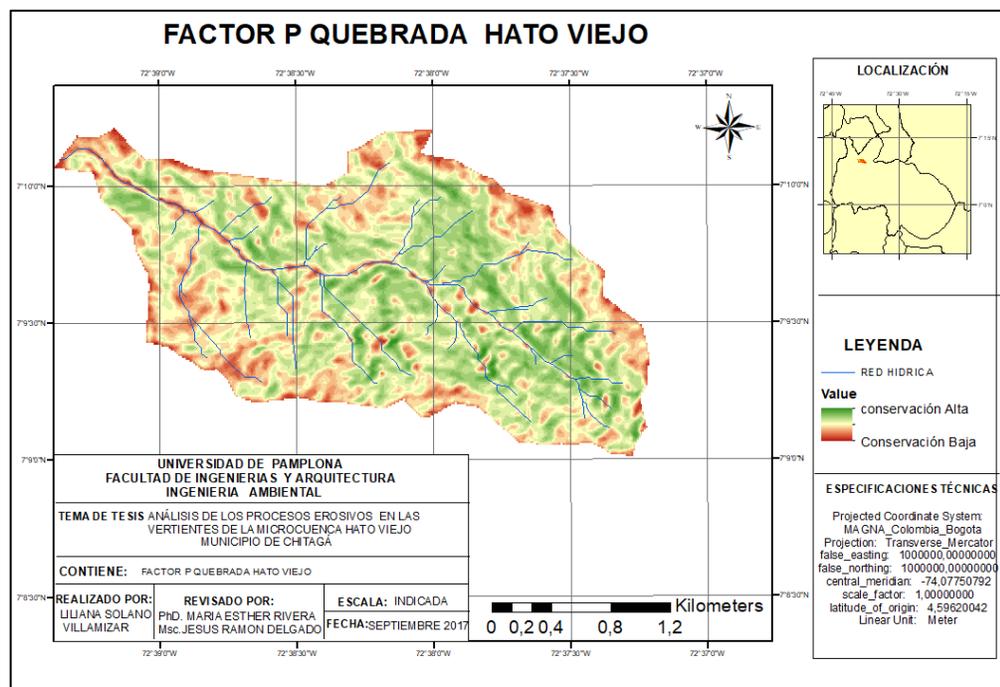


Figura 44. Mapa de factor P para la Microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

EROSIÓN HIDRICA POTENCIAL

En la figura 45 se puede observar que la erosión potencial para la microcuenca Hato Viejo, se inclina con mayor atenuación hacia las zonas de ladera, para la zona de estudio, debido a las características de suelo que están presentes en estas zonas (estructuras, tipo material litológico, etc.), mientras que en las zonas con menor inclinación se aprecia menor pérdida de suelo.

Un factor que ayuda a que la pérdida de suelo sea poca en algunas zonas es la topografía, tal y como se puede apreciar en las zonas con mayores pendientes tenemos una mayor tendencia hacia la pérdida del suelo. Como se ha definido anteriormente la erosión hídrica potencial es la susceptibilidad que presenta la zona sin tener en cuenta la mano del hombre, esta es importante porque aporta al estudio una tendencia de cómo se comporta la pérdida de suelo en condiciones naturales.

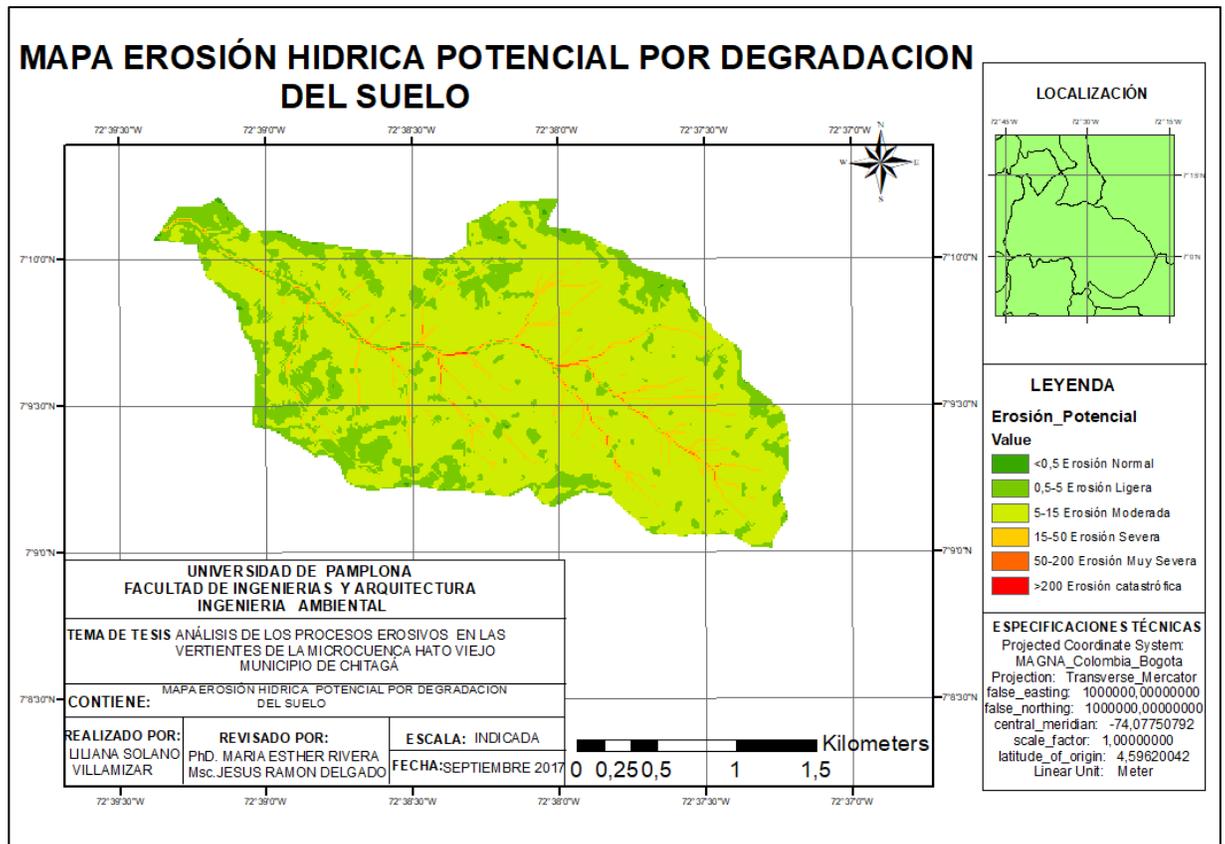


Figura 45. Mapa de factor erosión Hídrica Potencial para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
 Fuente: Solano V, (2017).

EROSIÓN HÍDRICA TOTAL

En la figura 47 se aprecia que las zonas más afectadas por erosión hídrica son las laderas y las áreas adjuntas al cauce de la quebrada Hato viejo donde se presenta erosión catastrófica, severa y muy severa, debido a factores como pendiente, la estructura y tipo de suelo que permiten una mayor pérdida por salpicadura del agua, generando desprendimientos de suelo y transporte de sedimentos por eventos torrenciales (figura 46).



Figura 46. Fotografías donde se evidencia la erosión hídrica en la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

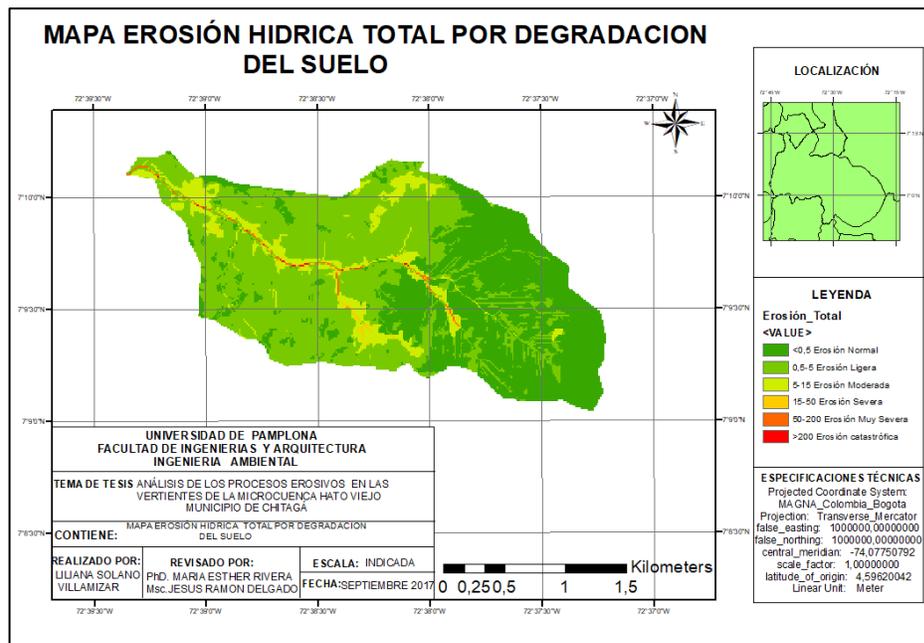


Figura 47. Mapa de erosión Hídrica Potencial para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

SUCEPTIBILIDAD DE EROSION EN LADERAS

Para el cálculo de la susceptibilidad de erosión en las laderas de la microcuenca Hato viejo definieron los factores o variables que intervendrán en la susceptibilidad, que en este caso se han elegido según la disponibilidad que se ha tenido de acceso a la información.

Pendiente: se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie y la vertical. Es decir, se mide calculando la tangente a la superficie. Su valor puede condicionar la estabilidad de una ladera, puesto que de ella dependen las componentes de las fuerzas favorables al movimiento y de las fuerzas resistentes al mismo, que determinan su equilibrio. Las pendientes en la cuenca son abruptas y escarpadas (Figura 41) con mayor inclinación lo que indica que por presentar valores altos de pendiente aumenta la componente tangencial de la gravedad y por tanto a mayores pendientes, será necesaria una mayor cohesión de las laderas para mantener su estado de equilibrio.

Orientación: el factor de orientación influye en los procesos erosivos de laderas, puesto que está afectado por la humedad retenida y la cobertura vegetal, y a su vez está condicionada por la consolidación de los suelos. Para la microcuenca Hato Viejo la orientación (figura 48) varía drásticamente por estar ubicada en zonas de falla donde la estratigrafía cambia, generando diferentes inclinaciones del terreno.

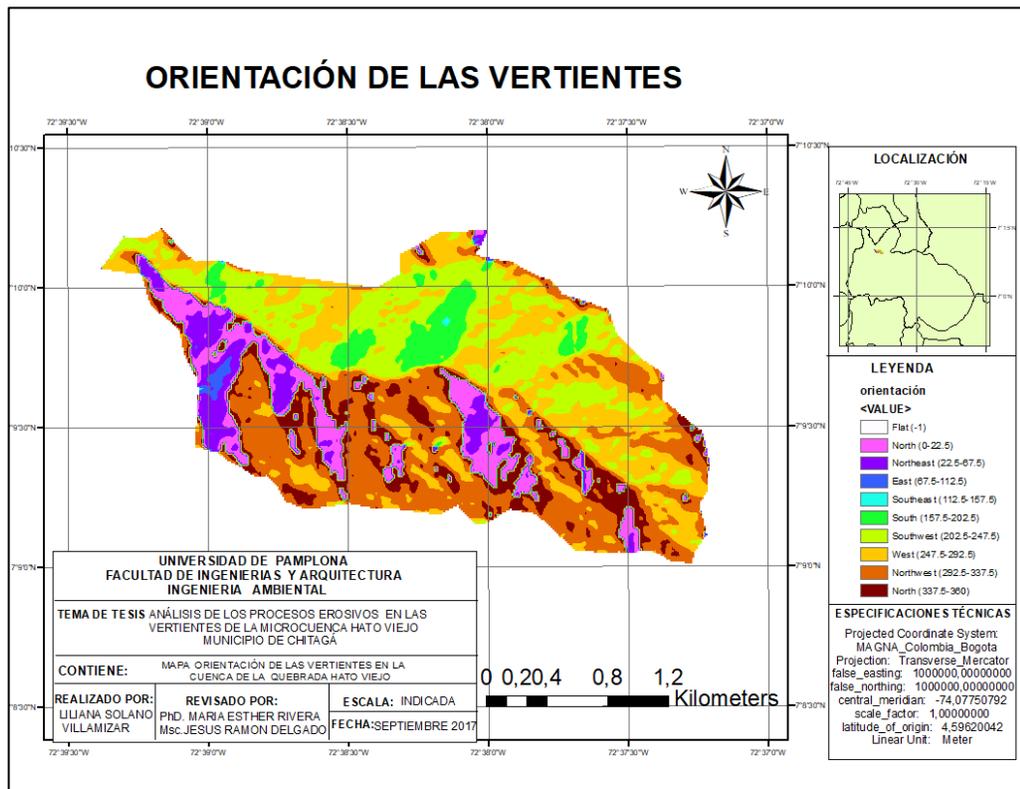


Figura 48. Mapa de orientación de vertientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

Curvatura: se define como la derivada segunda de la superficie, representa la concavidad y la convexidad del terreno. Se calcula celda por celda, aplicando una transformación polinómica de cuarto orden de la forma

Los valores de curvatura para la microcuenca (figura 49) varían de -25,6 a 21,12 donde los valores positivos de curvatura hacen referencia a perfiles convexos, si el valor de la curvatura es mayor más cerrada es la convexidad, los valores negativos de curvatura hacen referencia a perfiles cóncavos; mientras menor sea el valor de la curvatura, más cerrada es la concavidad, mientras que los valores cercanos a 0 hacen referencia a curvaturas muy abiertas que se aproximan a un plano; convexidades muy abiertas para valores positivos y concavidades muy abiertas para valores negativos.

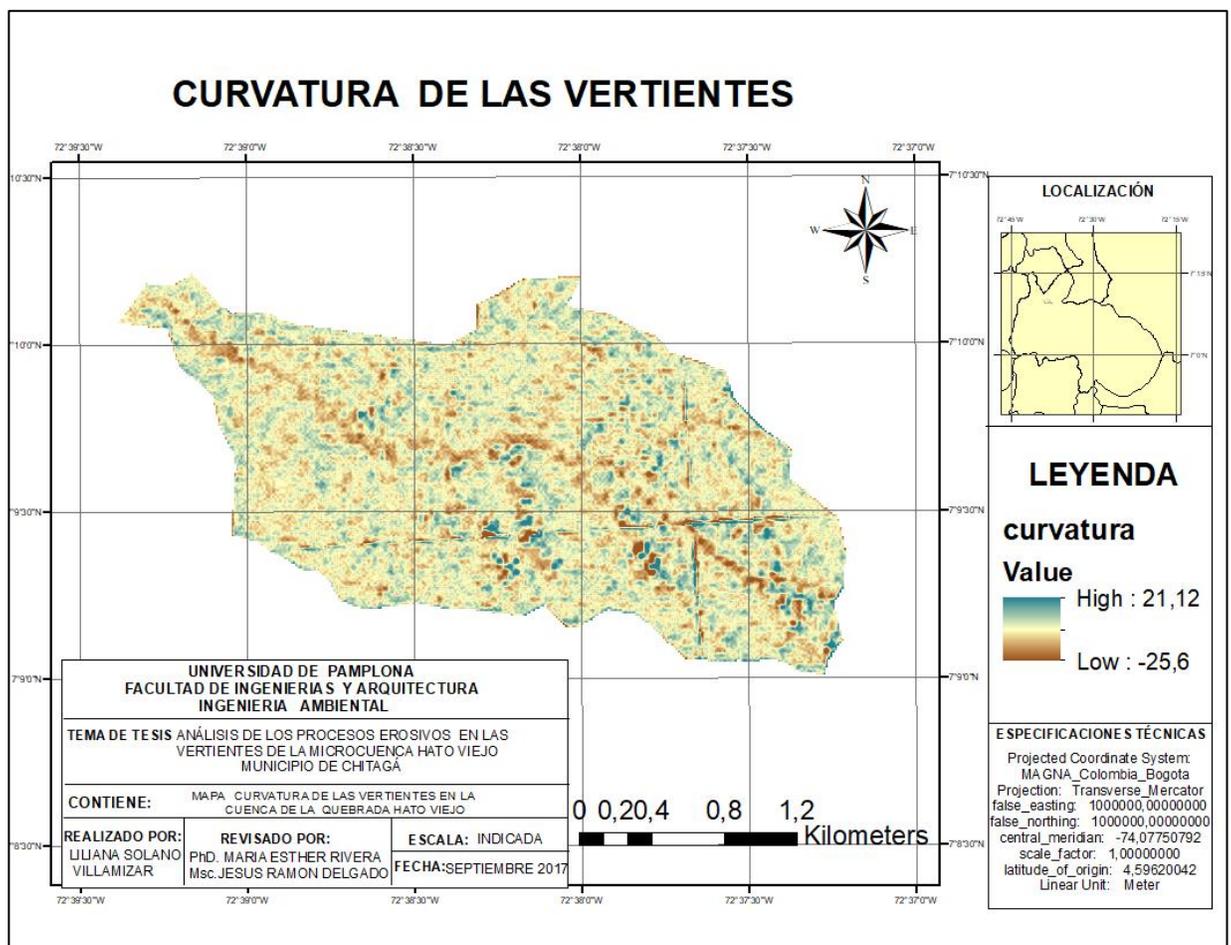


Figura 49. Mapa de curvatura de vertientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

Rugosidad: la ondulación de la superficie topográfica es una derivada de las pendientes y de las orientaciones, en la microcuenca va en diferente dirección del buzamiento de las capas por lo que aumenta la rugosidad siendo consecuente a su estructura (figura 50)

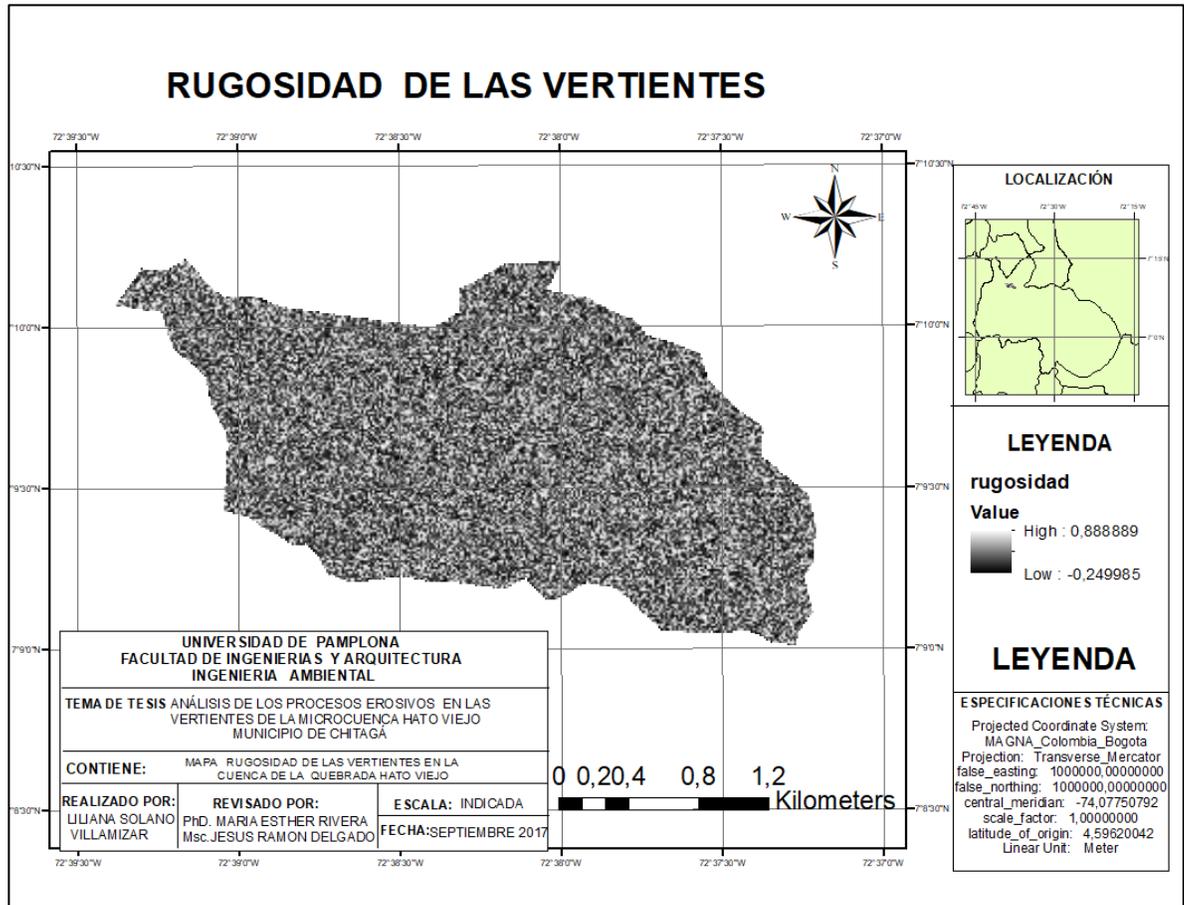


Figura 50. Mapa de curvatura de vertientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

Litología: Esta capa tiene información sobre el tipo de materiales geológicos en el área de estudio. Esta capa originalmente se obtuvo en formato vectorial (poligonal) y el tratamiento que ha tenido en el SIG ha sido su conversión a capa en formato ráster, donde se establecen 3 unidades litológicas (figura 51) comprendidas por las formaciones neis de Bucaramanga (Pcab), capacho (Kic) y depósitos aluviales recientes (Qtf)

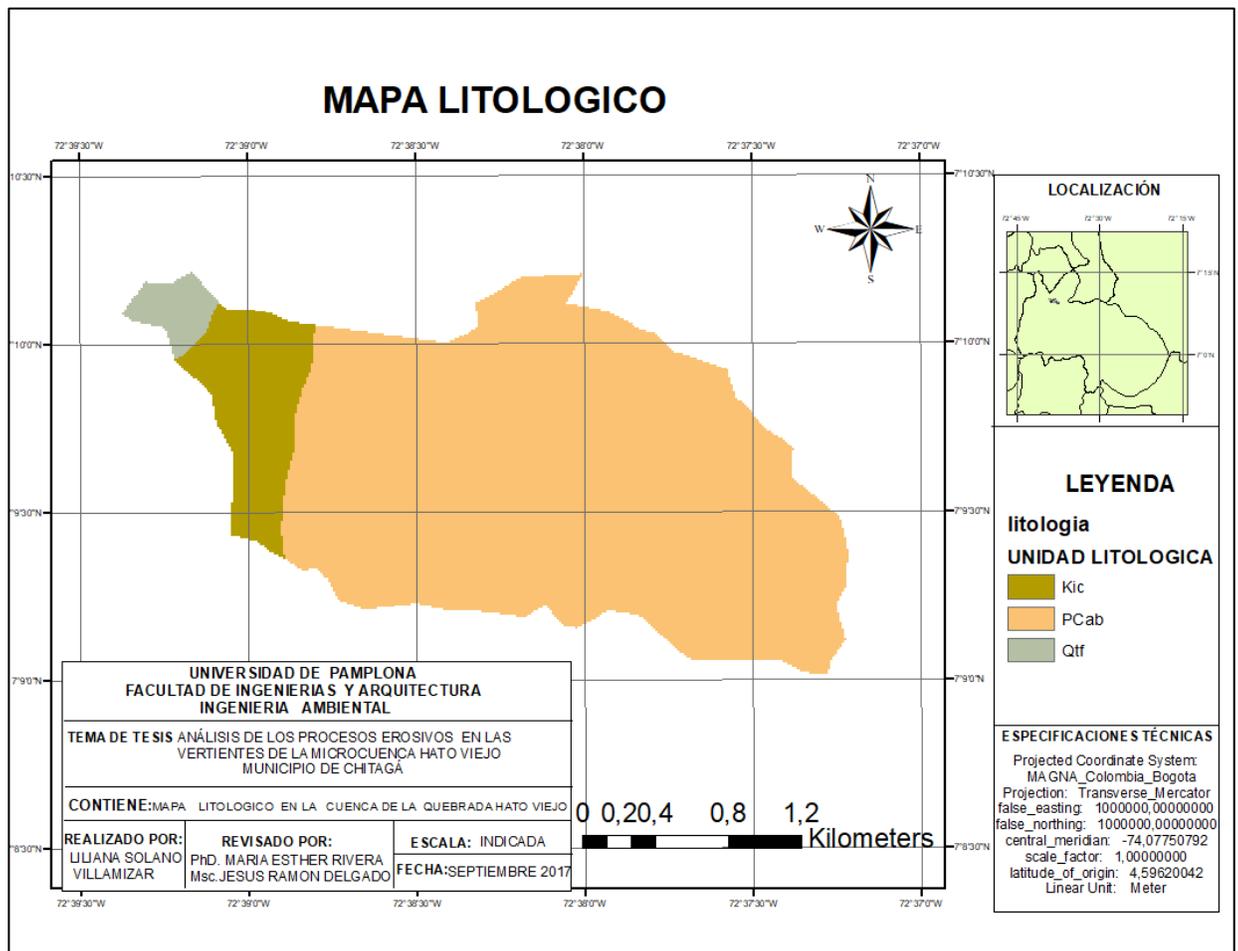


Figura 51. Mapa litológico para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

Geotecnia: Esta capa tiene información acerca del grado de consolidación de los materiales. Se ha derivado del mapa geológico mediante las tablas de correspondencia del IGAC. Para ello, se ha reclasificado la capa de litología en 4 categorías de agrupación: roca dura, roca blanda, suelo consolidado y suelo no consolidado según la cohesión del material (Figura 52)

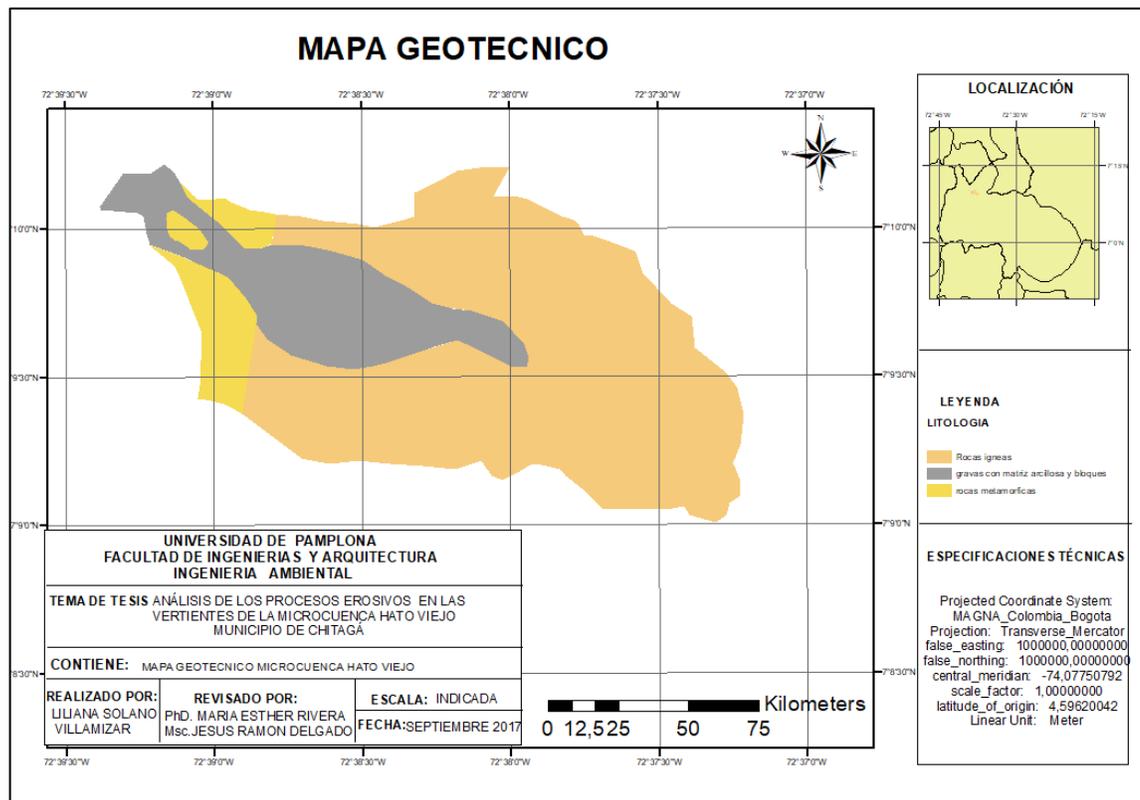


Figura 52. Mapa de geotécnico para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

USO DEL SUELO

En la zona de estudio la influencia antrópica ha alterado las características del suelo y potencializado su degradación presentando áreas de alta a muy alta susceptibilidad a que se presenten procesos y grados de erosión, mientras que en los sitios con susceptibilidad moderada se encontraron dispersos pequeños predios para explotación agropecuaria. La alta relación entre características del suelo, pendiente, cobertura y uso actual del suelo y el comportamiento hidroclimatológico implica la necesidad de iniciar una serie de procesos educativos y de sensibilización que tengan como objetivo el manejo integral y concertado del suelo y el agua como alternativa de mitigación a este tipo de problemática, en el uso del suelo es con fines agropecuarios de manera extensiva lo que aumentan la degradación del suelo, además no se tienen en cuenta con buenas prácticas agrícolas (figura 53).

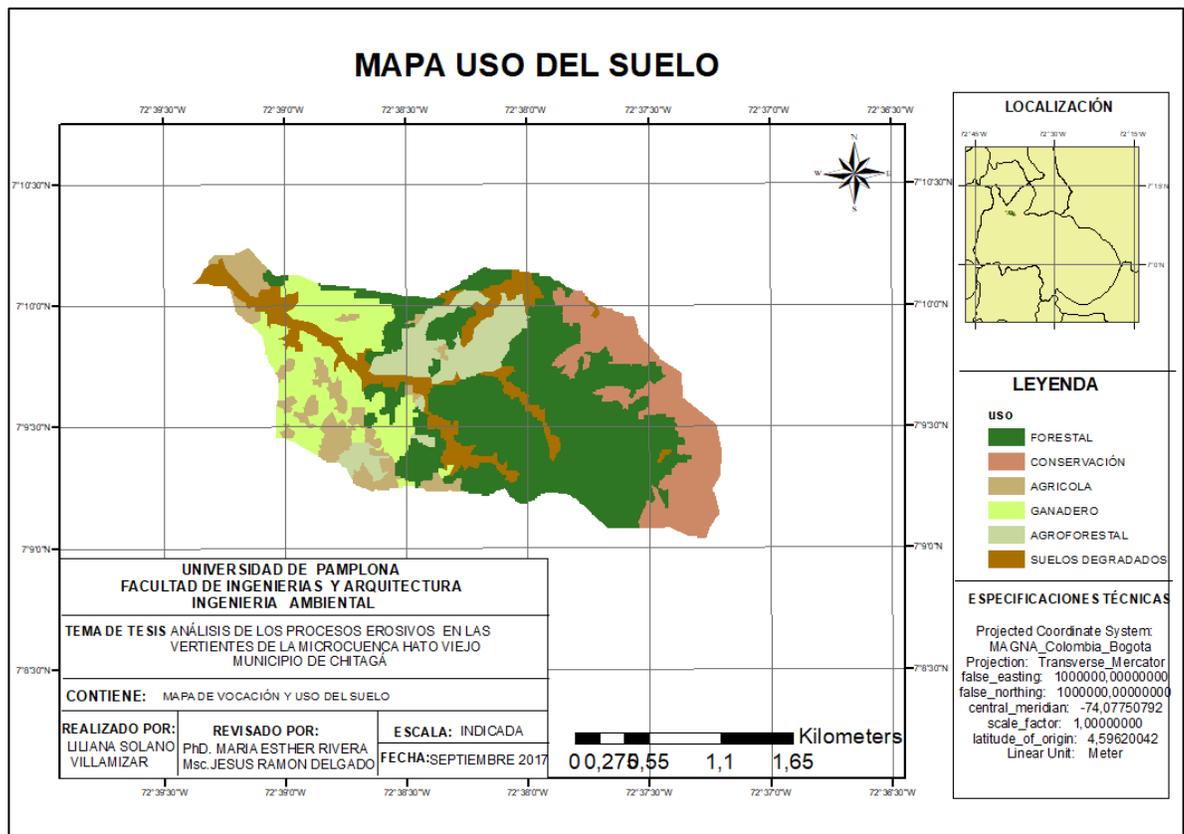


Figura 53. Mapa uso del suelo para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017)

SUSCEPTIBILIDAD DE EROSIÓN EN VERTIENTES

En el mapa obtenido de susceptibilidad por erosión en vertientes mediante la evaluación multicriterio donde se puede ver con facilidad como las áreas de baja pendiente situadas en las parte baja de la microcuenca, son calificadas como de susceptibilidad baja, en las zonas de ladera es más frecuente la susceptibilidad alta por tener mayor grado de inclinación y pendientes escarpadas y abruptas.

En consecuencia con estos resultados, se utiliza el mapa de susceptibilidad calculado mediante análisis multicriterio, donde el factor más importante es la pendiente del terreno (Figura 54).

Muy alta: Presenta condiciones de muy alta susceptibilidad a la erosión y mediana capacidad de almacenamiento de agua del área, asociado a zonas con pendientes escarpadas, buena cobertura boscosa, suelos susceptibles a la degradación física, precipitaciones con características bimodales, intensas y mal distribuidas, y grados moderados de erosión.

Alta: Caracterizado por presentar alta susceptibilidad a la erosión y baja capacidad de almacenamiento de agua. Corresponde a zonas donde hay mayor intervención antrópica por prácticas agropecuarias, parcelaciones y por lo tanto menos cobertura boscosa, suelos susceptibles a la degradación física y grados moderados de erosión.

El área presenta condiciones críticas que la hacen susceptible a presentar fenómenos de degradación de suelos y mediana a baja capacidad de almacenamiento de agua, lo cual implica conservar de manera adecuada la cobertura boscosa actual y realizar prácticas integrales hacia la reconversión del uso del suelo a procesos agroecológicos y sustentables de producción de acuerdo con sus potencialidades y limitaciones biofísicas y socioeconómicas.

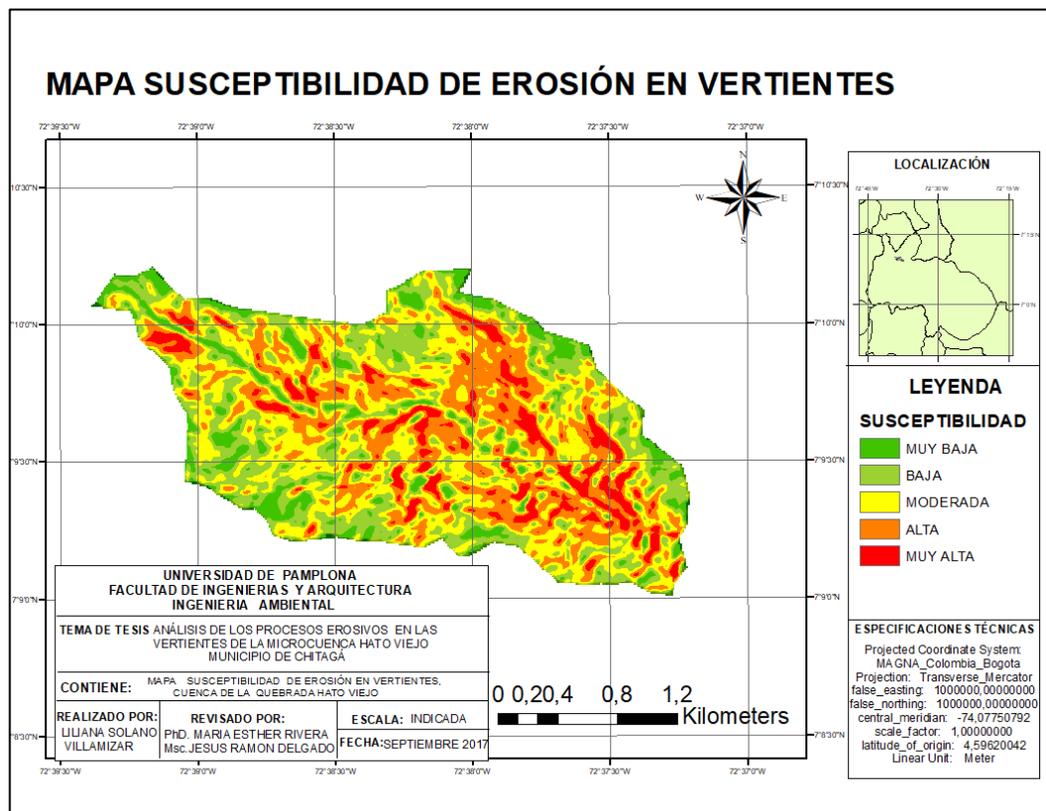


Figura 54. Mapa de susceptibilidad de erosión en vertientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo

Fuente: Solano V, (2017)

AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS DE LADERAS.

El análisis de amenaza por erosión se evaluó a partir de 2 detonantes la precipitación y sismicidad, a partir del cálculo la información es tratada de forma cualitativa, estableciendo relaciones lógicas entre la susceptibilidad y el detonante, se ha clasificado estableciendo cuatro categorías, Muy alta, Alta, Moderada y Baja.

PRECIPITACIÓN AGENTE DETONANTE EN LA EROSIÓN DE LADERAS

A partir de registros históricos de precipitación, se determinaron las lluvias críticas como agente detonante de los deslizamientos, su duración y período de retorno. La elaboración de las gráficas de lluvias máximas acumuladas y sus promedios para diferentes duraciones junto con la precipitación diaria acumulada antecedente al evento, permiten observar la magnitud de la precipitación que puede producir los movimientos. Se realizó además un análisis de probabilidad de las lluvias máximas acumuladas para determinar estadísticamente el periodo de retorno de la lluvia para diferentes duraciones. Con los resultados anteriores para cada una de las estaciones seleccionadas y analizadas y teniendo en cuenta las condiciones hidrológicas locales, específicamente la intensidad de la lluvia, se elaboró la distribución aproximada de la precipitación crítica para una duración y periodo de retorno establecidos, interpolando y determinar la variabilidad espacial de los valores máximos de precipitación que actúan como detonante (figura 55) en los procesos erosivos de las vertientes, las precipitaciones máximas en el área de confluencia varían de 108 a 114 mm en 24 horas que al impactar sobre el suelo ocasiona el desprendimiento del terreno.

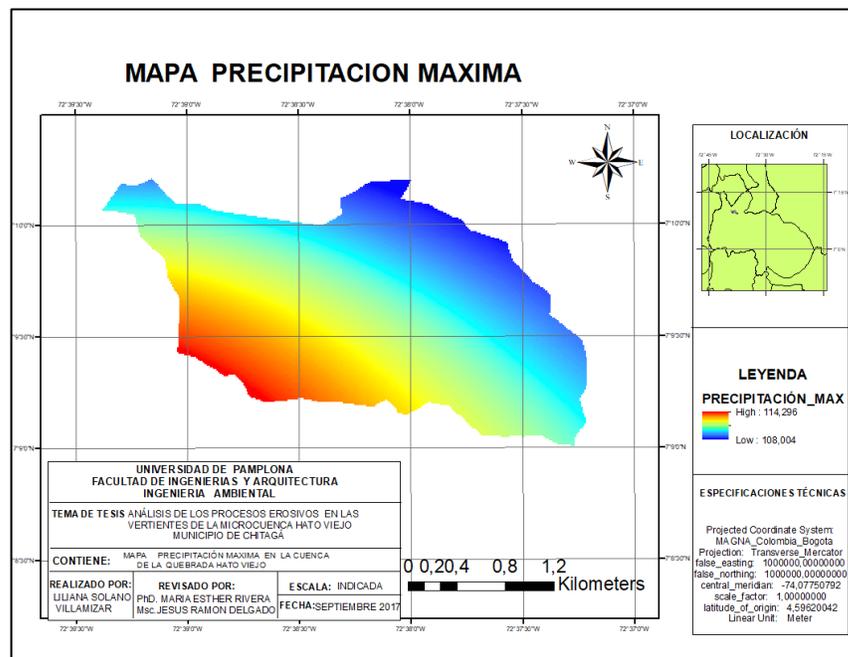


Figura 55. Mapa de susceptibilidad de erosión en vertientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo

Fuente: Solano V, (2017).

SISMICIDAD

La liberación de energía debido a la dinámica de las placas tectónicas, se manifiesta por temblores y sismos. La existencia de fallas tectónicas ocasiona movimientos en masa, dado que los sismos actúan como mecanismo disparador de estos movimientos.

En la microcuenca Hato Viejo del municipio de Chitagá se presentan una serie de fallas geológicas atraviesa en sentido SE-NW, estas son las fallas de Chitagá, Morronegro y Chucarima, también en este trend estructural se identifican una serie de fallas menores asociadas por donde también existe liberación de energía. Relativamente la probabilidad que se presenten sismos en la zona es alta, según un estudio realizado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica y de acuerdo al “Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes, Decreto 1400 de 1984.

La falla de Chitagá, hacia el norte del municipio presenta actividad sísmica y evidencias morfológicas de actividad tectónica que afecta depósitos cuaternarios indicando actividad neotectónica (Paris y Sarria, 1988); hacia el sureste a lo largo del sistema de fallas de Chucarima, localizado al extremo de esta microcuenca en donde se presentan numerosos deslizamientos y flujos lo cual corrobora esta apreciación. Siguiendo el lineamiento de la falla de Chitagá por el eje del río del mismo nombre, se aprecian deslizamientos, terrazas y otros depósitos cuaternarios que indican el intenso fracturamiento de las rocas y una posible actividad tectónica cuaternaria, previa la depositación de estas unidades.

Por ello, todas las franjas adyacentes a las fallas de Chitagá, morro negro y Chucarima se consideran como de alta amenaza a la actividad sísmica. La zona de estudio presenta amenaza sísmica alta con Aceleración de 0.30, (figura 56) según el servicio geológico colombiano el municipio de Chitagá se han presentado sismos de baja magnitud (tabla 15) estableciendo que es una zona vulnerable a la ocurrencia de sismos lo que altera los suelos y genera el desprendimiento del terreno.

Fecha aaaa/mm/dd	Hora UTC hh:mm:ss	Magnitud MI	Longitud Grados	Latitud Grados	Profundidad Km
13/01/1995	20:59:13	2.6	-72.538	7.007	90
30/04/1995	0:52:47	2.7	-72.634	7.059	6
29/09/1995	20:08:13	3.3	-72.548	7.135	0
6/10/2000	15:01:18	3.5	-72.609	7.062	160
29/10/2001	21:54:44	2.2	-72.603	7.06	116.9
23/11/2001	0:39:01	1.8	-72.723	6.983	144.2
28/01/2004	6:05:24	2.6	-72.642	7.033	136.1
11/02/2004	4:37:42	2.2	-72.663	6.985	8
20/02/2005	20:58:49	2.1	-72.709	7.105	3.9
11/05/2006	0:13:01	2.1	-72.504	7.069	17.3
1/09/2008	2:31:21	2.2	-72.73	6.989	145.6
6/09/2008	1:34:09	2.2	-72.619	7.088	130
12/10/2008	1:48:33	1.6	-72.713	6.982	97.9
13/01/2009	23:55:49	1.6	-72.581	7.033	117.1
16/01/2009	6:40:03	1.4	-72.591	7.069	116

27/01/2009	5:58:48	1.2	-72.731	7.098	135.5
1/06/2009	13:23:26	3.4	-72.457	6.971	1.2
1/06/2009	17:35:22	3.7	-72.466	7.01	0
1/06/2009	17:46:13	1.9	-72.446	6.975	3.8
2/10/2009	23:26:34	1.5	-72.723	6.985	111
30/10/2009	15:25:01	2.1	-72.612	7.044	140
25/04/2010	3:36:39	1.3	-72.643	7.062	4.3
25/06/2010	8:49:30	2.3	-72.541	7.105	4
29/08/2010	6:36:47	2.3	-72.758	7.051	4.2
25/03/2011	0:53:27	1.7	-72.689	7.074	128.3
29/04/2011	3:10:07	1.3	-72.568	7.106	22.8
25/06/2011	5:56:51	1.5	-72.716	7.11	136
3/07/2011	14:30:39	1.2	-72.434	7.045	66.7
8/08/2011	7:00:33	1.6	-72.737	7.041	155.3
13/07/2012	0:41:04	1.2	-72.524	7.098	70.6
4/10/2012	17:13:16	1.9	-72.648	7.023	120
21/12/2012	2:09:05	1.5	-72.734	7.068	2.4
17/02/2013	11:43:41	3.4	-72.617	7.133	0
21/03/2013	4:27:24	1.4	-72.523	7.068	68
10/08/2013	17:37:04	2.1	-72.448	7.02	3.1
30/04/2014	7:44:41	1.8	-72.706	7.018	4
16/06/2015	6:56:50	1.4	-72.748	7.08	131.4
30/10/2015	9:10:18	1.4	-72.66	7.057	4
27/12/2015	15:10:10	1.5	-72.696	7.025	150.4
26/02/2017	0:05:06	0.8	-72.714	7.079	24.1
26/02/2017	6:13:01	0.7	-72.514	7.123	74.4
13/04/2017	8:19:44	1.4	-72.491	7.104	74

Tabla 15. Sismos presentados en el municipio de Chitagá- Norte de Santander
Fuente: Servicio Geológico Colombiano, (2017)

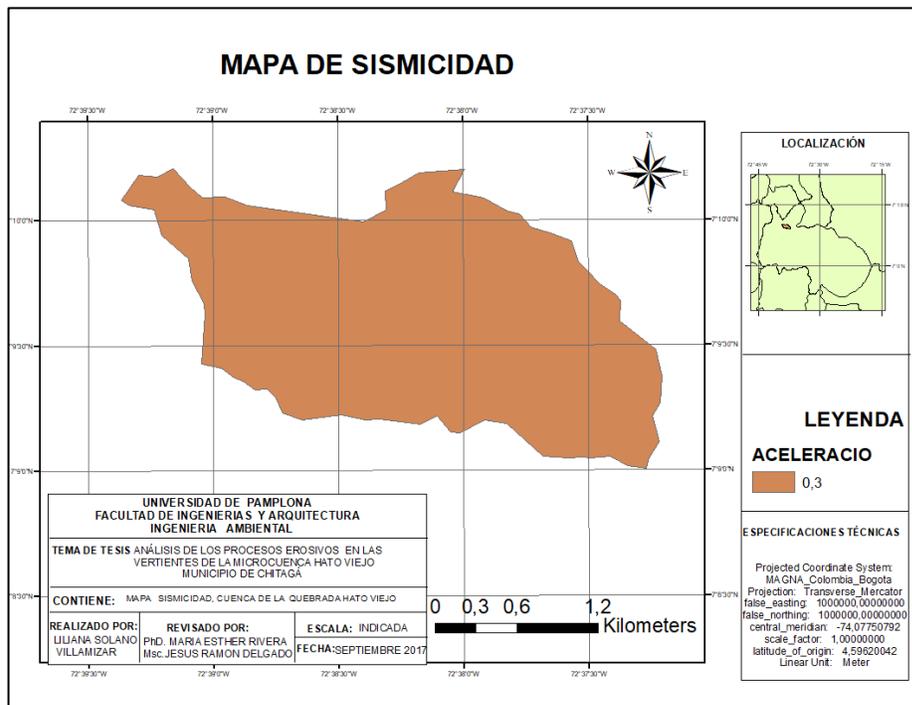


Figura 56. Sismicidad para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

El cálculo de la amenaza de movimientos de ladera incluyendo un factor detonante por precipitación crítica y sismicidad posibilita la representación de un escenario realista en la zona.

En el mapa se observa como la amenaza muy alta a movimientos de ladera queda representada sobre todo en la zona sureste, salvo en las pequeñas áreas en las que existen materiales más consolidados, donde se amplifica menos la onda sísmica se evidencia que los movimientos de laderas van en dirección SE-NW de acuerdo a las fallas presentes en la zona. No obstante, la variabilidad espacial de la amenaza de movimientos de ladera dentro de la zona estudiada, se debe principalmente a la susceptibilidad del terreno, y al efecto de los factores detonantes, el mapa de amenaza a los movimientos de laderas (Figura 57) representa amenaza alta y muy alta en gran parte de la microcuenca.

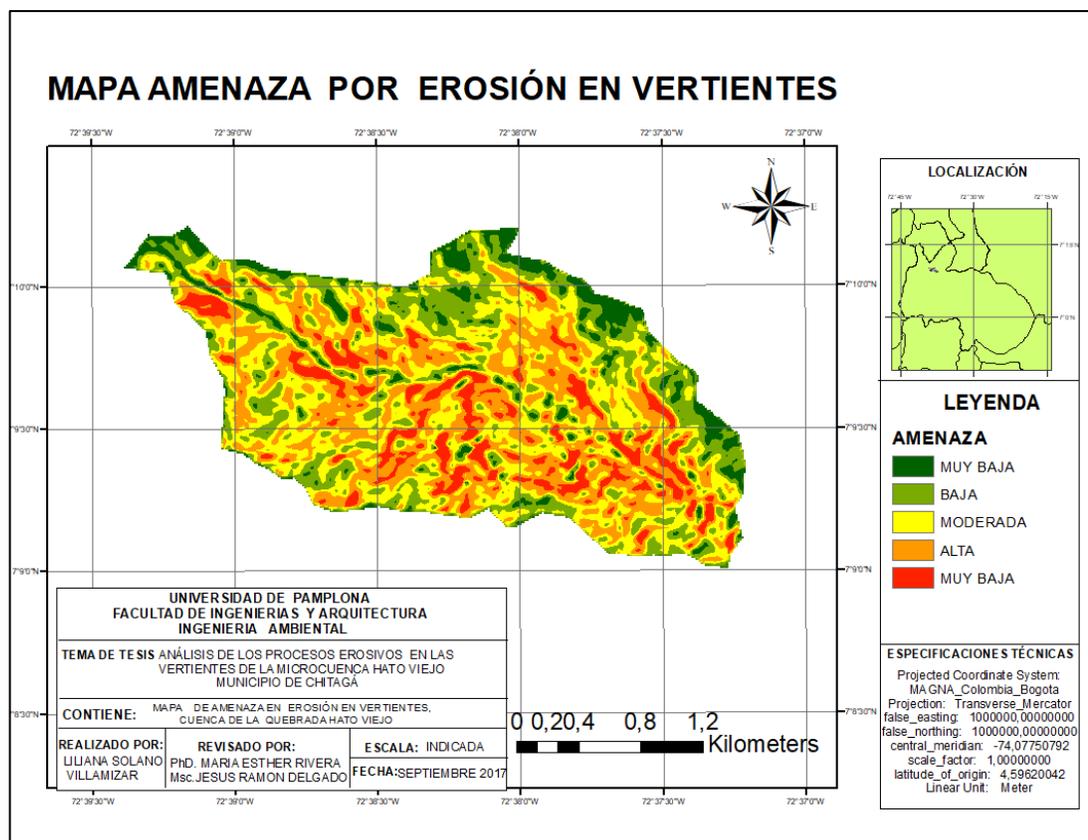


Figura 57. Mapa de amenaza de erosión en vertientes para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo
Fuente: Solano V, (2017).

GENERACION Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Al evaluar los procesos erosivos de la microcuenca Hato Viejo resulta imprescindible conocer el comportamiento del material sólido producido o generado en la cuenca, que es transportado luego por el sistema fluvial. Asimismo también es de importancia conocer cómo es el mecanismo del transporte de ese sedimento generado, a lo largo de los cauces de la red, con el fin de poder evaluar los procesos de erosión y sedimentación que pueden presentarse. En las zonas con suelos con escasa vegetación y altas pendientes, las precipitaciones intensas tienen un importante efecto erosivo en la cuenca, con el consiguiente elevado transporte sólido en los cursos que conforman la red de drenaje de la quebrada Hato Viejo.

En la quebrada Hato Viejo se determinó la producción de sedimentos a partir de la erosión superficial donde se establece la producción de sedimentos que se generan (figura 58) estableciendo que en las áreas degradadas en el cauce y los deslizamientos es donde se presenta mayor erosión superficial potencial y por ende mayor aporte de sedimentos, el aporte de sedimento es necesario para definir criterios respecto al manejo de los recursos de una cuenca, es decir para la planificación de medidas estructurales y no estructurales como el puente Hato Viejo ubicado sobre la quebrada que sirve como corredor vial hacia el interior del país, o la vía de interconexión veredal.

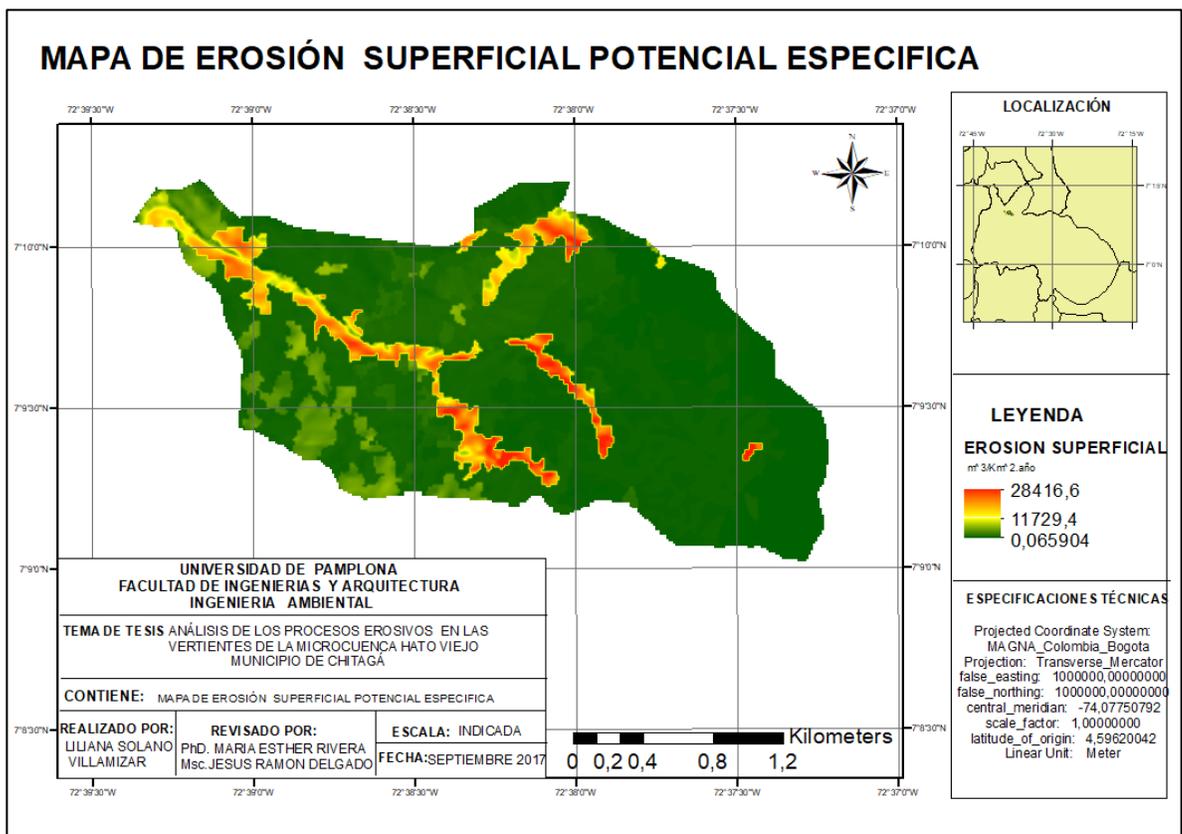


Figura 58. Mapa de erosión superficial potencial específica para la microcuenca de la quebrada Hato Viejo

Fuente: Solano V, (2017).

Al establecer los puntos críticos donde se presenta mayor depositación de sedimentos y al analizar los niveles en cada punto se nota una variabilidad (figura 59) tras los eventos de precipitación (figura 60) se evidencia que los niveles cambian debido a que la cuenca es torrencial y se presenta sedimentación y socavación en el cauce

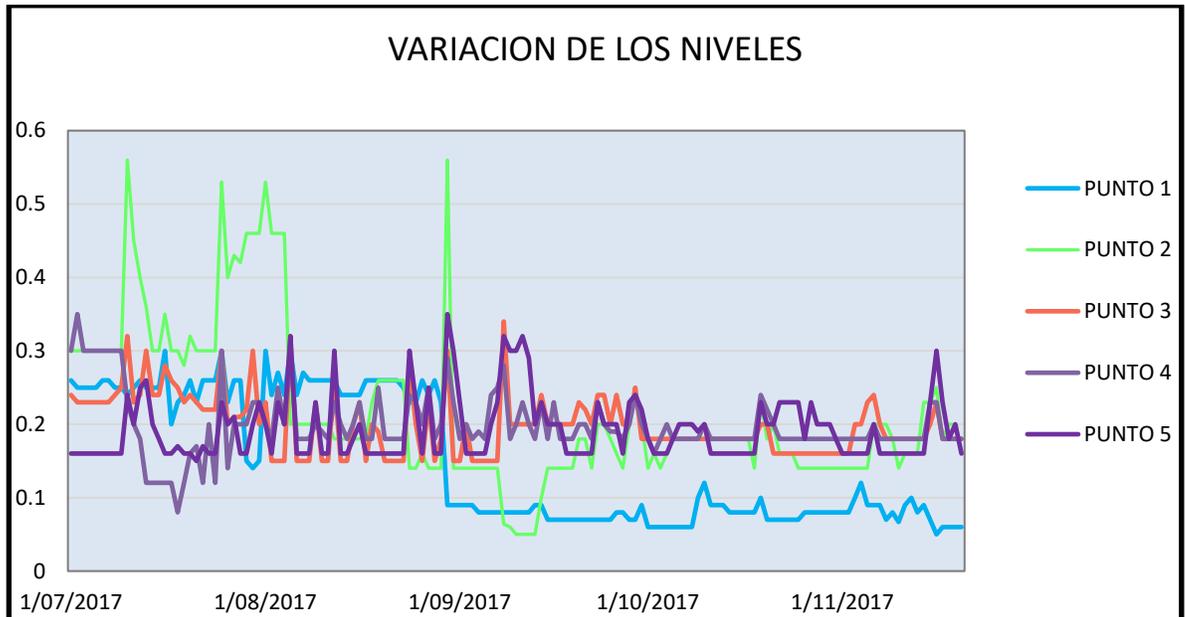


Figura 59. Variación de los niveles en los 5 puntos de muestreo en la quebrada Hato Viejo.
Fuente: Solano V, 2017

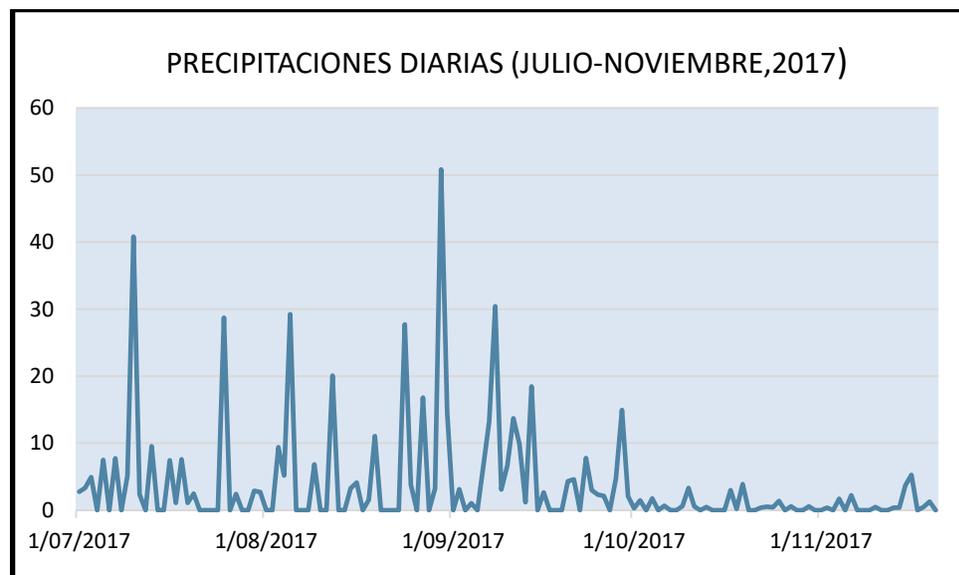


Figura 60. Variación de las precipitaciones diarias (julio- noviembre, 2017) en la microcuenca Hato Viejo.
Fuente: Solano V, 2017

Los eventos torrenciales en la microcuenca Hato Viejo han modificado drásticamente el canal natural de la quebrada (figura 61) debido a la gran cantidad de sedimentos que transporta y velocidad del flujo generando socavación y sedimentación en el cauce.



Figura 61. Cambios de la sección en el puente Hato Viejo tras los eventos presentados, A-2013, B-junio 2015, C- Julio 2015, D -julio 2015, E -octubre 2015, F -Noviembre 2017.
Fuente: Solano V, (2017)

En la microcuenca Hato Viejo de acuerdo a las características de la red hídrica y el cauce presenta un tiempo e concentración de 16,6 minutos, según el hidrograma unitario (figura 62) se presentaría un caudal máximo de 70,41 m³ por segundo, este caudal varia con respecto a la duración, el volumen precipitado, distribución espacial e intensidad de las lluvias.

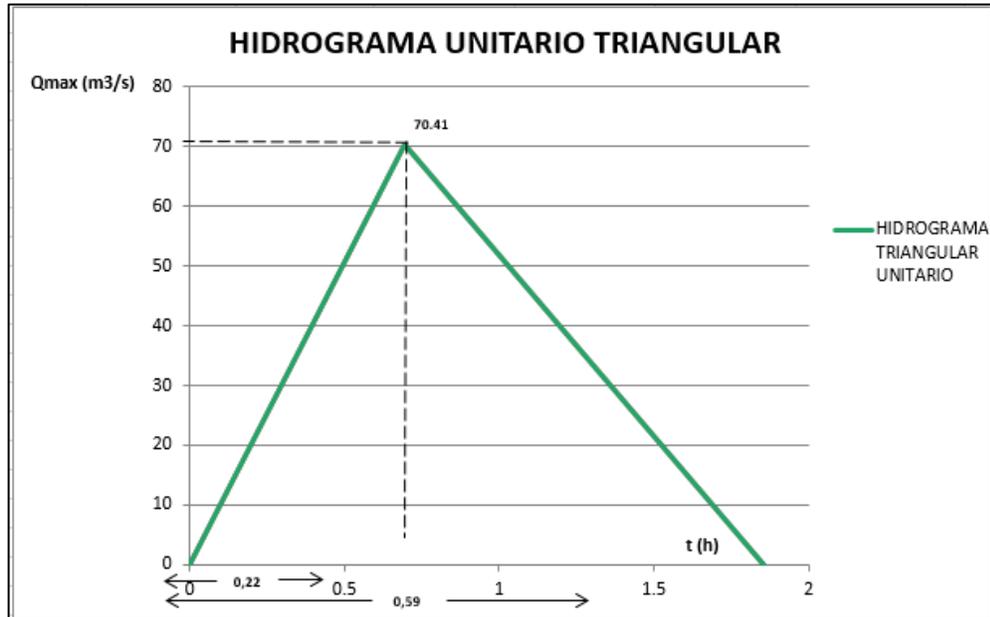


Figura 62. Hidrograma unitario triangular para la microcuenca Hato Viejo.
Fuente: Solano V, (2017)

En el periodo de estudio se presentaron cuatro eventos representativos de flujos torrenciales que transportaron gran cantidad de sedimentos en su mayoría bloques de gran tamaño modificando las secciones a lo largo del cauce. En las figuras 63 a 67 se representan los 5 puntos analizados posteriores a cada evento donde se evidencia los procesos de socavación y sedimentación en el lecho del cauce.

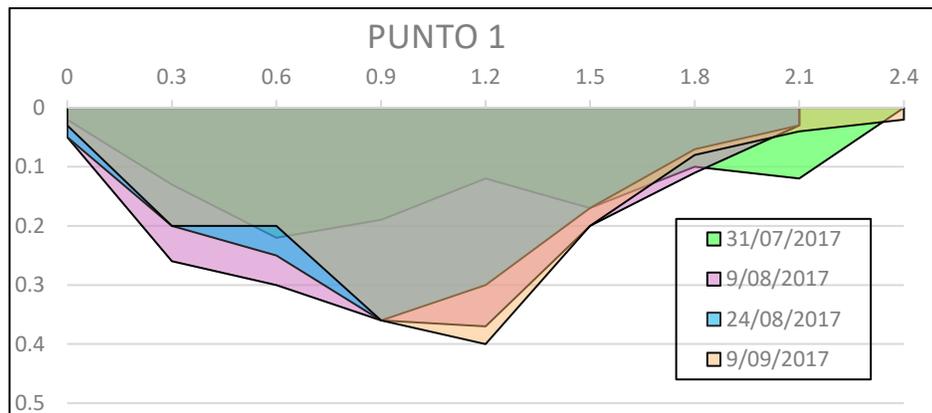


Figura 63. Variación de la sección punto 1 tras eventos presentados en el periodo de estudio.
Fuente: Solano V, (2017)

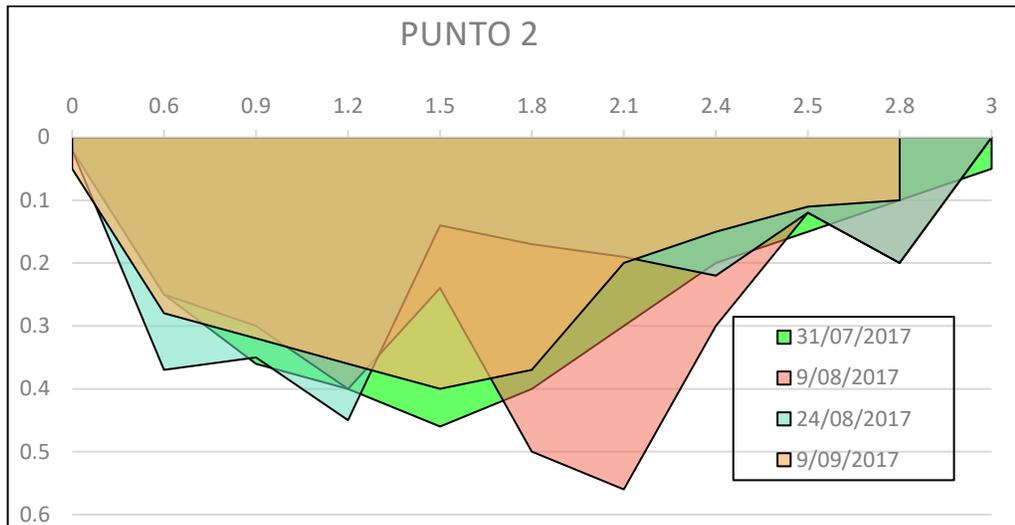


Figura 64. Variación de la sección punto 2 tras eventos presentados en el periodo de estudio.
Fuente: Solano V, (2017)

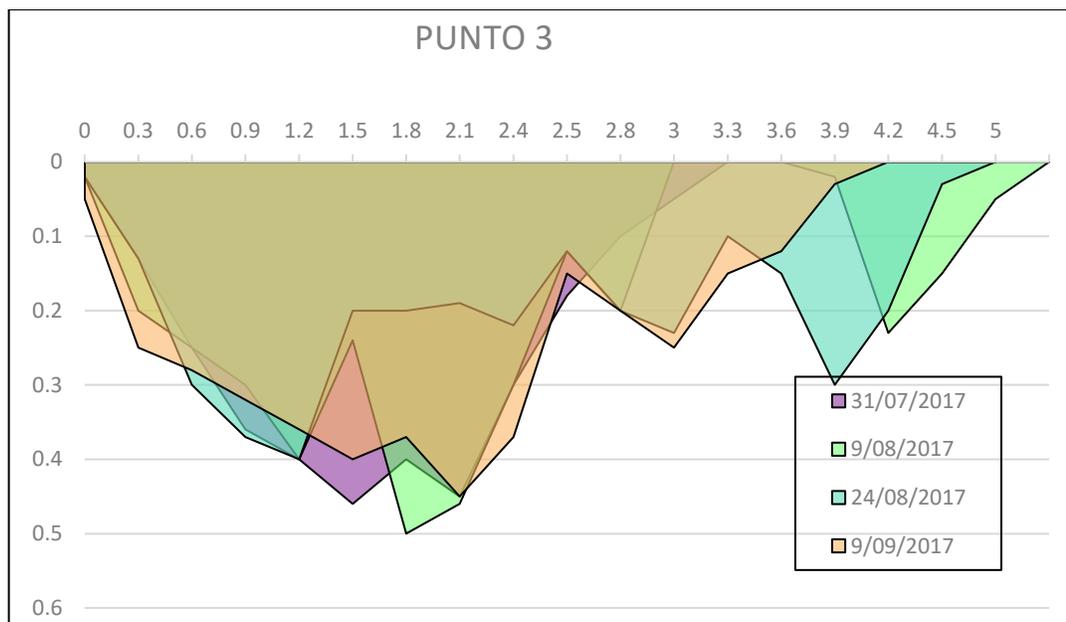


Figura 65. Variación de la sección punto 3 tras eventos presentados en el periodo de estudio.
Fuente: Solano V, (2017)

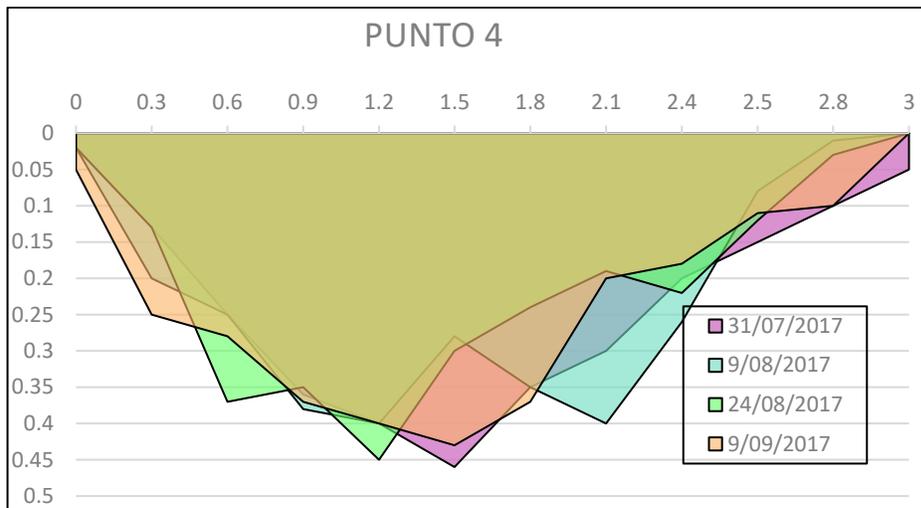


Figura 66. Variación de la sección punto 4 tras eventos presentados en el periodo de estudio.
Fuente: Solano V, (2017)

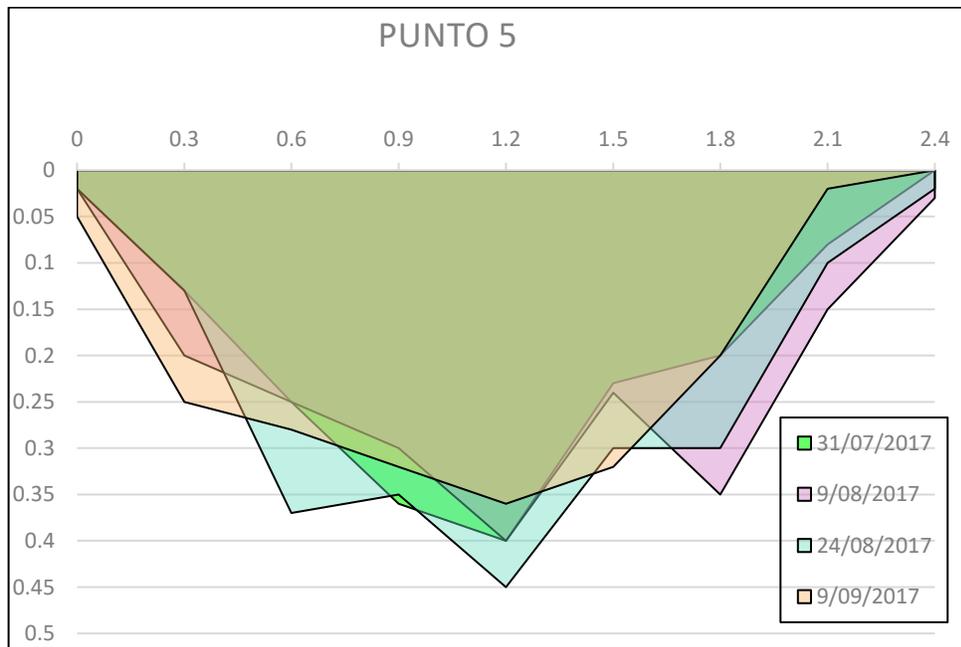


Ilustración 67. Variación de la sección punto 5 tras eventos presentados en el periodo de estudio.
Fuente: Solano V, (2017)

CONCLUSIONES

Los factores que controlan los procesos erosivos en la microcuenca Hato Viejo son los siguientes: Ausencia de cobertura vegetal, o la eliminación de ella. La masiva explotación del suelo con fines agropecuarios, se traducen en elevadas pérdidas de suelo, sobre todo si una vez eliminada la cubierta vegetal se efectúan labores agresivas en laderas, además se presentan pendientes abruptas y escarpadas en más del 86 % del área que favorecen los procesos erosivos (incremento de la velocidad del agua de escorrentía), y por ser una zona montañosa, presenta desniveles importantes que aumentan la torrencialidad. En definitiva, la microcuenca presenta niveles altos de erosión lo que amerita establecer un plan de manejo integral de la microcuenca, en el cual una de las actividades más importantes debería ser la conservación del medio ambiente a través de la recuperación y conservación del suelo, mantenimiento o instalación de una cobertura forestal en las zonas más críticas de la cuenca que permitiría minimizar los procesos erosivos relacionados con la erosión hídrica.

La implementación de RUSLE en un SIG sobre la microcuenca Hato Viejo, nos permite obtener de forma global una visión general sobre el proceso de erosión hídrica en la zona, detectándose las zonas que son más sensibles y los usos del suelo que ayudan a controlar este riesgo. A la vista de los resultados obtenidos la microcuenca Hato Viejo presenta un conjunto de características naturales que la configuran como una zona con alto riesgo potencial de erosión hídrica. Tras analizar la erosión total en la microcuenca se observa que en las zonas de frondosa vegetación las áreas potencialmente más sensibles de la microcuenca el riesgo de erosión hídrica disminuye con respecto a la erosión potencial. Sin embargo existen zonas con vegetación escasa donde predominan los cultivos de regadío, zonas donde se presentan deslizamientos y en las zonas aledañas al cauce de la quebrada que presentan tasas de erosión hídrica muy por encima de la pérdida tolerable del suelo (10/t al año).

El aporte de sedimentos procedentes del suelo producido por el desmantelamiento de materiales debido a la erosión hídrica supone un grave problema ya que producen turbidez o contaminación del agua, se disminuye la capacidad del canal producto de la sedimentación y socavación. Por ello consideramos pertinente que se vigile la erosión hídrica en estas zonas y que se ponga en marcha alguna estrategia para controlar la erosión como puede ser en zonas donde la vegetación es escasa practicar reforestaciones con especies nativas que aumenten la consolidación de los suelos y disminuyan el desprendimiento de estos materiales.

El análisis de la erosión en la microcuenca Hato Viejo es de vital importancia a la hora de llevar a cabo cualquier tipo de planificación territorial evitando implantar usos del suelo agresivos sobre los territorios más vulnerables, ya que estos lo único que producirían sería incrementar la erosión hídrica disminuyendo la productividad de los suelos. Consideramos que este tipo de estrategias en la microcuenca podrían llevarse a cabo sin mayor problema ya que gran parte de los terrenos que presentan erosión no tolerable forman parte de zonas protegidas o terrenos sin vegetación que no tienen un uso productivo que lo impida. La

conservación del suelo es de suma importancia para la economía y la sociedad que se asienta sobre ese territorio ya que de la calidad y productividad del mismo dependen numerosas actividades.

La susceptibilidad a los movimientos de ladera debe ser estudiada en cada espacio geográfico con los medios y datos disponibles, estando el estudio muy condicionado a la resolución y escala de la información de partida, en este caso principalmente, a la información disponible sobre los factores que intervienen en la susceptibilidad, además de los factores propuestos en las diferentes metodologías, cuando se realiza un estudio a una escala tan local como este en territorios tan geológicamente inestables como los de la microcuenca Hato Viejo, no basta con obtener un mapa litológico de detalle del lugar que se quiera estudiar, sino que también se debe cuantificar el grado de meteorización que presenten dichos materiales, sobre todo en territorios situados con alto grado de humedad donde el coeficiente de cohesión es bajo y son altamente susceptible a erosión por laderas, en la zona de estudio se evidencia que los deslizamientos en las vertientes se ven reflejados en la erosión hídrica ya que estos materiales son transportados y depositados en zonas aledañas al cauce.

RECOMENDACIONES

Para trabajos futuros en la zona, se debería conocer y cartografiar en detalle la estratigrafía de la microcuenca Hato Viejo. Con un estudio de la columna estratigráfica se posibilitará la comprensión de la dinámica de los materiales que afloran en superficie, ya que estos materiales se apoyan sobre los materiales subyacentes y de ello depende también la susceptibilidad al movimiento de las laderas.

Por otro lado, se propone una nueva línea de estudio de carácter biogeográfico y edafológico relacionada con las zonas agrícolas situadas en pendientes elevadas. El desarrollo edáfico sobre las zonas productivas y su posible relación con la mayor susceptibilidad a los movimientos de laderas no está suficientemente estudiado. Las plantaciones quizás repercutan en la estabilidad de las laderas ya que por sus características físicas presentan uso potencial de conservación sin embargo es usado con fines agrícolas y se pasa de grandes árboles con profundas raíces, a pequeños árboles y arbustos con raíces más superficiales.

Completar este estudio en un futuro con un mayor volumen de datos provenientes de un trabajo de campo más exhaustivo y durante un periodo más largo utilizando otras técnicas de información geográfica, sería de gran utilidad para poder ser más precisos en el análisis de la susceptibilidad y amenaza a movimientos de ladera.

.La calibración y validación del modelo es un factor clave para reducir la incertidumbre y el aumento en la capacidad de predicción. Debido a la escasez de información de este no se calibro, sin embargo se recomienda generar la información necesaria para este propósito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEMA, A. (2002). Señales medioambientales. Resumen. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunicaciones Europeas.

ARNÁEZ, J., P. RUÍZ-FLAÑO, T. LASANTA, L. ORTIGOSA, J.A. LLORENTE, N. PASCUAL (*et al.*). (2012). Efecto de las rodadas de tractores en la escorrentía y erosión de suelos en laderas cultivadas con viñedos. *CIG.*, 115-130.

ARAYA VERGARA, J. (1966). El sistema de erosión lineal en el clima templado cálido transicional de Chile. En Conferencia Regional Latinoamericana: Tomo 3 Temas geográfico físicos, México: Unión Geográfica Internacional.

BALBIS. A, MIYNO. S, CASTELLÓ. E, VANOLI. G, análisis multitemporal para evaluación de erosión en el río Ctalamochita (tercero) en la localidad de Villa Ascasubi, Universidad Nacional de Córdoba.

BALVANERA P. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. En: Sarukhán J. (Coord.). Capital natural y bienestar social. Volumen II. Estado de Conservación y Tendencias de Cambio. CONABIO. México, D.F

BARRÍA. B, (2009). Análisis de los procesos de erosión en conos volcánicos piroclásticos en el ambiente insular oceánico de isla de pascua – chile. Santiago, CHILE

BUITRAGO. J, (2011). Desarrollo un modelo de visualización de erosión hídrica en el municipio de Samacá, Boyacá).

BRANDT, C. (1989). The size distributions of throughfall drops under vegetation canopies.

CAMARGO C, VIDAL R, ANDRADES J, (2012). Evaluación multitemporal de procesos de erosión en ladera mediante el uso de SIG y sensores remotos en la micro-cuenca torrencial ‘La Machirí’, estado Táchira-Venezuela.

CASTRO, C. y VICUÑA, P. (1990). Caracterización de la erosión lineal en planicies costeras de Chile Central. *Revista de Geografía Norte Grande.*

CASTRO-MENDOZA, I. (2013) Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34 (2): 3-16.

CCE, C. D. (2002). Comunicación de la Comisión al Consejo, el parlamento europeo, el Comité Económico y Social y el Comité de las Regiones. Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. Bruselas: CCE

DELGADO R, Jesús. (2011).Informe geológico ambiental preliminar para el área de Pamplona. Colombia.

DÍAZ, J. (2001), control de erosión en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander Bucaramanga – Colombia.

DONOSO, C. y GHIO, A. (1986). Procesos de erosión en la Cordillera de la Costa: comuna de San Pedro Estero Loica. Memoria de título, Geografía, Universidad de Chile, Santiago.

ESQUEMA DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL ÁREA RURAL Y URBANA DEL MUNICIPIO DE CHITAGÁ NORTE DE SANTANDER. (EOT). (2005), Diagnóstico y prospectiva territorial tomo 1: Descripción de suelos de Chitagá. Colombia.

ESCOBAR, A (2017), Estudio Nacional de la degradación de suelos por erosión.

FARFÁN, R. (2002). Determinación del índice de erosividad pluvial (R) de la ecuación universal de pérdidas de suelos, para dos estaciones pluviográficas de la VII Región del Maule. Tesis Ing. Forestal. Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales. 123 p.

FAO. (1967). La erosión del suelo por el agua. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación.

FIGUEROA J, IBAÑEZ C, ARTEAGA R., ARELLANO M, y VASQUEZ P, (2011). Cambio de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las casas, México.

FLOREZ, A. (2015),Estudio de movimientos en masa y flujos torrenciales en el municipio de Chitagá. Colombia.

FOURNIER, F. (1975). Conservación de suelos. (J.A. Medina Trad.). Madrid, España: MundiPrensa, (Trabajo original publicado en 1972).

GARCÍA-CHEVESICH, P. (2005). Changes on soil resources following the historical

GARCÍA-CHEVESICH, P. (2008). Procesos y control de la erosión. Outskirts Press Rodeo-Chediski wildfire in Arizona. M. Sc. Thesis. Watershed Management. School of Natural Resources. The University of Arizona.

GARCÍA, J. (2006). La erosión: Aspectos conceptuales y modelos. In Hidrología de superficie y conservación de suelos.

GARDNER, T., (1983), Experimental study of knickpoint and longitudinal profile evolution in cohesive, homogeneous material: Geological Society of America Bulletin.

GREGORY J.K. and WALLING E.D. (1985). Drenaige Bassin Analysis. The Bath Press. Victoria, Australia. 451 p.

GONZÁLEZ J, (2004). Análisis de procesos de erosión local en márgenes de cauces fluviales con curvatura en planta, Madrid. España.

HJULSTROM, F. (1935). The morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. Bulletin of Geological Institute of Uppsala 25: 221–527.

HONORATO, R. y CRUZ, G. (1999). Erodabilidad y erosión actual de los suelos de Isla de Pascua. Ciencia e Investigación Agraria.

HURST, D., MUDD, S.M., WALCOTT, R., ATTAL, M., YOO, K., (2012,) Using hilltop curvature to derive the spatial distribution of erosion rates: Journal of Geophysical Research.

IDEAM. (1996). Evaluación de los Sistemas de Producción Agrícola, en Áreas de Agricultura Intensiva del País, degradación de Suelos y Aguas por Efecto de los Plaguicidas. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.

INDERENA. (1977). Mapa de Intensidad de la erosión en suelos de Colombia. Bogotá.

NGEOMINAS. (2011). Carbón. Recursos minerales de Colombia. Ingeominas, Publ. Geol. Esp., 1:1023-1113. Segunda edición. Bogotá.

J.M DEL VALLE Y J. DEL VAL ,(2003). Procesos de erosión y análisis de sus condicionantes en una región semiárida: la cuenca de cornialto (Bardenas, Navarra), Madrid, España.

JULIVERT, M.; BARRERO, D.; BOTERO, G.; DUQUE CARO, H. et al. (1968). Lexique Stratigraphique International. Centre National Recherche Scientifique. Amerique Latine, Colombie. 5(4a):1-651 p. París.

KIRKBY, M. y MORGAN, R.P.C. (1991). Erosión de suelos (J. Hurtado, Trad.). México: Limusa (Trabajo original publicado en 1980).

LARUE, J.P., (2008), Effects of tectonics and lithology on long profiles of 16 rivers of the southern Central Massif border between the Aude and the Orb (France): Geomorphology.

LIENLAF, M. (2003). Caracterización de procesos erosivos en microcuencas de la comuna de San Pedro, Provincia de Melipilla. Memoria de Título, Geografía, Universidad de Chile, Santiago

MÁRMOL, L. (2006). Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. 287 pp

MAVDT, IGAC & IDEAM. (2010). Protocolo de Degradación de Suelos por Erosión. Bogotá D.C.: IDEAM, MAVDT, IGAC.MGAP, 2005. Nuestro suelo Patrimonio Nacional. Dirección General de Recursos Naturales Renovables, División Suelos y Aguas.

MEA Millenium Ecosystem Assessment. (2003). Ecosystems and Human Well - Being: Synthesis. Washigton D.C.: Island Press.

MILLER, J., (1991), The influence of bedrock geology on knickpoint development and channel-bed degradation along downcutting streams in south-central Indiana: Journal of Geology.

MIYASHIRO, A. (1973). Metamorphism and Metamorphic Belts. George Allen y Umwin, 492 p. London.

MORGAN, R.P.C. (1997). Erosión y Conservación del Suelo (2a. ed.). (P. Urbano y J. Urbano, Trads.). Madrid, España: Mundi-Prensa.

MORGAN, R. (2005). Soil erosion and conservation. National Soil Resources Institute. Cranfield University. Blackwell Science Ltd. Oxford, UK

NAVARRO, S. H. (2008). Manual de bioingeniería. Managua: Universidad Nacional de Nicaragua.

OLDEMAN, L. R. (1994). The global extent of land dgradation. En: D.J. Grenland e I. szabolcs (eds). Land Resilience and sustainable Land use. CABI, Wallingford, pp. 99-118.

PERLES, M. (1996). Problemas en torno a la erosión hídrica: conceptos y métodos de análisis. Madrid: Servicio de Publicaciones e intercambio Científico de la Universidad de Málaga.

POLA V, GARDUÑO M, H. DIAZ S. HERNANDEZ M, (2006). Estudio geotécnico asociado a procesos de remoción en masa del parque francisco zarco (ocolusen), Morelia (Michoacán, México). México.

POU ROYO, A. (1989). La Erosión. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Centro de Publicaciones.

REINHARDT, L., BISHOP, P., HOEY, T.B., DEMPSTER, T.J., SANDERSON, D.C.W., (2007), Quantification of the transient response to base-level fall in a small mountain catchment: Sierra Nevada, southern Spain: Journal of Geophysical Research.

RICHARDS, H. G. (1968). Cretaceous Section in Barco area of Northeastern Colombia. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 52 (12):2324-2636. Tulsa.

ROERING, J.J., KIRCHNER, J.W., SKLAR, L.S., DIETRICH, W.E., (2001), Hillslope evolution by nonlinear creep and landsliding: An experimental study: *Geology*.

RODRÍGUEZ, A., ARBELO, C., GUERRA, J. y MORA, J. (2002). Erosión hídrica en andosoles de las Islas Canarias. *Edafología*.

ROD, E.; MAYNC, W. (1954). Revision of Lower Cretaceous stratigraphy of Venezuela. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 38(2):193-283. Tulsa.

SLACK, D.; MARTIN, E.; SHETA, A.; FOX JR., F.; CLARK, L.; ASHLEY, R.(1996). Crop coefficients normalized for climatic variability with growing-degree-days. In: *Proceedings of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*. San Antonio, TX.

SUTTON, F. A. (1946). Geology of Maracaibo basin, Venezuela. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 30 (10):1621-1741. Tulsa.

STERK, G.; RAATS, P. (1996). Comparison of models describing the vertical distribution of wind eroded sediment. *Soil Science Society of America Journal*.

SCHLUNEGGER, F., NORTON, K.P., ZEILINGER, G., (2011), Climatic forcing on channel profiles in the Eastern Cordillera of the Coroico Region, Bolivia: *Journal of Geology*.

TERRENCE, J.; FOSTER, G.; RENARD, K. (2002). *Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control*. John Wiley and Sons, New York, NY. 338 p.

CHRISTENSEN, L.A., MCELYEA, D.E. (1988). Toward a general method of estimating productivity–soil depth response relationships. *J. Soil and Water Cons.*

VARGAS, R.; ARIAS, A.; JARAMILLO, L. ; TÉLLEZ, N. (1976). *Geología del Cuadrángulo I-13, Málaga*. Ingeominas, Bol. Geol., 1981, 24(3):76 p. Bogotá.

VEGA L, (2008). *evaluación de la erosión superficial por parcelas experimentales en suelos desnudos de la región de Coquimbo, Chile*.

VÉLEZ M. (1999). *Pérdida de suelo y relación erosión-productividad en cuatro sistemas de manejo del suelo*.

WARD, R.C. & M. Robinson.(1990). *Principles of Hydrology*. McGraw Hill, London. 365 p

WARD, D., GOLDSMITH, R., CRUZ, B., RESTREPO, H., (1973). Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander: Boletín Geológico, Ingeominas, v. 21, p. 1-132.

WINKLER, H. (1979). Petrogenesis of metamorphic rocks. Fifth edition. Springer-Verlag, 348 p. New York.

ZINCK, A. (2005). Suelos, información y sociedad. Gaceta ecológica número 76, Instituto Nacional de Ecología, México pag 7-22

ZINCK, J.A.; LOPEZ, G. I.; METTERNICHT, D. P.; SHRESTHA, Y VAZQUEZ SELEM, L. (2001). Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, JAG 3 (2001-1): 43-53.