



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**MODELACIÓN ESPACIAL DE LOS FACTORES
DE EROSIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO EL
HATO A PARTIR DEL USO DE SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.**

Spatial modeling of erosion factors from
use of geographic information systems

Luisa Fernanda Carvajal Aguirre

Manuela Montoya Gómez

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingenierías, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2020



Modelación espacial de los factores de erosión en la cuenca del río El Hato, a partir del uso de sistemas de información geográfica.

Spatial modeling of erosion factors from use of geographic information systems

Luisa Fernanda Carvajal Aguirre

Manuela Montoya Gómez

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesores (a):

Libardo Antonio Londoño Ciro, PhD

Línea de Investigación:

Sistemas de información Geográfica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingenierías, Escuela Ambiental.

Medellín, Colombia

2020

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones pluviométricas presentes en la Cuenca del río El Hato ----- 7

Tabla 2. Ejemplo evaluación de exactitud de los métodos de interpolación ----- 10

Tabla 3. Imágenes Landsat 8, cuenca del río El Hato ----- 8

Tabla 4. Reclasificación de factores ----- 20

Tabla 5. Valores ponderados, metodo SAATY ----- 21

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Localización Cuenca del río El Hato.-----	3
Ilustración 2. Flujo-grama de trabajo, Modelación espacial de la erosión en la cuenca del río El Hato-----	6
Ilustración 3. Modelo de Pendientes, Cuenca del río El Hato -----	14
Ilustración 4. Modelo de interpolación, precipitación media anual, Cuenca del río El Hato -----	15
Ilustración 5. Composición de bandas, Falso color y color verdadero, Cuenca del río El Hato -----	13
Ilustración 6. Clasificación supervisada de coberturas de suelo, Cuenca del río El Hato	19
Ilustración 7. Otros factores utilizados en la modelación de la erosión en la cuenca del río El Hato-----	17
Ilustración 8. Modelo espacial de erosión en la cuenca del río El Hato; Error! Marcador no definido.	

GLOSARIO

Análisis Espacial: Estudio de manera separada, de los componentes del espacio, definiendo sus elementos constitutivos y la manera como éstos se comportan bajo ciertas condiciones. (Madrid Soto & Ortiz López, 2011)

Modelo: Representación parcial de la realidad, en la que se pretende mostrar las características, explicar sus elementos, mecanismos y procesos, cómo se interrelacionan y los aspectos teóricos que le dan sustento, para facilitar su comprensión. (Aguilera, 2000).

Erosión: Fenómeno natural que hace parte del reciclaje de la superficie de la tierra denominado como ciclo de las rocas el cual consiste en el arranque y transporte de partículas de suelo y/o roca. (Edward J & Lutgens, 2005).

POMCA: Plan de Manejo y Ordenamiento de una Cuenca, es el instrumento de planificación, a través del cual se realiza la planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna y el manejo de la cuenca. (Colombia, 2020).

CAR: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, ente corporativo de carácter público, creado por la ley, integrados por las entidades territoriales que por sus características

constituyen geográficamente un mismo ecosistema o conforman una unidad geopolítica, biogeográfica o hidrogeográfica, dotados de autonomía administrativa y financiera, patrimonio propio y personería jurídica, encargados por la ley de administrar, dentro del área de su jurisdicción el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales y las políticas del MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. (MINAMBIENTE, 2020).

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, es una institución pública de apoyo técnico y científico al Sistema Nacional Ambiental, que genera conocimiento, produce información confiable, consistente y oportuna, sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales y del medio ambiente, que facilita la definición y ajustes de las políticas ambientales y la toma de decisiones por parte de los sectores público, privado y la ciudadanía en general. (IDEAM, 2014).

DSM: Modelo Digital de superficie es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. (ASDRON, 2020).

SHP: Shapefile, formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas. Las entidades geográficas de un shapefile se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas). (ESRI, 2016).

Cuenca: Partiendo del concepto real de cuenca ambiental es aquella área fisiográfica superficial que drena sus aguas, sedimentos y los materiales disueltos hacia una corriente en un punto y tiempo dado; rodeada por una frontera o divisoria de aguas que separa la superficie, una de otra, por donde fluye la escorrentía superficial y subterránea cuyos desagües corren hacia un punto común. (IDEAM, 2014).

Meteorización: La meteorización es la descomposición de rocas, suelo y minerales, así como materiales artificiales a través del contacto con la atmósfera, la biota y las aguas de la Tierra. (INFOGEOLOGÍA, 2018).

Cobertura: La cobertura de la tierra se puede definir como la "cubierta física (bio) observada de la superficie de la tierra". Refleja la ocupación de la tierra (y su transformación) por diversos factores naturales, modificados o sistemas artificiales y, en cierta medida, cómo estos sistemas afectan la tierra. Es uno de los indicadores más fácilmente detectables de intervención humana en la tierra, debido a que puede cambiar rápidamente con el tiempo. (Di Gregorio A, LJM Jansen; 2005), citado por (IDEAM, 2014).

Landsat 8: Satélite de observación de la Tierra estadounidense lanzado el 11 de febrero de 2013.

Precipitación: Término con el cual se denominan las formas de agua en estado líquido o sólido que caen directamente sobre la superficie terrestre o de otro planeta. Esto incluye la

lluvia, llovizna, llovizna helada, lluvia helada, granizo, hielo granulado, nieve, granizo menudo y bolillas de nieve. (Astronomia, 2020).

SAATY: Proceso de Análisis Jerárquico, basado en la evaluación de diferentes criterios que permiten jerarquizar un proceso y su objetivo final consiste en optimizar la toma de decisiones gerenciales (Saaty, 1980), citado por (Sevilla, 2019).

SIGOT: Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial, perteneciente al Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC

SIAC: Sistema de Información Ambiental de Colombia.

MIIG: Motor de Integración de Información Geocientífica.

RESUMEN

El presente trabajo pretende identificar espacialmente las zonas susceptibles a sufrir procesos erosivos dentro de la Cuenca del río El Hato, esto, mediante un modelo de evaluación y ponderación de diferentes factores propios de la cuenca, como la pendiente, la precipitación de la lluvia, la cobertura de la superficie del terreno, los usos del suelo y las características físicas como la geología y la geomorfología, dicha representación se realiza para el periodo comprendido entre los años 2016 y 2019, con el fin de generar una alerta grafica sobre las zonas que requieren de acciones de control y mitigación ante los procesos erosivos. El modelo se realiza utilizando el apoyo de sistemas de información geográfica SIG mediante el uso del software ArcGIS y sus extensiones Hydrology, Map Algebra, Reclass, Geostatistical Wizard, Image Analysis, Classification entre otros.

Para el análisis de los factores, se tiene en cuenta el impacto de cada uno de ellos en los procesos erosivos y se da un peso ponderado teniendo en cuenta que las pendientes pronunciadas, los niveles altos de precipitación, las características geológicas y geomorfológicas pobres y los suelos desnudos, hacen más propensa un área a sufrir procesos erosivos.

Finalmente se entregan 4 mapas tipo ráster que representan espacialmente el fenómeno de la erosión en la cuenca del río El Hato, cada mapa tendrá valores de celda en un rango que va de 1 a 5 donde 5 representa las áreas de la cuenca donde confluyen mayor número de características que favorecen el proceso erosivo, y 1 las áreas en las cuales el proceso erosivo es menor.

Palabras clave:

Análisis espacial, Análisis de erosión, Cuenca hídrica, Meteorización física.

ABSTRACT

The present aims to identify the areas that are more likely to suffer erosive processes in El Hato river basin, this, through an evaluation model and weighting of different factors characteristic of the basin, such as the slope, the rainfall, the coverage of the land surface, land uses and physical characteristics such as geology and geomorphology. This representation is made for the period between 2016-2019, in order to generate a graphic alert about the areas that require control and mitigation actions against erosive processes. The model is product of using GIS geographic information systems through the use of ArcGIS software and its extensions, Hidrology, Map Algebra, Reclass, Geostatistical Wizard, Image Analysis, Classification, among others.

For the analysis of the factors, the impact of each of them is taken into account on the erosive processes and a weight value is given considering that the steep slopes, the high levels of precipitation, the poor geological / geomorphological characteristics and the bare soils make an area more prone to erosive processes.

Finally, 4 raster maps are delivered which represent the phenomenon of spatial erosion in the El Hato river basin, each map will have cell values in a range from 1 to 5 where 5 represents the areas of the basin where the greatest number of characteristics that detonate the erosive process converge, and 1 represents the areas in which the erosive process is minor.

Keywords:

Spatial análisis, Watershed, Physical Wathering,

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de la degradación de los recursos naturales es un fenómeno tanto natural como antrópico que se ha convertido en uno de los principales retos para las nuevas generaciones, uno de ellos es el deterioro de los suelos que se genera por diferentes procesos, siendo la erosión uno de los factores más determinantes en las pérdidas de tierra, esto se asocia principalmente a impulsos ocasionados por el agua y el viento, los cuales a pesar de que son procesos naturales, se intensifican y aceleran por diferentes actividades antrópicas, tales como: cambios en el uso de la tierra, mala gestión agrícola, deforestación y sobrepastoreo, (DERCON, Y OTROS, 2012) favoreciendo a que las pérdidas y redistribuciones de tierra sean mayores, por otro lado, el análisis de la erosión del suelo, según Gobin, 2004, debe ser evaluada teniendo en cuenta algunos factores físicos propios de la zona de estudio, tales como: clima, topografía, coberturas, geología y geomorfología, ya que estos tienen efectos importantes sobre los procesos de erosión y formación del suelo. (Gobin, y otros, 2004)

La cuenca del río el Hato está ubicada al noreste del departamento de Cundinamarca, se encuentra conformada por los municipios de Carmen de Carupa, Ubaté y Sutatausa, la cuenca se encuentra bajo la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y presenta un área superficial total de 5,300 Hectáreas

Los procesos erosivos y la producción de sedimentos tienen un significado especial en la cuenca del río El Hato, donde la topografía, la variabilidad climática, las características de los suelos y la localización del embalse El Hato, en la parte baja de la cuenca, se combinan para resaltar la importancia de identificar y cuantificar los procesos erosivos existentes en la cuenca, (Morales Gonzalez & Porras Ortiz, 2014) consecuentemente, en el presente trabajo se representa espacialmente las zonas de la cuenca del río El Hato, más susceptibles a sufrir procesos erosivos,

debido a algunas características físicas propias del terreno como son: pendiente, usos del suelo, precipitación de la lluvia, cobertura del suelo, y las características geológicas y geomorfológicas.

2. ÁREA SE ESTUDIO

La cuenca del río el Hato se encuentra ubicada en el extremo NE del departamento de Cundinamarca entre los municipios de Carmen de Carupa, Ubaté y Sutatausa; presenta un área superficial total de 5,300 hectáreas, su afluente principal el río El Hato, presenta una extensión de 12.23 kilómetros desde su nacimiento en el alto de El Muchacho hasta su fin en el embalse El Hato; sus afluentes principales son la Quebrada La Chorrera, El Chuscal y Suasuque Ilustración 1.

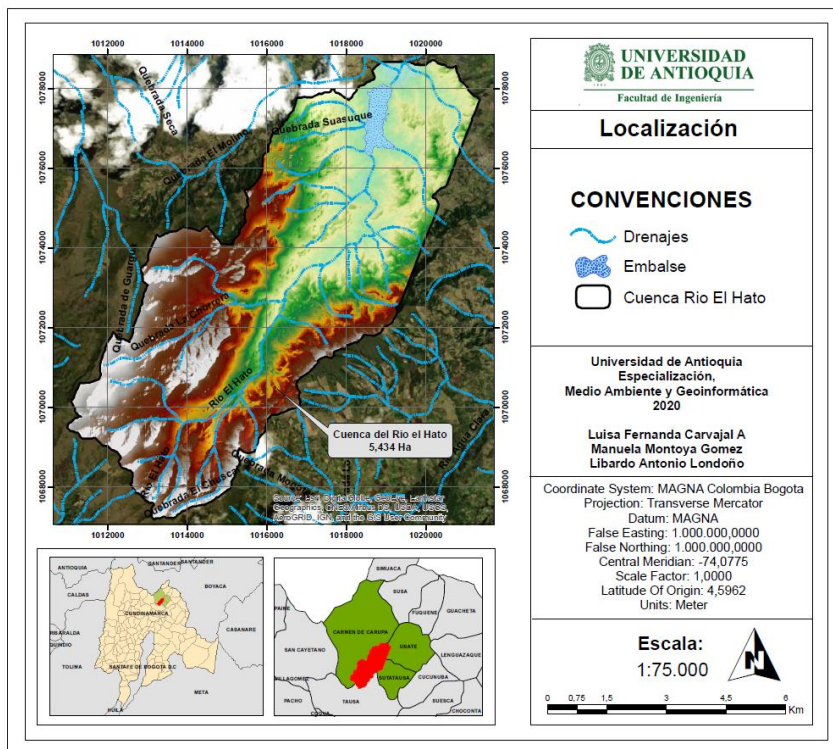


Ilustración 1. Localización Cuenca del río El Hato, Fuente propia.

La cuenca del río El Hato tiene como función vital el abastecimiento de agua del embalse El Hato, el cual tiene como fin el riego de cerca de 3000 hectáreas de pastos y cultivos de la región del valle de los ríos Ubaté y Suta, la superficie de la cuenca se encuentra ampliamente intervenida por actividades agrícolas en la que se resalta la siembra de caña panelera, cebada, maíz, papa, y café (Tibaquirá PERDOMO & Romero Rojas, 2018), por lo cual se hace de vital importancia la preservación de la capa orgánica; además, el embalse se utiliza como suministro de agua para el acueducto del municipio de Carmen de Carupa, para la cual se requiere mantener niveles bajos de sedimentación en el embalse para así asegurar su vida útil y por ende sus funciones vitales.

De lo anterior se precisa aclarar que el fenómeno de erosión superficial es un fenómeno natural que hace parte del reciclaje de la superficie de la tierra denominado como ciclo de las rocas (Edward J & Lutgens, 2005), es aquel fenómeno que modela la superficie del terreno por medio del arranque y arrastre de partículas de suelo, esto debido a efectos como la gravedad, el agua y el viento, siendo el suelo desnudo, las altas pendientes, las altas precipitaciones y las características geológicas y geomorfológicas pobres como zonas de cizalla o perfiles de meteorización bien desarrollados con extensas capas de suelo orgánico y residual. caracterizado por alta disgregación de sus partículas, ideales para que la erosión tenga mayor fuerza y/o impacto en la superficie, generando procesos residuales como lo son la pérdida de la capa orgánica del suelo, por ende, pérdida de la fertilidad, movimientos en masa y sedimentación temprana de lagos y embalses (JARAMILLO, 2011).

3. METODOLOGÍA

Entendiendo la importancia de los procesos erosivos en la superficie de la cuenca del río El Hato, el presente trabajo busca representar espacialmente las zonas dentro de la cuenca más propensas a sufrir procesos erosivos dadas sus características físicas como pendientes, precipitación de la lluvia, cobertura del suelo, geología, geomorfología y usos del suelo, con el fin de generar un alerta grafica sobre las zonas con necesidad de procesos de mitigación ante la erosión dentro de la cuenca; para esto se utilizaron sistemas de información geográfica SIG con el software ArcGIS y sus extensiones Hidrology, Map Algebra, Reclass, Geoestatistical Wizard, Image Analysis, Classification entre otros.

Para el desarrollo del modelo se definieron 7 factores, pendientes, precipitación de la lluvia, cobertura del suelo, geología, geomorfología, usos del suelo y fallas geológicas, los cuales influyen en diferente proporción sobre el fenómeno de erosión; se plantea un flujo de trabajo para identificar las zonas más propensas a sufrir procesos erosivos en la cuenca del río El Hato mediante el análisis y ponderación de los factores ya mencionados.

A continuación, se muestra el flujo de trabajo mediante el cual se enmarca la metodología del presente estudio

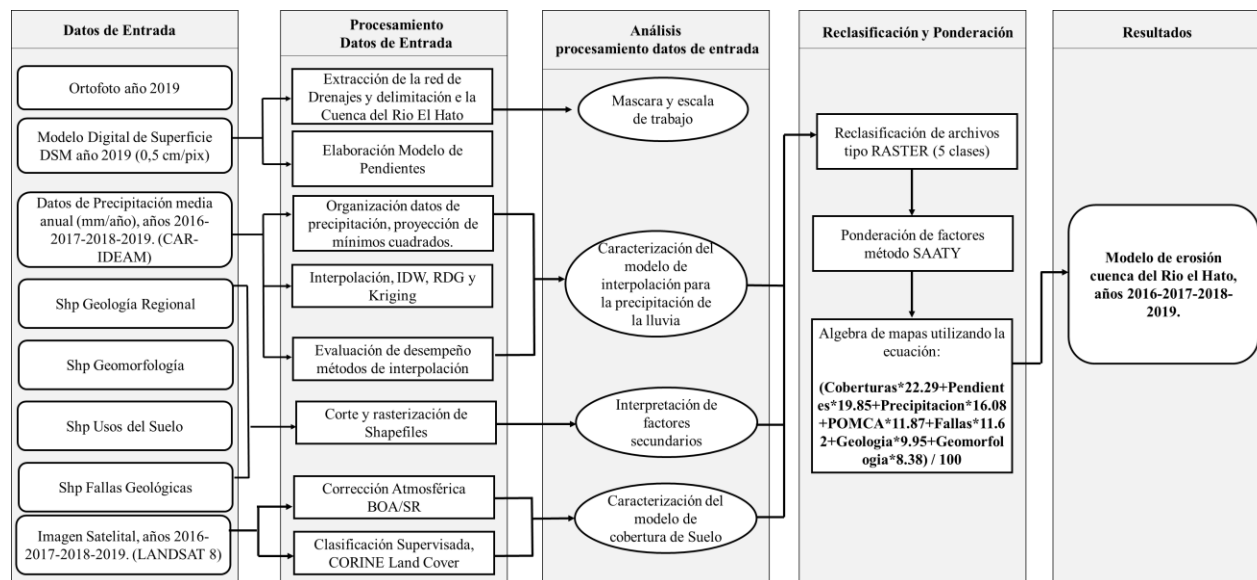


Ilustración 2. Flujo-grama de trabajo, Modelación espacial de la erosión en la cuenca del río El Hato, Fuente propia.

A continuación se describe a detalle los elementos del flujo de trabajo.

3.1. Datos de Entrada

Los datos de entrada corresponden a todos aquellos insumos brutos necesarios para llevar a cabo la modelación espacial de la erosión en la cuenca del Río El Hato, en total se recopilaron 8 productos de entrada,

El DSM y Ortofoto presentan una resolución espacial de 0,5 cm/píxel, dichos insumos fueron generados mediante el uso de drones para el levantamiento fotogramétrico de la empresa FLYNORTH S.A contratista de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca- CAR.

El parámetro de precipitación de la lluvia, se obtuvo mediante la información recolectada en 14 estaciones pluviométricas dentro y aledañas a la cuenca, ver Tabla 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, dicha información fue suministrada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR (10 estaciones) y por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (4 Estaciones); las estaciones pluviométricas están dotadas de un pluviómetro que permite medir la cantidad de lluvia caída entre dos observaciones consecutivas (IDEAM, 2019), es decir, la precipitación de la lluvia, dicha información es obtenida para 4 años, 2016, 2017, 2018 y 2019 y su unidad de medición es mm/mes,

Tabla 1. Estaciones pluviométricas presentes en la Cuenca del río El Hato, Fuente propia.

Nombre	Código	Latitud	Longitud	Entidad
Lagunitas	21201190	5,214528	-73,90725	IDEAM
Carmen de Carupa	24015380	5,347222	73,898333	IDEAM
Alizos	2411150	5,329389	73,850056	IDEAM
El Hato	2401534	5,303694	73,905139	CAR
Boyera	2401511	5,303833	-73,85175	CAR
Hato No 7	2401058	5,251833	73,921444	CAR
Hato No 6	2401057	5,224	73,950667	CAR
Hato No 2	2404053	5,263806	73,925472	CAR
Hato No 1	2401052	5,288	73,924167	CAR
Pedregal	2401049	5,219472	73,877417	CAR
El Pino	2401027	5,262306	73,846306	CAR
Los Pinos	2312019	5,240972	-74,0275	CAR
Guanquica	2120193	5,190722	73,926028	CAR

Los factores de geología, geomorfología, usos del suelo y fallas geológicas, se obtienen en formato shapefile, mediante la búsqueda de bases cartográficas abiertas como el SIGOT, SIAC y el MIIG.

Las imágenes satelitales provienen de la información abierta del satélite Landsat 8, se obtuvieron 4 imágenes para los años 2016, 2017, 2018 y 2019 las cuales son descargadas de la plataforma Earth Explorer, cuya localización se encuentra en la ventana Path/Row 08/56, la descarga se realizó asegurando una cobertura total del área de trabajo y un porcentaje de nubosidad inferior al 10 %, dichas imágenes cuentan con un total de 11 bandas espectrales las cuales permiten realizar diferentes tipos de composiciones, entre ellas.

Tabla 2. Imágenes Landsat 8, cuenca del río del Hato, Fuente propia.

Año	Nombre
2016	LC08_L1TP_008056_20161122_20170318_01_T1
2017	LC08_L1TP_008056_20180317_20180403_01_T1
2018	LC08_L1TP_008056_20181230_20190130_01_T1
2019	LC08_L1TP_008056_20190216_20190222_01_T1

3.2. Procesamiento de datos de entrada

La información recopilada al inicio del trabajo requiere una serie de procesamientos iniciales con el fin de obtener los insumos necesarios para la modelación del fenómeno de erosión en la cuenca del Río el Hato.

A partir del DSM se obtienen parámetros tales como, red de drenajes y delimitación de la cuenca del río el Hato, esto con el fin de definir el espacio y/o máscara de trabajo para el desarrollo de la metodología del presente estudio. La definición de la cuenca se realiza mediante el uso de la herramienta *Hidrology*.

Adicional al espacio de trabajo, el DSM permite crear el modelo de pendientes para la cuenca, dicho modelo se obtiene mediante la herramienta *slope* y permite visualizar las zonas de la cuenca con mayor y menor pendiente.

Los datos de precipitación de la lluvia se organizan para cada estación en milímetros de lluvia promedio en un año, estos datos son transformados a formato shapefile con la intención de realizar un proceso de interpolación espacial de los puntos conocidos y así calcular el valor estimado de precipitación a lo largo de la cuenca.

La interpolación espacial permite encontrar valores de precipitación en donde no se tiene información de los mismos, esto a partir de combinaciones lineales de los valores de los datos en los sitios donde se tiene información, en la literatura se conocen diferentes tipos de interpolación espacial, entre los que se resaltan los métodos Geoestadísticos como el Krigin o los métodos determinísticos como el inverso de la distancia IDW y las funciones en base radial RBF (Londoño Ciro & Valdés Quintero, 2016), cada uno de estos métodos varía en exactitud según la tendencia y distribución de los datos de interpolación, con el fin de encontrar el modelo de interpolación anual que mejor represente el fenómeno de precipitación de la lluvia en la cuenca del río El Hato se evalúa el desempeño de cada uno de estos métodos con sus respectivas variaciones, en total se analizan 14 métodos para cada año y se extrae el RMS (Root mean square) de cada uno de ellos, el valor más bajo de RMS indica el modelo que muestre mayor exactitud a la hora de representar el factor de precipitación por cada año en la cuenca, un valor bajo de RMS indica valores muy cercanos a la línea de tendencia de los valores ya conocidos por ende una mejor interpretación de los datos ingresados, en la Tabla 3 se muestra un ejemplo para el año 2016 de los métodos evaluados y sus respectivos valores de RMS donde se observa que el método de mayor exactitud para este año es el método Geoestadístico Krigin-Hole Effec.

Tabla 3. Ejemplo evaluación de exactitud de los métodos de interpolación, Fuente propia.

Año	Métodos	Tipos	RMS
2016	Inverse Distance Weighting	IDW	15,1057186
	Radial Basis Functions	completely Regularized Spline	14,6473097
		spline with tension	14,6393761

	Multiquadric	15,1839975
	Inverse	14,9698728
	Multiquadric	14,9698728
	Spherical	14,1684941
	Gaussian	14,2138293
	Exponential	14,5859429
	Tetraspherical	14,1277838
	Pentaspherical	14,6400398
Geoestadísticos	Rational	15,3860068
	Quadratic	15,3860068
	Hole Effec	13,9196716
	J-Bessel	15,3709543
	K-Bessel	14,7559939

Una vez realizada la evaluación de los 14 métodos de interpolación espacial para los 4 años de estudio se tiene que, para los años 2016 y 2018 los métodos Geoestadísticos Krigin-Hole Effect muestran un RMS más bajo y por ende una mayor exactitud del modelo de interpolación respecto a los otros modelos, mientras que para el año 2017 y 2019 son los métodos determinísticos, IDW y RBF-Multicuadrático respectivamente los métodos de mayor exactitud, la presencia de dos métodos de interpolación diferentes, determinísticos y geoestadísticos pueden indicar que el factor de precipitación de la lluvia no es un fenómeno lineal puesto que la calidad y cantidad de los datos pueden variar en el tiempo además de la existencia o no de correlación espacial entre los datos de muestreo (Londoño Ciro & Valdés Quintero, 2016), es decir que tan parecido es el valor de un punto respecto a otro punto cercano.

El procesamiento de los factores de geología, geomorfología, usos del suelo y fallas geológicas, consiste en el corte y rasterización de la información para el análisis independiente de cada uno de ellos, para esto se utilizan las herramientas de *Clip* y *Polygon to Raster.*, del *ArcMap*.

El parámetro de cobertura de suelo, es uno de los factores de mayor importancia en la modelación de la erosión de una cuenca, debido a que a mayor grado de exposición y/o desnudes y a la falta del protección, un suelo es más propenso a sufrir procesos erosivos, (Tauta Muñoz, Camacho Tamayo, & Rodríguez Borray, 2018), esto combinado con los demás factores que influyen en el proceso de erosión, como pendientes y cantidad de agua en el suelo.

A las 4 imágenes satelitales, se les realiza una correccion atmosferica para las bandas de trabajo, Bandas 432 para la composición de color verdadero y las bandas 764 para la composicion de falso color. Dicha correccion es necesaria puesto que los efectos atmosfericos en la imágenes satelitales distorcionan la informacion en superficie y originan errores en la estimacion y clasificacion de las coberturas de suelo (Palacios Sanchez, y otros, 2018)

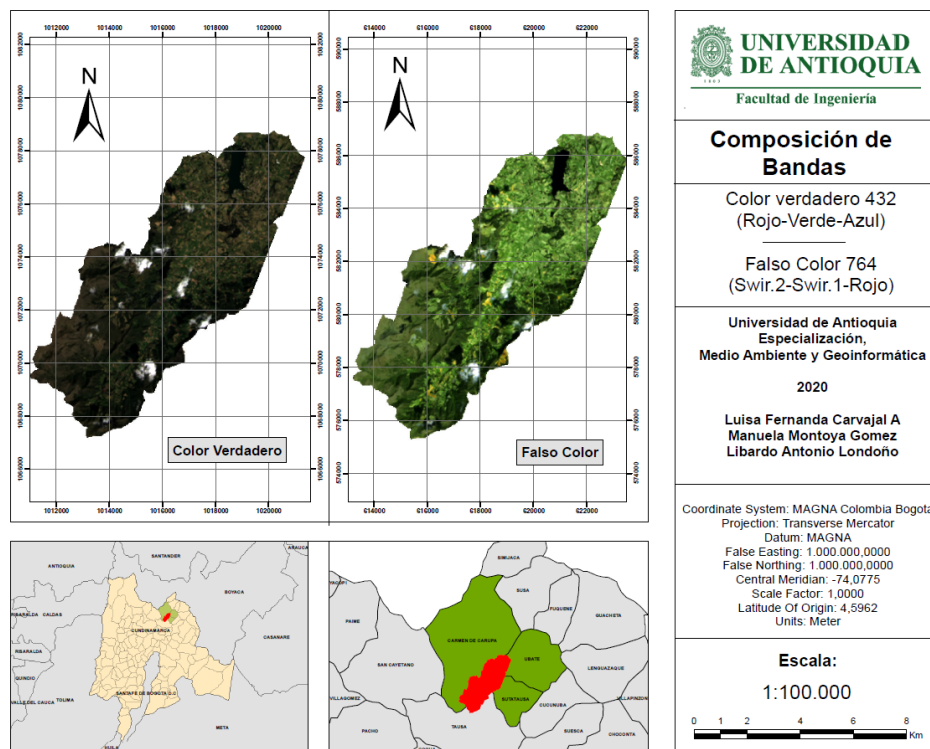


Ilustración 3. Composición de bandas, Falso color y color verdadero, Cuenca del río El Hato, Fuente propia.

Una vez realizada la corrección atmosférica y utilizando las composiciones de falso color y color verdadero junto con la ortofoto de la zona de trabajo, se realiza la clasificación supervisada de las coberturas de suelo, bajo la metodología CORINE Land Cover (MINAMBIENTE- IDEAM, 2010)

3.3. Interpretación resultados parciales

Según el modelo de pendientes obtenido para la zona de estudio, es posible evidenciar que el inicio del cauce del río El Hato se encuentra enmarcado por pendientes fuertes mayores a 25° , las

cuales marcar las áreas de mayor pendiente dentro de la cuenca, mientras que la desembocadura se caracteriza por presencia de zonas llanas con pendientes menores a los 15° Ilustración 4.

Las pendientes altas pueden favorecer el proceso erosivo dentro de la cuenca, dado que, debido a la fuerza de gravedad, elementos como el agua requieren de menor energía para remover las partículas de suelo a diferencia de las zonas planas donde se requiere mayor energía (ARENAS, 2018), es preciso mencionar que la pendiente es un factor que debe ser evaluado en conjunto con otros, tales como, la cantidad de agua en el suelo, la cual se puede relacionar con la precipitación de la lluvia y el grado de erosión presente en la roca o superficie a evaluar es decir la geología.

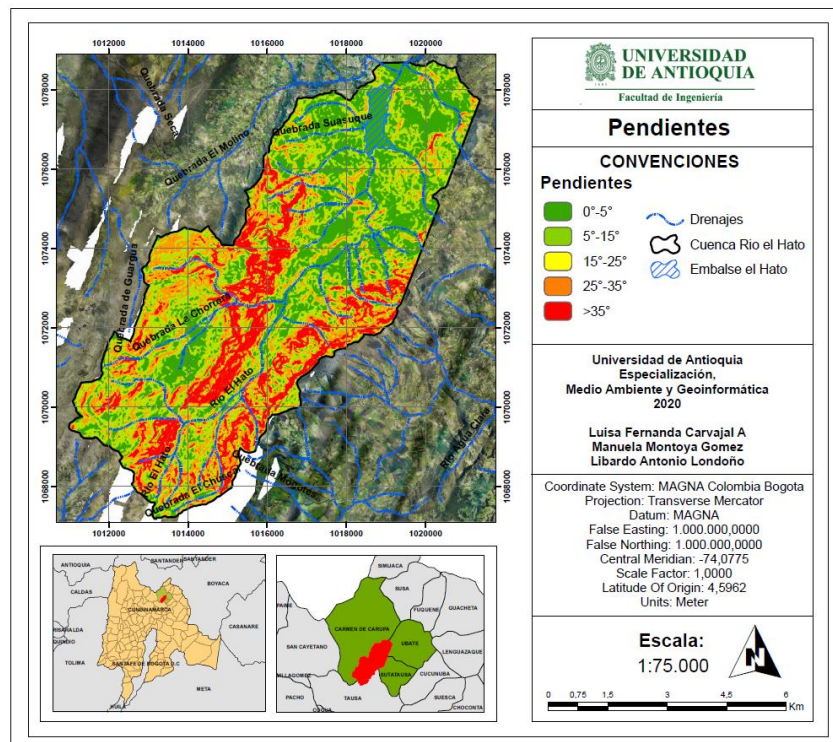


Ilustración 4. Modelo de Pendientes, Cuenca del río El Hato, Fuente propia.

Una vez se realiza la interpolación de los datos de precipitación de la lluvia y se hallan los modelos de mayor exactitud, es posible evidenciar que la parte sur de la cuenca presenta los valores más altos de precipitación de la lluvia, con rangos que van entre 76,18 y 110,65 mm de lluvia por año, esta zona coincide con el nacimiento del río El Hato en el Alto de El Muchacho además concuerda con la zona de mayor elevación de la cuenca cerca a los 3400 msnm; los niveles de precipitación disminuyen en sentido sur-norte hacia las zonas más planas de la cuenca, es de resaltar que según la definición de erosión, la combinación de valores altos de precipitación con pendientes pronunciadas y características geológicas pobres hacen que un área sea más propensa a sufrir procesos erosivos. Ilustración 5

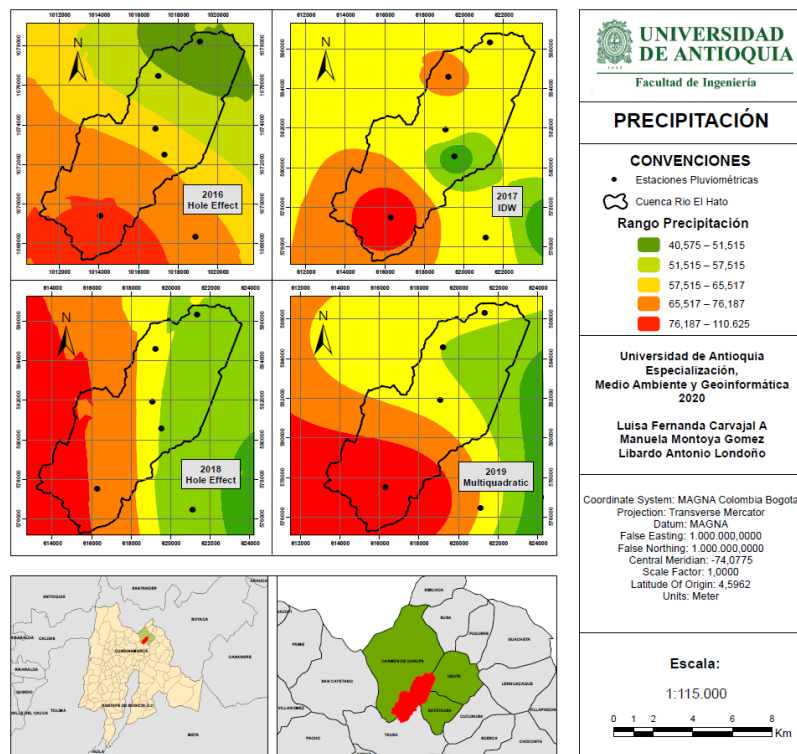


Ilustración 5. Modelo de interpolación, precipitación media anual, Cuenca del río El Hato, Fuente propia.

Los procesos geomorfológicos de la cuenca del río El Hato, se ven representados por geoformas de montaña las cuales presentan dos variaciones importantes, montaña estructural erosional y montaña glacio-volcánica Ilustración 6, la primera de estas geoformas representa el 85% del área superficial de la cuenca y se encuentra modelada bajo la acción de la Falla geológica de Carupa la cual es una falla de cabalgamiento inversa que afecta las rocas adyacentes a su área de influencia, generando pliegues y zonas de debilidad que se intensifican con la cercanía a esta, dichas zonas, favorecen los procesos de meteorización de la roca y/o suelo existente, generando menor resistencia a los procesos erosivos, la Falla de Carupa tiene una tendencia noreste y atraviesa la totalidad de la cuenca (Pachón Cabra & Castaño Rojas, 2018), por otro lado, las geoformas glacio-volcánicas se encuentran en la parte sur de la cuenca, coincidiendo con las zonas de mayor pendiente, las geoformas glacio-volcánicas por su antigüedad y compactación muestran una mayor resistencia a procesos de meteorización y por ende a procesos de erosión del suelo. (Servicio Geológico Colombiano, 2002).

Por otro lado la geología de la cuenca del río El Hato está representada en su totalidad por rocas sedimentarias las cuales presentan diferentes grados de compactación y fases de gradación Ilustración 6, en mayor medida se encuentran secuencias sedimentarias arenosas de shales, calizas, fosforitas, cherts y cuarzoarenitas, las cuales por sus características propias de compactación y gradación son más resistentes respecto a las demás secuencias sedimentarias en la cuenca a los procesos de meteorización y consecuentemente a los procesos erosivos, en segundo lugar se encuentran las rocas sedimentarias de la Formación Guaduas, representada por arcillolitas rojas y cuarzoarenitas de grano fino (Servicio Geológico COLOMBIANO, 2002), rocas que por su tamaño de grano y grado de compactación presentan una menor resistencia a la meteorización, por último, se observa la presencia de depósitos cuaternarios aluviales y de llanuras aluviales, estos depósitos consisten en bloques redondeados y sub-redondeados, especialmente areniscas y calizas en una matriz no consolidada principalmente de arcillas (Servicio Geológico COLOMBIANO, 2002), la escasas de material cementante y/o consolidante favorecen los procesos de meteorización y transporte de partículas.

En las rocas sedimentarias, la baja proporción de material cementante y el bajo grado de consolidación facilitan la meteorización, lo cual, sumado a factores como pendientes altas, suelos desnudos, y abundante cantidad de agua en el suelo, favorecen el proceso de erosión.

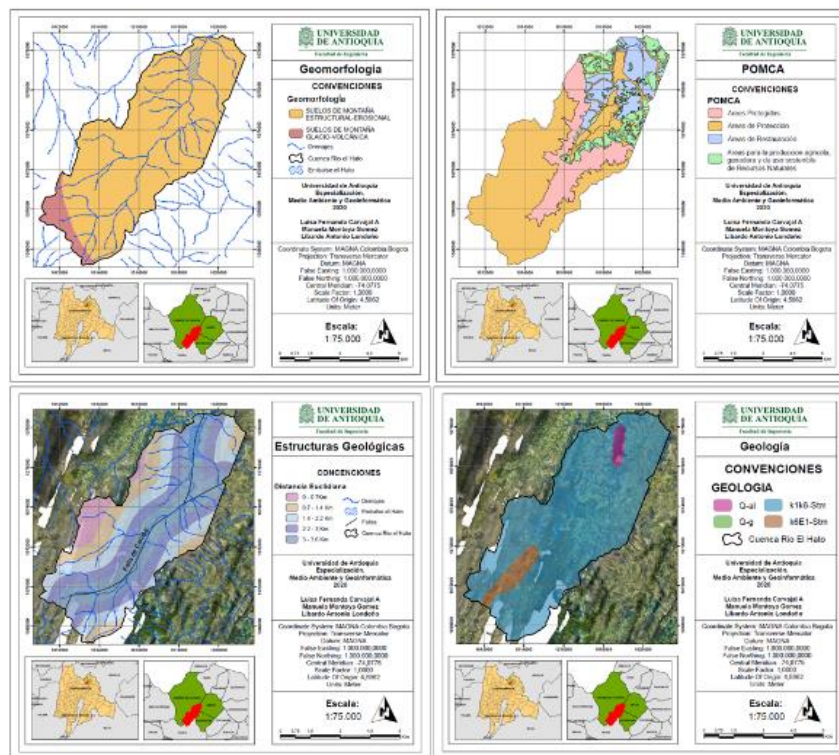


Ilustración 6. Otros factores utilizados en la modelación de la erosión en la cuenca del río El Hato, Fuente propia.

La Cuenca del río El Hato es un subcuenca perteneciente a la cuenca del río Suarez, la cual por medio del POMCA establece 4 usos principales del suelo dentro de los límites de la cuenca de estudio (CAR-CORPOBOYACA, 2017), áreas para la producción agrícola, ganadera y de usos

sostenible de recursos naturales, áreas de recuperación, protección y protegidas, Ilustración 6. Las áreas para la producción agrícola, ganadera y de uso sostenible de recursos naturales hacen parte de las zonas de uso múltiple, las cuales permiten su uso para el aprovechamiento de todo tipo de recursos naturales y/o desarrollo de proyectos, obras o actividades que pueden generar un impacto ambiental, dichas características pueden estar representadas con extensas zonas de suelo desnudo, creando áreas propensas para la remoción de suelo; las áreas protegidas, de protección y restauración, hacen parte de la categoría de conservación y protección ambiental, representada por zonas de abundante vegetación, es decir, zonas de mayor protección ante procesos erosivos.

La clasificación supervisada de las imágenes satelitales nos arrojan total de 6 coberturas, agua, bosques, cultivos transitorios, nubes, pastos y suelo desnudo Ilustración 7, la clasificación muestra que la cobertura de pastos es la más representativa dentro de la cuenca, seguida por suelos desnudos, bosque y cultivos respectivamente, como ya se mencionó en párrafos anteriores el suelo desnudo es el tipo de cobertura que puede favorecer en mayor medida el proceso erosivo, en la cuenca estos suelos se encuentran ubicados en el extremo suroeste y coinciden con las zonas de pendientes altas y precipitaciones mayores.

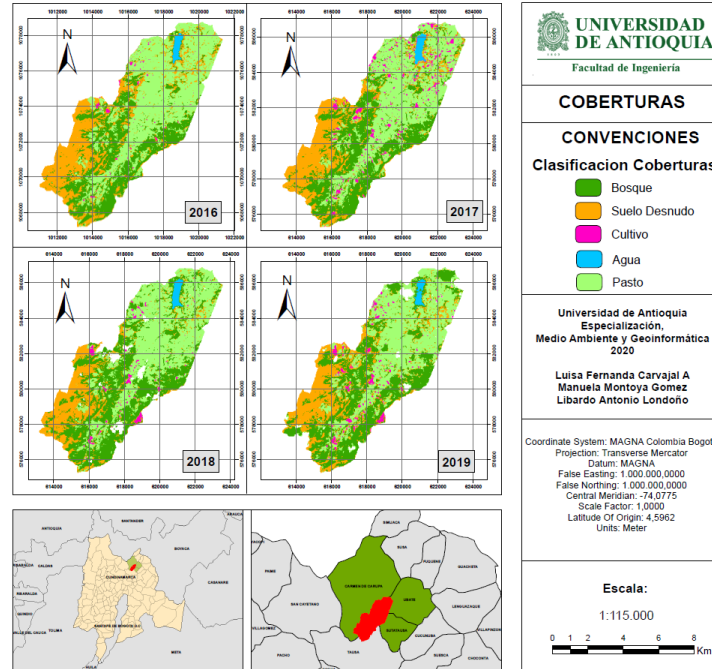


Ilustración 7. Clasificación supervisada de coberturas de suelo, Cuenca del río El Hato, Fuente propia.

3.4. Reclasificación y ponderación

Entendiendo de manera independiente cada uno de los factores utilizados en la modelación espacial del fenómeno de erosión en la cuenca del río El Hato, y una vez estos se encuentren en formato ráster, se procede a realizar la reclasificación en 5 clases, en donde el valor de 5 es asignado a la característica que más favorece el fenómeno de erosión en la cuenca, descendiendo hasta el valor 1, el cual es asignado a la característica que menos incidencia tiene ante los procesos erosivos, en la Tabla 2 se observa los valores asignados a cada uno de los factores del modelo.

Tabla 4. Reclasificación de factores, Fuente propia.

Factor	Clasificación	Reclasificación
Precipitación	> 83 mm/mes	5
	75mm /mes < β \leq 83 mm/mes	4
	71mm /mes < β \leq 75 mm/mes	3
	63mm /mes < β \leq 71 mm/mes	2
	\leq 63 mm/mes	1
Coberturas	Suelo Desnudo	5
	Cultivos	4
	Pastos	3
	Bosques	2
	Agua	1
Pendientes	$0^\circ \leq \beta \leq 5^\circ$	5
	$5^\circ < \beta \leq 15^\circ$	4
	$15^\circ < \beta \leq 25^\circ$	3
	$25^\circ < \beta \leq 35^\circ$	2
	$> 35^\circ$	1
Geología	Depósitos Aluviales	5
	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino	3
	Shales, Calizas, fosforitas, Cherts Cuarzoarenitas	2
Geomorfología	Montaña estructural Erosional	4
	Montaña Glacio-Volcánica	2
Fallas Geológicas	$0 \leq \beta \leq 0,7$ Km	5
	$0,7 < \beta \leq 1,4$ Km	4
	$1,4 < \beta \leq 2,2$ Km	3
	$2,2 < \beta \leq 3$ Km	2

	> 3 Km	1
Usos del Suelo	Áreas para la producción agrícola, ganadera y de usos sostenible de recursos naturales	5
	Restauración	4
	Protección	3
	Protegidas	2

Una vez todos los factores del modelo se encuentran en formato ráster y reclasificados en una escala de 1 a 5, se procede a evaluar el peso ponderado de cada uno de estos, para ello, se utiliza la metodología SAATY para lo cual se realiza un sondeo entre 15 profesionales SIG con énfasis en diferentes áreas del conocimiento como: medio ambiente, geología, minería e ingeniería civil, dichos profesionales según su experticia proponen un peso ponderado a cada factor, de acuerdo a la importancia que ellos dan a cada uno en la modelación de la erosión en una cuenca como la cuenca del río El Hato, en la Tabla 5 se muestra el porcentaje final asignado a cada uno de los factores, siendo la cobertura de suelo el factor con mayor peso a la hora de modelar la erosión, y la geomorfología y geología los factores con menor porcentaje.

Tabla 5. Valores ponderados, metodo SAATY, Fuente propia.

MÉTODO DE SAATY	
FACTORES	PORCENTAJE
COBERTURAS	22%
PENDIENTES	20%
GEOLOGÍA	10%
GEOMORFOLOGÍA	8%
USOS DEL SUELO	12%

FALLAS	12%
PRECIPITACIÓN	16%

Luego de obtener los pesos ponderantes para cada uno de los factores del modelo de erosión, se formula la ecuación de pesos ponderantes para la modelación espacial de la erosión en la cuenca del río El Hato (E) ver Ecuación 1, esta ecuación es usada en la calculadora ráster para cada uno de los factores por cada año de evaluación, obteniendo así, un mapa tipo ráster, el cual tendrá valores de celda en un rango que va de 1 a 5 donde, 5 representa las áreas de la cuenca donde confluyen mayor número de características que favorecen el proceso erosivo, y 1 las áreas en las cuales el proceso erosivo es menor.

Ecuación 1. Ecuación de pesos ponderantes para la modelación espacial de la erosión en la cuenca del Rio El Hato, Fuente propia.

$$E = ((\text{Coberturas} * 22.29) + (\text{Pendientes} * 19.85) + (\text{Precipitación} * 16.08) + (\text{Usos del suelo} * 11.87) + (\text{Fallas} * 11.62) + (\text{Geología} * 9.95) + (\text{Geomorfología} * 8.38)) / 100$$

3.5. Resultados

Al ejecutar la ecuación de pesos ponderantes para la modelación espacial de la erosión en la cuenca del río El Hato (E) se obtienen 4 insumos gráficos tipo ráster los cuales presentan valores de celda en un rango que va de 1 a 5, donde 5 representa las áreas de la cuenca más susceptibles a la ocurrencia de procesos erosivos y 1 las áreas en las cuales el proceso es menor, al mismo tiempo

se realiza una reclasificación de los valores de celda donde el rango varia cualitativamente de muy alto para los valores de celda igual a 5 a muy bajo para los valores de celda igual a 1, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

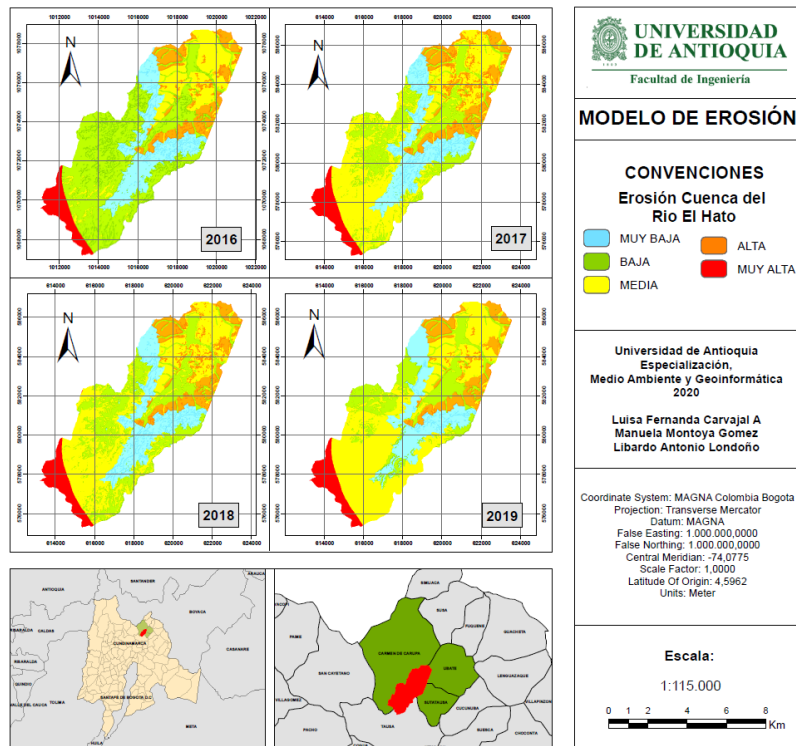


Ilustración 8. Modelo espacial de erosión en la cuenca del río El Hato, Fuente propia.

La zona sur de la cuenca es clasificada con un rango de susceptibilidad muy alto ante la ocurrencia de procesos erosivos, esta se encuentra enmarcada por la confluencia de factores determinantes como lo son: las zonas de mayor pendiente en la cuenca, mayor cantidad de precipitación media anual de la lluvia y cobertura de suelos desnudos, dichos factores representan los pesos ponderantes más altos en la modelación espacial de la erosión y se ven reflejados de manera directa en la distribución espacial del fenómeno.

Es posible evidenciar, que el modelo de erosión de la cuenca presenta una tendencia homogénea a lo largo de los 4 años de estudio, donde las zonas con muy baja probabilidad de sufrir procesos erosivos tienen rangos de variación muy bajos, dichas zonas están representadas por áreas con cobertura de bosque bien definido, mientras que las áreas con probabilidad baja y media, presentan rangos de variación altos, lo cual se ve reflejado en zonas con cobertura de pasto el cual es factible de sufrir cambios de densidad en espacios cortos de tiempo.

4. ANALIS DE RESULTADOS

En el año 2014, se realizó un estudio en la cuenca del río El Hato, propiamente sobre el embalse denominado El Hato, el cual se centró en estimar el aporte de sedimentos de la cuenca hidrográfica sobre el embalse, utilizando la ecuación universal de pérdida del suelo USLE, esta ha sido utilizada en diferentes estudios alrededor del mundo e integra factores que considera son en forma general, los que producen la erosión de cualquier lugar, tales como: Erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud de la pendiente (L), gradiente de la pendiente (S), uso y manejo del suelo (C) y práctica de conservación (P). En el estudio en mención se encontró que los valores más altos de erosión se concentran en la zona sur de la cuenca, lo cual concuerda con los resultados encontrados en el presente trabajo, donde se muestra que dicha zona está clasificada con un rango de susceptibilidad muy alto ante la ocurrencia de procesos erosivos, es preciso mencionar que en el estudio realizado con la metodología USLE se encontró una mayor proporción de zona con valores altos de erosión las cuales se reflejan en el presente estudio como áreas altamente y medianamente susceptibles a sufrir procesos erosivos, esto puede estar relacionado a que el método cuantitativo USLE con ayuda de las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite una mejor interpretación de los datos obtenidos, además, para determinar el factor K de la ecuación se realizó muestreo del suelo que fueron analizados en laboratorio y para el factor R contaban con registros de precipitación de 10 años, lo cual brinda una mejor precisión en los resultados.

A partir de la aplicación de la metodología SAATY, se declara la cobertura de suelo como el factor de mayor peso a la hora de modelar el fenómeno de erosión en la cuenca del río El Hato; son 5 las clases obtenidas mediante la clasificación supervisada de imágenes satelitales, Suelo desnudo, cultivos, pastos, bosques y agua, para los cuales se indica que el suelo desnudo es la característica que más favorece el proceso de erosión en la cuenca otorgándole un valor de 5 en la

reclasificación de valores, en la cuenca esta cobertura está ubicada espacialmente en el extremo suroeste, coincidiendo con las zonas de pendientes altas y precipitaciones mayores.

La pendiente es el segundo factor con mayor peso en la ecuación de modelación espacial, donde, las pendientes más altas ($> 25^\circ$) representan las zonas más susceptibles a procesos erosivos, puesto que dada la acción de la fuerza de gravedad las partículas que se encuentran expuestas a pendientes más altas requieren menor energía para ser removidas; estas zonas de pendientes pronunciadas coinciden con el tramo inicial del cauce del río El Hato y con las áreas representadas por cobertura de suelo desnudo y precipitaciones altas.

La precipitación de la lluvia, con un peso del 16 % en la modelación de la erosión muestra que los valores anuales más altos están en el rango de 76,18 y 110,65 mm de lluvia, los cuales se encuentran en el nacimiento del río El Hato a alturas cercanas a los 3400 msnm, los niveles de precipitación disminuyen en sentido sur-norte hacia las zonas más bajas de la cuenca. Las zonas de mayor precipitación coinciden con áreas de pendientes altas, y parte de la cobertura de suelo desnudo. Las áreas con rangos más altos de precipitación de la lluvia, favorecen los procesos erosivos en la cuenca, esto, debido a la intensidad de la acción de las gotas de lluvia sobre la superficie de suelo desnudo.

Los usos del suelo para la cuenca del río El Hato, se clasifican en dos tipos, zonas de conservación y zonas de uso múltiple, a estas últimas se otorga un valor de 5 en la reclasificación de valores puesto que estas permiten su uso y aprovechamiento para todo tipo de recursos naturales y/o desarrollo de proyectos, obras o actividades que pueden generar un impacto ambiental, dichas zonas se caracterizan por extensas zonas de suelo desnudo las cuales como se mencionó anteriormente favorecen los procesos erosivos en la cuenca, dichas áreas están localizadas en el

extremo norte de la cuenca en zonas aledañas al embalse el Hato, el cual tiene un carácter turístico e industrial.

Las fallas geológicas como factor en la modelación de la erosión en la cuenca del río El Hato, se encuentran en el 5 lugar de importancia con un peso del 12% respecto a los demás factores, la cuenca es atravesada en sentido noreste por la Falla de Carupa, una falla de cabalgamiento inversa que afecta directamente las rocas adyacentes a su área de influencia, generando plegamiento y zonas de debilidad estructural que según la cercanía a la falla favorecen los procesos de meteorización de la roca y/o suelo, generando menor resistencia a la erosión, zonas hasta 0,7 km de distancia de la falla se consideran como áreas de alta debilidad estructural.

La geología, con un peso del 10% en la modelación de la erosión de la cuenca del río El Hato está representada en su totalidad por rocas sedimentarias donde los depósitos aluviales y de llanura de inundación son clasificadas como las rocas más propensas a sufrir procesos de meteorización por su baja proporción de material cementante y bajo grado de consolidación, estas rocas se encuentran en las zonas aledañas al embalse el Hato.

La geomorfología, obtuvo el menor peso al aplicarse la metodología SAATY, con un porcentaje del 8 %, esta se encuentra representada por dos geoformas importantes, montaña glacio-volcánica y montaña estructural erosional, esta última se encuentra modelada bajo la acción de la falla de Carupa, la cual genera zonas de debilidad estructural en toda su área de influencia, esta geoforma se encuentra distribuida a lo largo del 85% de la superficie de la cuenca y se ve intensificada en cercanías a la falla de Carupa.

Las características geológicas y geomorfológicas no marcan una tendencia espacial de la erosión en la cuenca, dicha condición puede estar relacionada con el carácter regional de los datos utilizados, los cuales no son acordes con la escala de trabajo de la cuenca, es factible realizar muestreos de geología y geomorfología local para complementar la información y detalle de dichos factores.

El modelo presenta de manera cualitativa las zonas de la cuenca susceptibles a la ocurrencia de procesos erosivos, este resultado debe ser validado con modelos cuantitativos de erosión, puesto que el análisis cualitativo puede caer en errores de subjetividad en cuanto a la ponderación de los datos y por ende en su representación gráfica.

5. CONCLUSIONES

La Cuenca del Rio el Hato presenta características físicas que la hacen propensa a sufrir procesos de erosión, espacialmente se concluye que las zonas con menor cobertura vegetal es decir áreas caracterizadas por la presencia de suelos desnudos, combinados con pendientes moderadas a altas, son las zonas más susceptibles a sufrir procesos de erosión.

Los resultados obtenidos, permiten ser utilizados como insumo para desarrollar estrategias de mitigación y control ante los procesos erosivos dentro de la cuenca, así mismo como herramientas de planificación del territorio, para generar recomendaciones en los usos del suelo.

El estudio cualitativo de los factores que representan el proceso de erosión, tiene un carácter subjetivo, por lo tanto, se pueden presentar errores en los resultados, ya que el análisis de cada factor depende en gran medida de la experiencia de los investigadores y de la cantidad y calidad de la información disponible.

El análisis de la erosión del suelo, a partir de datos históricos de 4 años puede no asemejarse a la realidad, puesto que para que los mapas de suelo sean más exactos, se requiere contar con un alto porcentaje de datos reales.

6. TRABAJOS FUTUROS

A partir del presente trabajo, se propone analizar a futuro la erosión en la cuenca del río El Hato, mediante un método cuantitativo, con el fin de determinar las pérdidas de suelo por unidad de tiempo, para esto se plantea emplear la ecuación numérica USLE, además, se sugiere que el análisis se realice con un mínimo de información de 10 años, puesto que los 4 años de trabajo no mostraron variaciones significativas en la distribución de la erosión de la cuenca, además de realizar muestreos de geología y geomorfología local para complementar la información y detalle de dichos factores de modo que marquen una tendencia espacial en la cuenca.

La metodología USLE y sus variaciones RUSLE y MUSLE, ha sido aplicada y revisada en diferentes partes de Colombia y el mundo en diferentes estudios, a partir de los cuales se ha determinado como la más usada para estimar las pérdidas del suelo por erosión hídrica, gracias a las ventajas que ofrece, como sus pocos parámetros de entrada que son de fácil obtención, además que permite su integración con los sistemas de información geográfica (SIG) y las herramientas geoespaciales como la teledetección, para el procesamiento y cálculo de la información y la visualización de sus resultados, (Jaramillo, 2011) por otro lado, permite analizar y cuantificar los factores naturales y antrópicos que determinan la vulnerabilidad de los suelos ante los procesos erosivos, como son: lluvia, topografía, geología, usos del suelo y prácticas de conservación. (Gaitán, y otros, 2017).

7. REFERENCIAS

- A. Gobin, R. J. (2004). Indicators for pan-European assessment and monitoring of soil erosion by water. *ELSEVIER*, 25-38.
- Aguilera, C. I. (2000). Un enfoque gerencial de la teoría de las restricciones. *Estudios Gerenciales* , 53-69.
- Arenas, C. A. (2018). *Compilación bibliográfica de modelos para estimar tasas de erosión pluvial y su aplicación en cuencas colombianas*. Medellín: Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería.
- ASDRON. (2020). *Asdron Spain*. Obtenido de <https://www.asdronspain.com/topografia/modelo-digital-de-superficies/>
- Astronomia. (2020). *Astronomia*. Obtenido de <https://www.astromia.com/>
- CAR-CORPOBOYACA. (2017). *Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca Hidrográfica POMCA Rio Suárez*. Bogotá.
- Colombia, S. d. (2020). *Sistema de Información Ambiental de Colombia*. Obtenido de SIAC: <http://www.siac.gov.co/pomcas>
- Dercon, G., Mabit, L., Hancock, G., Nguyen, M., Dornhofer, P., Benmansour, M., . . . Wallbrink, P. (2012). Fallout radionuclide-based techniques for assessing the impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality: an overview of the main lessons learnt under an FAO/IAEA Coordinated Research Project. *ELSEVIER*, 78-85.
- Edward J, T., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra, una introducción a la geología física*. Madrid: Person Educacion S.A.
- ESRI. (2016). *ESRI*. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/>
- G. Dercon, L. M. (2012). Fallout radionuclide-based techniques for assessing the impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality: an overview of the main lessons learnt under an FAO/IAEA Coordinated Research Project. *ELSEVIER*, 78-85.

- Gaitán, J., Navarro, M. F., Tenti Vuegen, L., Pizarro, M. J., Carfagno, P., & Rigo, S. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. Argentina: INTA EDICIONES.
- Gaitán, J., Navarro, M. F., Vuegen, L. T., Pizarro, M. J., Carfagno, P., & Rigo, S. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. Argentina: Ediciones INTA.
- Gobin, A., b, R. J., Kirkby, M., Campling, P., Govers, G., Kosmas, C., & Gentile, A. (2004). Indicators for pan-European assessment and monitoring of soil erosion by water. *ELSEVIER*, 24-38.
- IDEAM. (2014). *IDEAM*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co>
- IDEAM. (2019). *Glosario Meteorológico*. Bogotá: Subdirección de Meteorología.
- INFOGEOLOGÍA. (2018). *INFOGEOLOGÍA*. Obtenido de <https://infogeologia.wordpress.com>
- Jaramillo, L. G. (2011). *Estimación de la erosión hídrica del suelo mediante la ecuación USLE y los sistemas de información geográfica*. Medellín: Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
- Londoño Ciro, L., & Valdés Quintero, J. (2016). *Análisis y modelamiento espacial*. Medellín: BONAVENTURIANA.
- Madrid Soto, A., & Ortiz López, L. M. (2011). *Analisis Espacial*. Bogotá: SINAB.
- MINAMBIENTE. (2020). *MINAMBIENTE*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2067>
- MINAMBIENTE- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, metodología CORINE Land Cover, adaptada para colombia*. Colombia: IDEAM.
- Morales Gonzalez, L. M., & Porras Ortiz, J. A. (2014). *UNIVERSIDAD SANTO TOMAS*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11634/9502>
- Morales, L. M., & Porras Ortiz, J. (2014). *Determinación del aporte de sedimentos al embalse de "el hato" en el municipio de Carmen de Carupa - Cundinamarca, a través de la ecuación universal de pérdida de suelo*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11634/9502>

- Pachón Cabra, A. S., & Castaño Rojas, P. M. (2018). *Identificación y análisis de los factores de riesgo en el municipio de Carmen de Carupa-Cundinamarca, para el fortalecimiento del esquema del ordenamiento territorial*. Bogotá: UniSalle.
- Palacios Sanchez, L. A., Paz Pellat, F., Oropeza Mota, J., Figueroa Sandoval, B., Martínez Menez, M., Ortiz Solorio, C., & Exebio Garcia, A. (2018). *Corrector Atmosférico en imágenes Landsat*. Ciudad de Mexico : Colegio de Postgrados Montecillo.
- Ramírez O., F., Hincapié G., E., Sadeghian KH., S., & Pérez G., U. (2007). *Erosividad de la lluvia en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas*. Obtenido de https://www.academia.edu/605435/Erosividad_de_las_lluvias_en_la_zona_cafetera_central_y_occidental_del_departamento_de_Caldas
- Ramírez Ortiz, F. A., Hincapie Gómez, E., Sadeghian-Khalajabadi, S., & Pérez Gómez, U. (2007). EROSIVIDAD DE LAS LLUVIAS EN LA ZONA CAFETERA CENTRAL Y OCCIDENTAL DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS. *CENICAFÉ*, 40 -52.
- Servicio Geológico Colombiano. (2002). *Mapa Geológico del Departamendo de cundinamarca*. Bogotá.
- Sevilla, U. d. (2019). *AHP* . Obtenido de <http://bibing.us.es>
- Tauta Muñoz, J. L., Camacho Tamayo, J. H., & Rodríguez Borray, G. A. (2018). *Estimación de erosión potencial bajo dos sistemas de corte de caña panelara utilizando la ecuacion universal de pérdida de suelos*. Bogotá: AGROSAVIA.
- Tibaquirá Perdomo, P., & Romero Rojas, j. (Enero-marzo de 2018). Análisis de la calidad trófica del embalse El Hato. *Escuela Colombiana de Ingeniería No 109*, 7-11.