

# Modelación de suelos degradados debido a procesos agroindustriales mediante el uso de imágenes Sentinel en el municipio de Valledupar-Cesar (Colombia)

## Modeling of degraded soils due to agro-industrial processes using sentinel images in the municipality of Valledupar-Cesar (Colombia)

Jaime Alejandro Morón Robles<sup>1</sup>; Luis Geovanny López Salgado<sup>2</sup>; Jorge Eliecer Galvis Daza<sup>3</sup>;  
Dino Carmelo Manco-Jaraba<sup>4</sup>; Elías Ernesto Rojas-Martínez<sup>5</sup>

1. Ingeniero Geólogo, Fundación Universitaria del Área Andina. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0871-6156>
2. Ingeniero Geólogo, Especialista en Gestión Ambiental, Fundación Universitaria del Área Andina. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0239-6267>
3. Ingeniero de Minas, M. Sc. En Tecnologías de la Información Geográfica, Fundación Universitaria del Área Andina. Email: [jgalvis@areandina.edu.co](mailto:jgalvis@areandina.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2950-9770>
4. Ingeniero de Minas, M. Sc. Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, Universidad de La Guajira. Email: [dinomancojaraba@gmail.com](mailto:dinomancojaraba@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8506-094X>.
5. Geólogo, M. Sc. Geología Económica. Fundación Universitaria del Área Andina, Grupo de investigación GIINGEO. Email: [eliaser@hotmail.com](mailto:eliaser@hotmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0402-1565>.

Cite this article as: J. A. Morón Robles, L.G. López Salgado, J.E. Galvis, D.C. Manco-Jaraba, E.E. Rojas-Martínez. "Modelación de suelos degradados debido a procesos agroindustriales mediante el uso de imágenes sentinel en el municipio de Valledupar-Cesar (Colombia) *Prospectiva*, Vol. 22 N° 1 2024.

Recibido: 16/09/2022 / Aceptado: 27/10/2023

<http://doi.org/10.15665/rp.v22i1.3063>

### RESUMEN

*La implementación de nuevas tecnologías en las actividades agroindustriales ha contribuido en la minimización de problemáticas por desabastecimiento; sin embargo, el manejo de la calidad de suelos de uso agrícolas ha sido un punto neurálgico debido a los procesos de infertilidad por erosión. Esta investigación tiene como objetivo modelar suelos degradados por la interacción agroindustrial mediante uso de imágenes Sentinel en el municipio de Valledupar, Cesar (Colombia). Se aplicaron diferentes imágenes de sensores remotos de orden nacional e internacional en la obtención de componentes para la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo RUSLE. Los resultados muestran un grado de erosividad bajo a muy alto – factor R, principalmente crítico hacia la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) y suelos de muy poca erodabilidad – factor K. El factor LS muestra una longitud y pendientes variadas. Bosques, cultivos y pastizales identificados mediante el factor C predominan hacia las zonas de conservación forestal del paisaje montañoso mientras que en el valle aluvial se tienen cultivos y arbustales junto a vegetación escasa y semiárida. Se obtuvo que el mayor porcentaje del área de estudio tiene pérdidas ligeras mientras que las zonas moderadas a muy alta se encuentran fuertemente dominadas por las altas pendientes.*

**Palabras clave:** Agroindustrial; Erodabilidad; Erosión; Municipio de Valledupar; RUSLE.

### ABSTRACT

*The implementation of new technologies in agro-industrial activities has contributed to the minimization of problems due to soil depletion; however, the management of soil quality for agricultural use has been a neuralgic point due to the processes of infertility due to erosion. The objective of this research is to model soils degraded by agroindustrial interaction using Sentinel images in the municipality of Valledupar, Cesar (Colombia). Different national and international remote sensing images were used to obtain components for the application of the universal soil loss equation RUSLE. The results show a low to very high degree of erosivity - R factor, mainly critical towards the Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) and soils of very low erodibility - K factor. The LS factor shows varied length and slopes. Forests, crops and grasslands identified by factor C predominate towards the forest conservation zones of the mountainous landscape, while in the alluvial valley there are crops and shrublands together with sparse and semi-arid vegetation. It was found that the largest percentage of the study area has slight losses while the moderate to very high zones are strongly dominated by high slopes.*

**Keywords:** Agro-industrial; Erodibility; Erosion; Municipality of Valledupar; RUSLE.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el mercado de la agricultura a nivel de producción industrial ha evidenciado diversos cambios como medida resolutoria a los diferentes problemas de desabastecimiento que se presentan actualmente a nivel mundial [1]-[6]. Uno de los principales cambios es el desarrollo de sistemas de innovación agrícola (p. ej. agroecología, AgTech, FoodTech, transiciones de proteínas, entre otros.), con los cuales se pretende establecer a nivel global, incursiones tecnológicas para el desarrollo de mejores prácticas en el sector agro [7]-[11].

Sin embargo, uno de los puntos más críticos a tratar, previo a la implementación de nuevas tecnologías, es el manejo de la calidad de los suelos agrícolas. Como lo reportan la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] en su “Informe sobre el Estado Mundial de la Contaminación del Suelo”, donde se estima que aproximadamente 35.000 millones de toneladas de suelo erosionado se movilizan y se pierden en afluentes y zonas costeras, de los cuales 12.000 millones de toneladas corresponden a suelos agrícolas, incluyendo los componentes nutritivos y contaminantes [12].

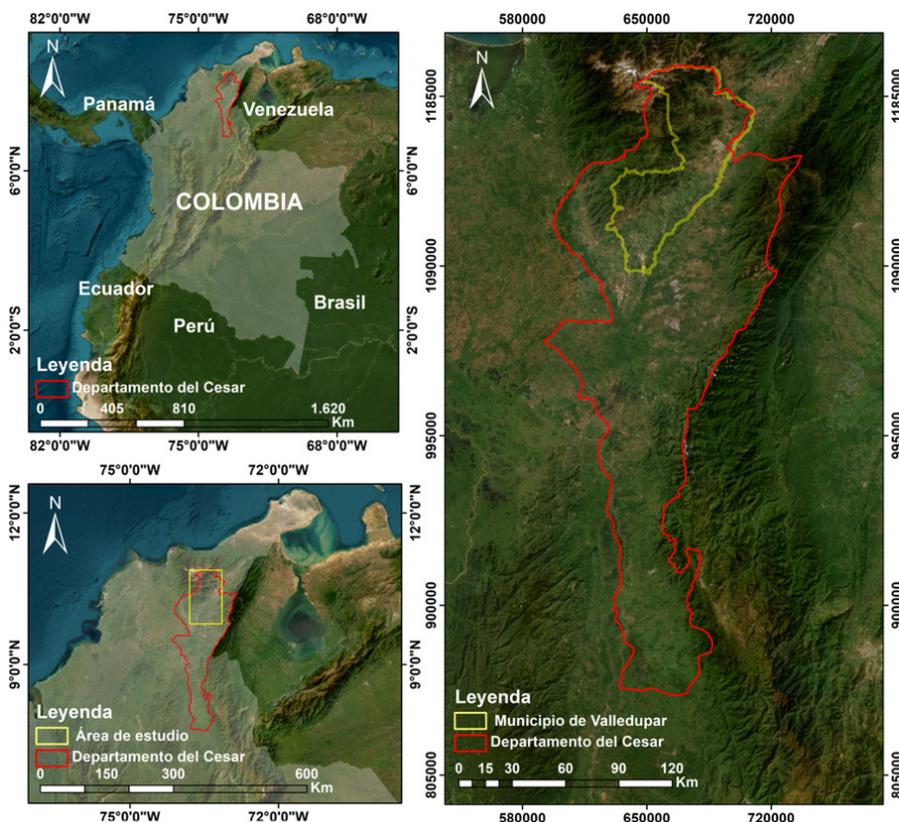
Teniendo en cuenta que la agroindustria es una de las principales actividades económicas de la costa norte de Colombia, especialmente en sus corregimientos y zonas rurales, es necesario realizar análisis que permitan conocer el nivel de afectación a partir de imágenes captadas con sensores remotos, para delimitar, modelar y predecir, el comportamiento de estos suelos. El objeto de esta investigación es modelar los suelos degradados debido a procesos agroindustriales mediante el uso de imágenes tipo Sentinel en el municipio de Valledupar-Cesar (Colombia).

## 2. LOCALIZACIÓN

El área de estudio es el municipio de Valledupar, ubicado al norte del departamento del Cesar, con coordenadas geográficas 10°27'47.3" N 73°15.193' O, en el valle conformado entre la Sierra Nevada de Santa Marta [SNSM] y la Serranía del Perijá [SP] (Figura 1). Con un área aproximada de 4493 km<sup>2</sup>.

Figura 1. Localización del Área de investigación.

Figure 1. Location of the research area.



### 3. METODOLOGÍA

Inicialmente se realizó revisión del estado del arte en bases de datos académicas y científicas, posteriormente se descargaron imágenes sentinel-2A del portal de Copernicus Open Access Hub y finalmente se analizaron los factores del método RUSLE [13]. Su función es referida en la siguiente ecuación (1):

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Donde los valores de A representan la tasa anual de pérdida del suelo debido a la acción del agua, R es el factor de erosividad que representa la capacidad de la lluvia para erosionar el suelo, K el factor de erodabilidad del suelo asociado a la composición textural y contenido de carbón orgánico, LS factor de longitud y grado de inclinación de pendientes topográficas, C factor de manejo de cobertura vegetal y P factor de prácticas de manejo del suelo [13].

Para proceder con el cálculo respectivo de cada uno de los factores que componen la ecuación (1), se consultaron bases de datos locales administradas por instituciones nacionales, tales como: Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Plan de Ordenamiento territorial (POT) del municipio de Valledupar. De igual forma, se consultaron datos geoespaciales (i.e. imágenes satelitales e imágenes en formato ráster) proporcionados por entidades norteamericanas, como son Alaska Satellite Facility (ASF) y United States Geological Survey (USGS), y entidades internacionales como el International Soil Reference and Information Center (ISRIC).

Una vez recopilada la información, los datos fueron procesados en el software de análisis geoespacial ArcGIS, que permite secuenciar diversos procedimientos algorítmicos capaces de correlacionar informaciones geodésicas y climatológicas [14], [15].

#### Factor de Erosividad (R)

Para la determinación del factor de erosividad se analizaron 20 estaciones hidrometeorológicas reguladas por el IDEAM, de las cuales 9 se encuentran ubicadas dentro del municipio de Valledupar y 11 distribuidas en los municipios aledaños. Cada estación proporcionó una base de datos de precipitación mensual para un rango anual de 20 años, específicamente entre 2002 y 2021. Una vez recopilada la información, se promediaron los datos en valores de precipitación mensual y media anual para cada estación, para acto seguido, determinar el IMF en cada una de ellas. Posteriormente, se implementa el modelo RUSLE para el factor de erosividad por escorrentía (R) [16], tal como se expresa en la siguiente ecuación (2).

$$R = \sum_{i=1}^n EI_{30} \quad (2)$$

Donde R representa el índice de erosividad, n número de lluvias, E energética cinética de la lluvia (MJ/ha) y I30 como la intensidad de la lluvia en un lapso de 30 minutos.

Se optó por la implementación del Índice Modificado de Fournier (IMF) implementado por Arnoldus [17] el cual describe la erosividad de la precipitación como una sumatoria de la relación entre las precipitaciones medias mensuales sobre la precipitación media anual (Ecuación 3).

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{Pi^2}{Pt} \quad (3)$$

Siendo IMF el índice de agresividad climática o índice modificado de Fournier, Pi promedio de precipitación mensual para cada mes i (mm) y Pt promedio de precipitación anual (mm). Calculado IMF, se aplicó el análisis de regresión lineal simple (ecuación 4) desarrollada por Ramírez-Ortiz et al. [18] con el fin de correlacionar el factor EI30 y IMF, para obtener el factor de erosividad.

$$EI_{30} = \sum_1^{12} 38,4 * IMF + 28,3 \quad (4)$$

Como valor adicional, se incluyó en el estudio el índice de concentración de la precipitación (ICP), para determinar la uniformidad de las precipitaciones en el área de estudio, para el rango de años considerados. Dicho índice se calculó para cada estación, mediante la ecuación (5) propuesta por Oliver [19]:

$$ICP = \sum_1^{12} \frac{Pi^2}{Pt^2} \quad (5)$$

ICP representa el índice de concentración de la precipitación, Pi el promedio mensual de las precipitaciones y Pt el promedio de precipitación anual. Consecuentemente, se proyectaron los ráster de precipitación mensual usando el método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW) en el software ArcGIS.

### Factor de Erodabilidad (K)

Para la determinación de este factor se consideró la ecuación (6) propuesta por Sharpley & Williams [14], implementando imágenes del Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos [ISRIC], para la cuantificación de arena, limo, arcilla y carbón orgánico superficial en valores porcentuales.

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 * e^{\left[ -0.0256 * SAN * \left( 1 - \frac{SIL}{100} \right) \right]} \right\} * \left[ \left( \frac{SIL}{CLA + SIL} \right) \right]^{0.3} * \left[ 1.0 - \frac{0.25 * C}{C + e^{3.72 - 2.95 * C}} \right] * \left[ 1.0 - \frac{0.7 * SN_1}{SN_1 + e^{(-5.51 + 22.9 * SN_1)}} \right] \quad (6)$$

Cada imagen se basa en predicciones derivadas de mapas digitales por medio de regresiones Quantile Random Forest, perfiles de suelos y capas ambientales con 250 m de altura y profundidades variables entre 0 y 200 cm [20].

Para unificar las profundidades y trabajar un ráster por cada componente del suelo, se realizó un promedio ponderado en cada intervalo de profundidad, por medio de la ecuación de la regla trapezoidal (7) sugerida por [21], generando imágenes ráster para cada variable (i.e. SAN, SIL, CLA y C) de la ecuación de erodabilidad (Ecuación 6) por medio del software RStudio correspondiente al mapa del factor K.

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \approx \frac{1}{(b-a)} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N-1} (x_{k+1} - x_k) (f(x_k) + f(x_{k+1})) \quad (7)$$

Donde N indica el número de profundidad, x<sub>k</sub> la k-ésima profundidad y f(x<sub>k</sub>) valor de la variable objetivo a una profundidad x<sub>k</sub> [21].

### Factor Topográfico (LS)

Las áreas de interés abarcan toda la zona urbana y rural del municipio de Valledupar con un área total aproximada de 418.579 Ha., implementándose un modelo de elevación digital ALOS PALSAR con resolución 12.5 m de ASF Data Search Vertex – EARTHDATA del año 2011; permitiendo calcular el mapa de pendientes (SLOPE) y partir de este los mapas de dirección del flujo y acumulación de flujo, aplicándose la fórmula del cálculo factor LS (Ecuación 8).

$$LS = \left( \frac{(FlowA * \frac{cellsize}{22,13})^{0,4}}{\frac{Sen(SLOPE)^{1,3}}{0,0896}} \right)^{Flow A} \quad (8)$$

### Factor de Cobertura Vegetal (C)

Las 5 imágenes Sentinel (NASA–Earth Explorer) proporcionan un total de 13 bandas, y resolución de 10 m en sus versiones 2A & 2B. Las 2A son orto rectificadas con niveles de reflectancia por debajo de la atmósfera y con Cloud Cover menor al 5%.

Para el factor de Cobertura vegetal se calcularon los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) a partir de la combinación de las bandas (Infrarrojo cercano y rojo) para imágenes de periodos secos y húmedos (Ecuación 9) [22]

$$NDVI = \left( \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \right); \text{ NIR: Near - Infrared / RED: rojo } (9)$$

Una vez obtenidos los NDVI, se generó una imagen promedio final. Al resultado anterior, se aplicó la ecuación (10) para zonas tropicales obteniendo el mapa del Factor C [23].

$$C_{rA} = 0.1 * \left( \frac{-NDVI+1}{2} \right) (10)$$

El índice de vegetación es usualmente utilizado para agricultura, monitoreo de recursos naturales y el efecto de incendios forestales [24]. El índice de factor marca la vigorosidad de la cubierta vegetal y también la capacidad fotosintética [25]. Por otro lado, la relación que existe entre la banda NIR y RED se debe a que cuando la planta está vigorosa absorbe mayor energía del rojo y devuelve poca energía, es decir, se tiene poca reflexión del rojo [15]. Por otra parte, cuando está enferma devuelve el rojo visible. En cuanto al infrarrojo cercano cuando la planta que se encuentra sana no absorbe y mientras está enferma absorbe mayormente [26].

### Factor de Prácticas de Manejo de Suelo (P)

Este factor obedece a las prácticas antrópicas que pueden modificar y alterar las condiciones superficiales del terreno [27]. De lo anterior, es necesario desarrollar prácticas que permitan generar estimaciones a la rugosidad de las superficies respecto a la reducción de la escorrentía, y en algunos casos la pendiente del terreno.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Factor R - Erosividad por escorrentía

El cálculo IMF muestra una calificación de moderado a muy alto, acorde a la clasificación para Latinoamérica expuesta por la UNESCO [28]. Los resultados presentados (tabla 1) obedecen a la frecuencia e intensidad correspondiente a zonas tropicales, predominando los valores más elevados hacia el norte del municipio.

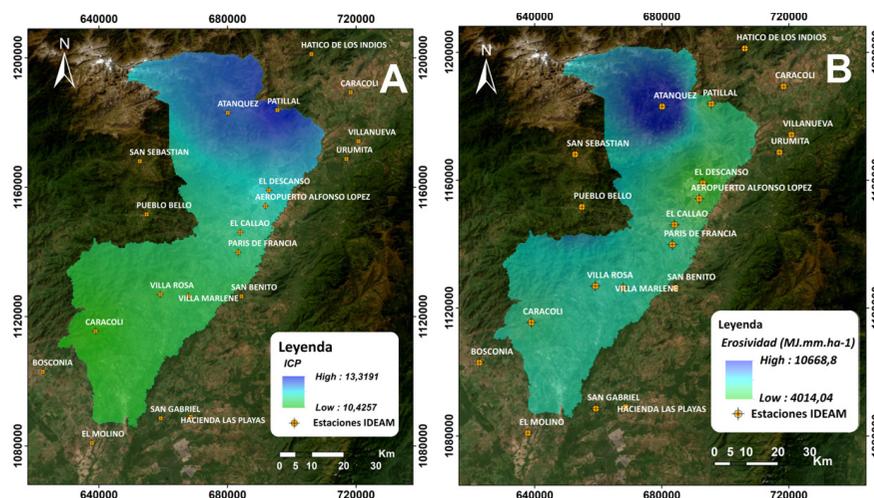
Así mismo, el ráster (Figura 2A) para el índice de concentración de precipitación fue clasificado bajo los estándares establecidos por Ramírez-Ortiz et al. [18], presentando una clasificación moderadamente estacional, indicando que las precipitaciones se presentan de manera regular, sin variaciones espaciales importantes a considerar.

El Factor R presentó valores entre 4014 Mj.mm.ha-1 y 10668 Mj.mm.ha-1, siendo los más relevantes los localizados en la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), clasificándose bajo los estándares por Rivera y Gómez [29].

El grado de erosividad plasmado en la figura 2B representa la influencia de las precipitaciones predominantes de la SNSM con respecto a las del Valle del Río Cesar, debido a su divergencia geomorfológica y diferencia de alturas de las estaciones, donde los valores son mayores al norte del municipio (aproximadamente 800 msnm) con respecto a los del sur (entre 110 - 180msnm).

Figura 2. A. Índice de concentración de precipitación. B. Factor de erosividad RUSLE.

Figure 2. A. Precipitation concentration index. B. RUSLE erosivity factor.



**Tabla 1.** Factor de erosividad por promedio de precipitación (2001-2021).

**Table 1.** Erosivity factor by average precipitation (2001-2021).

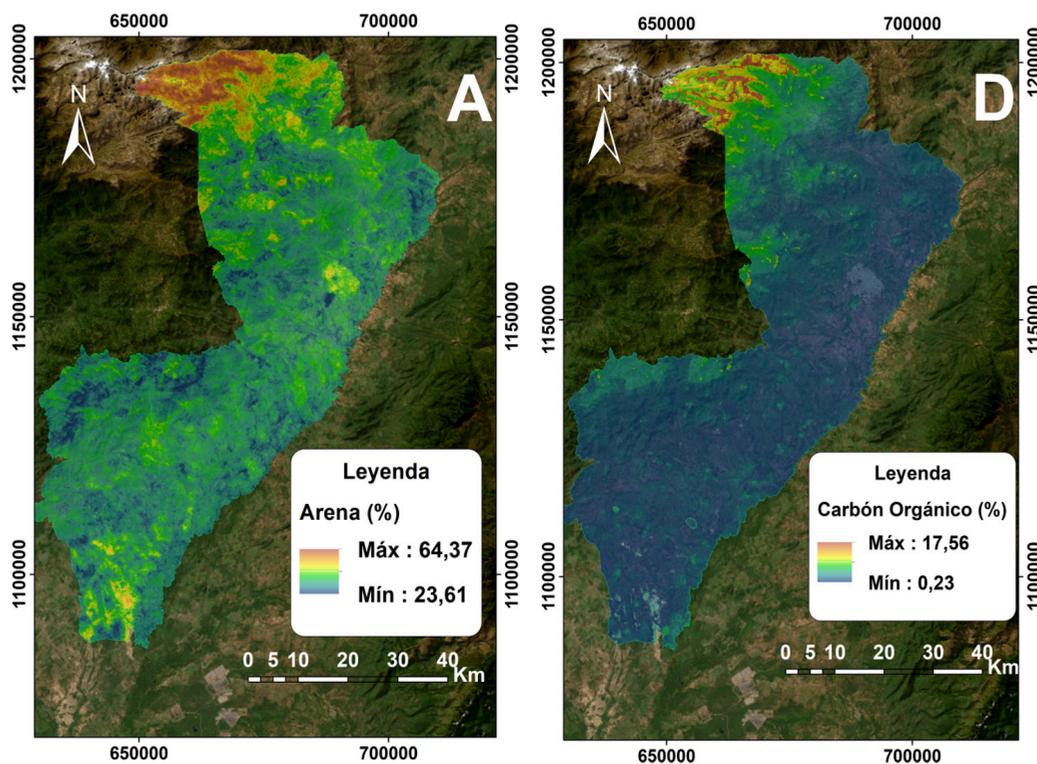
Estación IDEAM	Promedio Multianual (mm)	IMF	ICP (%)	Factor R (MJ.mm.ha.1)
Caracolí	830.24	108.02	13%	4176.13
El Descanso	804.52	103.78	13%	4013.52
Villa Marlene	1432.40	157.84	11%	6089.17
Patillal	1006.36	134.05	13%	5175.71
Hatico de los Indios	1140.68	143.24	13%	5528.64
Villanueva	1408.31	167.96	12%	6477.96
Atánquez	2150.72	277.14	13%	10670.39
Paris de Francia	1305.12	152.22	12%	5873.68
Urumita	1267.17	144.46	11%	5575.73
Hacienda Las Playas	1455.15	162.46	11%	6266.59
San Benito	1272.37	149.91	12%	5784.96
San Gabriel	1485.90	154.04	10%	5943.46

**Factor K– Erodabilidad**

Se obtuvieron 28 imágenes ráster compuestas por cuatro conjuntos de 7 imágenes, con profundidades de 0 cm, 5 cm, 15 cm, 30 cm, 60 cm, 100 cm y 200 cm por cada grupo textural (i.e. arena, limo y arcilla) y contenido de carbón orgánico; para optimizar el procedimiento de integración, se utilizó la ecuación de la regla trapezoidal (7) en el programa RStudio, generando los ráster SAN, SIL, CLA y C (Figura 3) de la ecuación K.

**Figura 3.** Imágenes formato ráster del porcentaje de arena (SAN), limo (SIL), arcilla (CLA) y carbón orgánico (C).

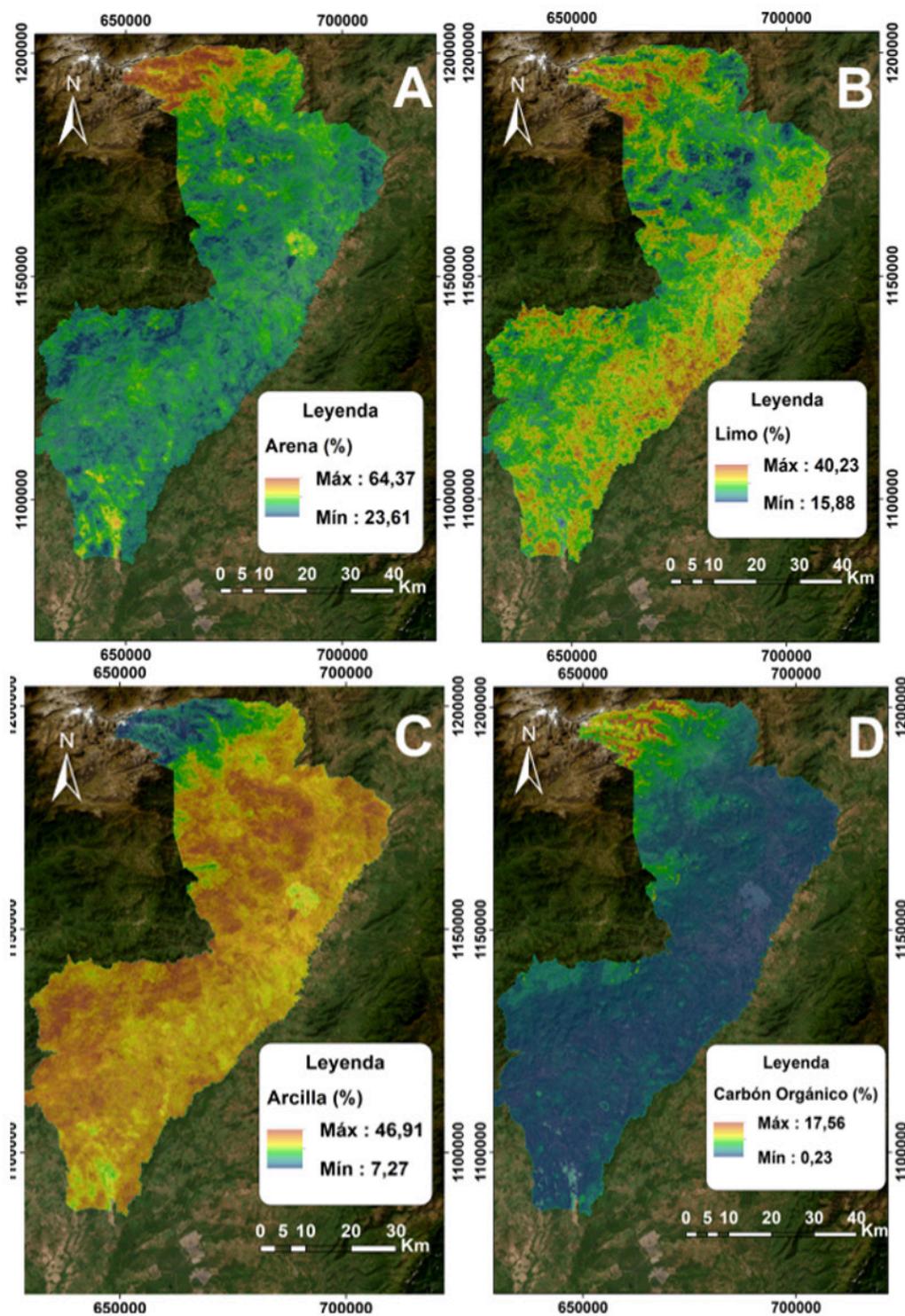
**Figure 3.** Raster format images of the percentage of sand (SAN), silt (SIL), clay (CLA) and organic carbon (C).



El mapa de erodabilidad (Figura 4) presenta valores entre 0.023 y 0.042  $t \cdot ha^{-1} \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot ha^{-1}$ , clasificándose como muy poco erodable en toda el área del municipio, según los parámetros establecidos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) expuestos por Santos y González [30]. Sin embargo, los valores más altos obedecen a la cuantificación textural, donde las altas cantidades de limo y bajos contenidos de carbono orgánico generan mayor susceptibilidad a la erosión por precipitación [24].

Figura 4. Mapa de erodabilidad.

Figure 4. Erodibility map.

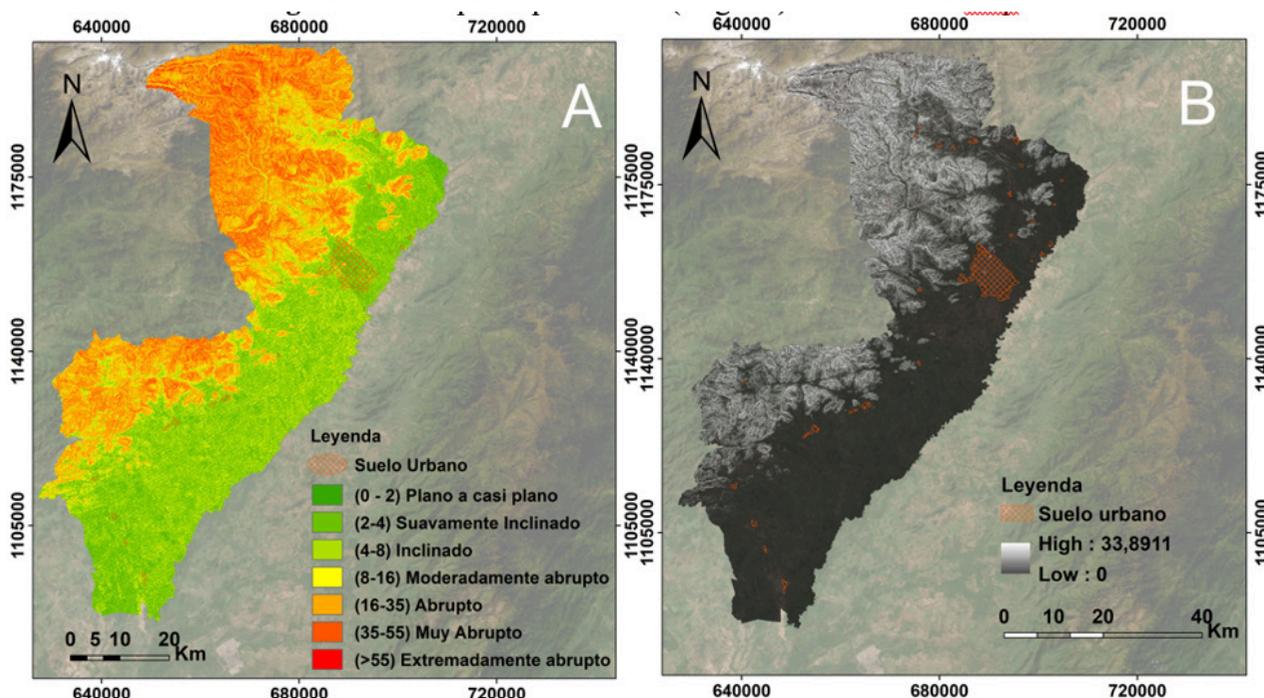


### Factor LS – Topográfico

El municipio de Valledupar presenta dos tipos de paisajes, montañoso y de valle aluvial, denotado por la caracterización de sus pendientes hacia el flanco occidental de SNSM que van desde moderadamente abrupto (8-16°) hasta extremadamente abrupto (>55°) (Figura 5A) [31] [32]. La zona del valle aluvial se compone por pendientes inclinadas (4-8°) en límites con el piedemonte y planicie (0-2°) hacia la zona oriental del municipio (Figura 5A).

Se utilizó la calculadora ráster para calcular el factor LS mediante la ecuación (8) correspondiente (Figura 5B) [33]. El factor LS medio es 0.16 y los valores más altos se encuentran cerca de los cuerpos de agua. El aumento del factor topográfico está relacionado con mayores tasas de escorrentía y erosión que se sitúan con las pendientes más altas que se encuentran hacia el paisaje de montaña, caso contrario, de las zonas planas del valle aluvial [34].

**Figura 5.** A. Mapa de Pendientes - SLOPE (Grados). B. Mapa de Factor LS.  
**Figure 5.** A. Slope Map - SLOPE (Degrees). B. LS Factor Map.



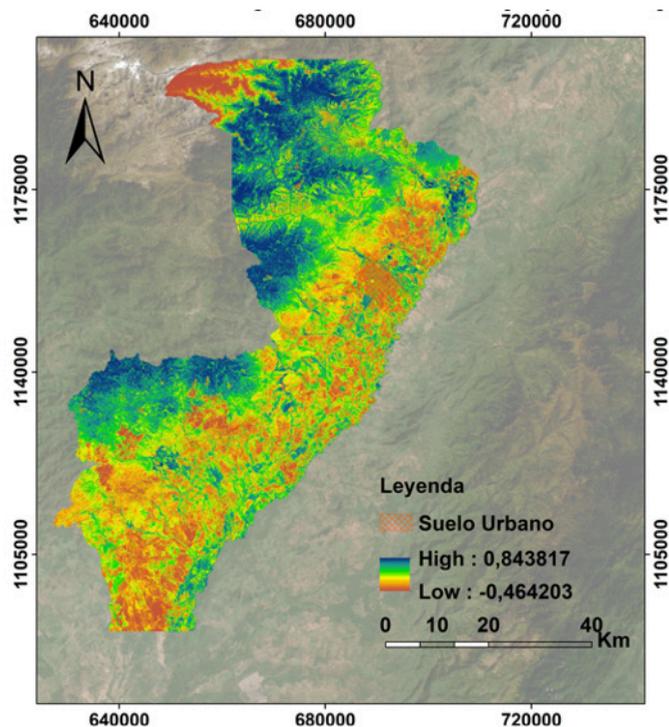
### Factor C – Uso de Suelo

Se obtuvo una clasificación del uso de los suelos con rangos entre -0.32 a 0.84 siendo aquellos entre 0 y -1 plantas muertas, procesos altos de degradación de suelos y objetos inanimados, donde se sitúan los centros poblados o suelos urbanos (Figura 6). La población de datos se representa mayormente hacia el centro del municipio con mayor incidencia hacia el sur, colindando con el municipio de Bosconia, guardando relación con las actividades agrícolas, ganaderas y mineras, que han tenido auge con la reactivación del proyecto vial ruta del Sol IV [35].

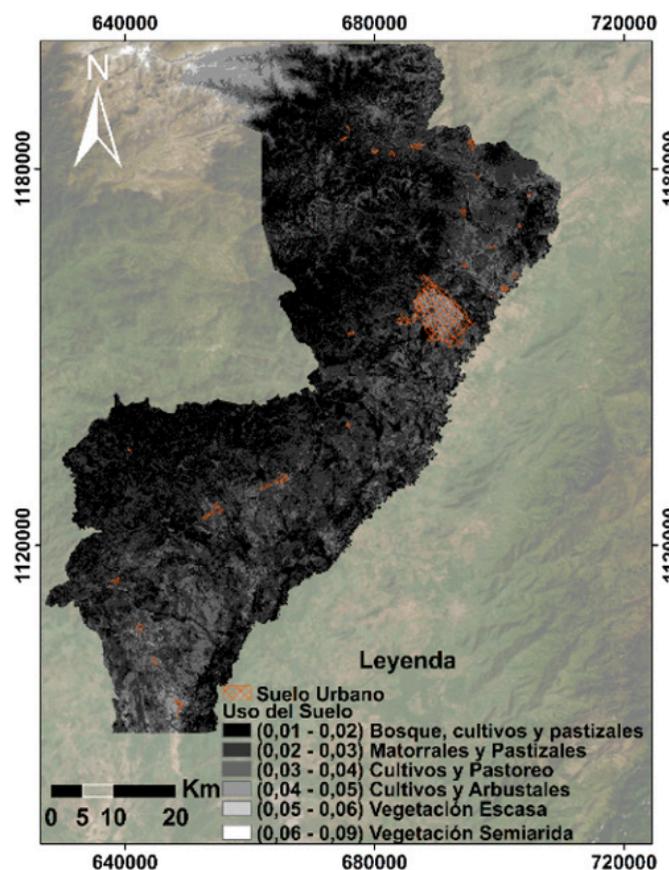
Las zonas por encima de 0 a 1 representan vegetación poco saludable, principalmente localizadas hacia el piedemonte y estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Las zonas caracterizadas como bosques, cultivos y pastizales (0.1-0.4) se encuentran en las estribaciones de la SNSM, relacionándolas con zonas de conservación ambiental, con mayor diversidad de pisos térmicos y afluencia hídrica por escorrentía, favoreciendo este tipo de vegetación. Se evidenciaron procesos de desertificación (i.e. zonas de vegetación escasa (0.5-0.6) y vegetación semiárida (0.6-0.9) relacionados con malas prácticas de agricultura y ganadería extensiva, clasificado según el uso de suelo del municipio como zonas productivas para agricultura y ganadería (Figura 7).

**Figura 6.** Variación del índice de vegetación NDVI en el municipio de Valledupar, Cesar.  
**Figure 6.** Variation of the NDVI vegetation index in the municipality of Valledupar, Cesar.



**Figura 7.** Resultados de aplicación del Factor C con ecuación de zonas tropicales.  
**Figure 7.** Results of the application of Factor C with the equation of tropical zones.



### Factor P – Prácticas de Conservación

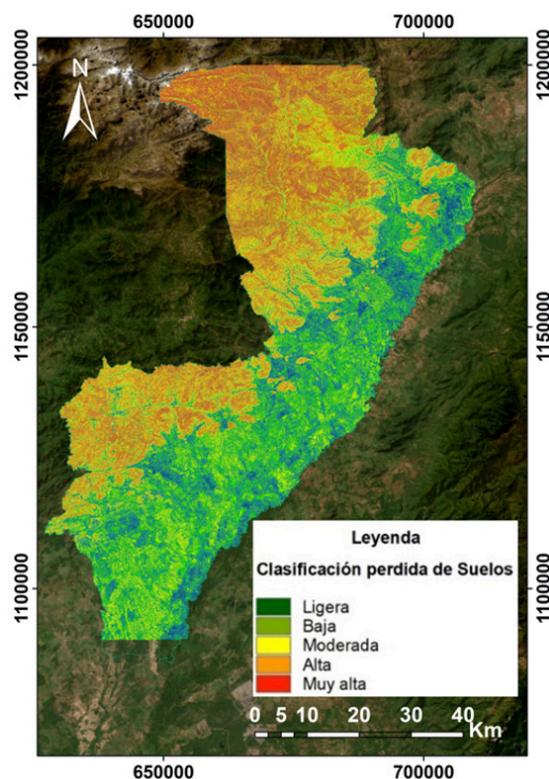
Para este proyecto, los cultivos agroindustriales del municipio de Valledupar se encuentran planificados y desarrollados en su mayoría, en las áreas de la cuenca del Valle del Río Cesar, debido a su bajo nivel de pendiente que no requieren técnicas de conservación como cultivos a nivel, en faja o terrazas (Alcaldía de Valledupar, Acuerdo N° 011 junio 2015). Por lo tanto, el valor estipulado para el factor P es de 1 en todo el terreno municipal.

### Factor A – Pérdidas por erosión

Se clasificaron los porcentajes de pérdida de suelo según la metodología propuesta por Pérez [36] (Tabla 8). Los valores por encima de 26 t/ha/año se hallan principalmente en zonas de alta pendiente de la SNSM, a pesar de ser un área de conservación forestal. La alta precipitación y procesos antrópicos (e.g. la deforestación y alteración de la flora) generan frecuentes procesos de remoción en masa, denudando la cobertera vegetal y facilitando la erosión.

Figura 8. Mapa de Pérdida de Suelo para el municipio de Valledupar, Cesar.

Figure 8. Map of Soil Loss for the municipality of Valledupar, Cesar.



## 6. CONCLUSIONES

El factor C representa mayor porcentaje de bosques y matorrales hacia el flanco occidental del municipio Valledupar; además, se identificó pérdida de la cobertura vegetal ubicadas hacia las regiones centro y sur, arrojando clasificaciones de tipo cultivos-arbustales hasta vegetación escasa-semiárida (0.05-0.09) favoreciendo los procesos de degradación y meteorización. El municipio de Valledupar registra procesos erosivos que oscilan de 10 a 100 t/ha/año, destacando las zonas con mayor preponderancia morfológica (zonas de mayor pendiente) de moderadas a muy altas y extensión aproximada de 120.000 Ha; siendo la categoría moderada la de mayor connotación en esta zona con pérdidas de suelo anual con valores de 26 a 50 t/ha.

La concentración de precipitaciones durante los últimos 20 años (2002 -2021) en el municipio de Valledupar ha sido moderadamente estacional, evidenciado rangos de ICP que oscilan entre 10.45 y 13.31%, siendo la zona norte la de mayor irregularidad dentro del rango.

Los suelos del Valle del Río Cesar presentan altos contenidos de limos y arenas, que en conjunto con los altos niveles de agresividad de precipitaciones (IMF) y bajos porcentajes de carbono orgánico superficial, generan una susceptibilidad a la erosión relativamente alta. Los suelos estipulados para la producción agroindustrial en el Valle del Río Cesar están compuestos por altos porcentajes de arcillas, bajos niveles de pendiente y precipitaciones altamente agresivas presentando altos grados de erosión relacionados con procesos de compactación del suelo (comúnmente en suelos ganaderos) y bajo índice de infiltración debido a la alta plasticidad.

La pérdida de suelo se presenta en todas las coberturas, siendo la de mayor impacto las zonas con alto grado de desertificación, ganadería y cultivos; y menor impacto las zonas con bosque, vegetación nativa y cultivos permanentes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] A. Pandey, V. Chowdary, B. Mal, “Identification of Critical Erosion Prone Areas in the Small Agricultural Watershed Using USLE, GIS and Remote Sensing”, *Water Resources Management*, 729-746, 2006.
- [2] M.A. Marques, L.H. Anjos, A.R. Sanchez Delgado, “Land Recovery and Soil Management with Agroforestry Systems”, *Spanish Journal of Soil Science*, 2022.
- [3] M.G. Ali, S. Ali, R.H. Arshad, A. Nazeer, M.M. Waqas, M. Waseem, R. Aslam, M. Cheema, M. Leta, I. Shauket, “Estimation of potential soil erosion and sediment yield: A case study of the transboundary che-nab river catchment”. *Water (Switzerland)*, Volumen 13, Issue 24, 2021.
- [4] M. Pereira, J. Cabral, “Loss of soil in the high course of hydrographic basins of ribeirões taquaruçu grande and taquaruçuzinho, palmas (to)”, *Revista Brasileira de Geografia Física*, 332-339. 2021.
- [5] A. Aflizar, C. Aprisal, C. Alarima, T. Masunaga, “Effect of soil erosion and topography on distribution of cadmium (Cd) in Sumani watershed, west Sumatra, Indonesia”, *EDP Sciences*, 2018.
- [6] A.H. Al Rammahi, S. Khassaf, “Estimation of soil erodibility factor in rusle equation for euphrates river watershed using GIS”, *GEOMATE International Society*, 164-169, 2018.
- [7] L. Klerkx, S. Begemann, “Supporting Food Systems Transformation: The What, Why, Who, Where and How of Mission-Oriented Agricultural Innovation Systems”, *Elsevier Ltd. Agricultural Systems*, 1-5, 2020.
- [8] J.R. Silva, J.A. Rodrigues, L.F. Oliveira, M.R. Viola, “Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG)”, *University Center of Maringa*, Volumen 14, Issue 1, 2021.
- [9] M.L. Duarte, E.P. Silva Filho, H.S. Costa, T.A. Silva. “Soil Erosion Assessment Using RUSLE Model and GIS in Juma Watershed”, *Brazilian Amazon, Revista Brasileira De Geografia Física*, 2931-2945, 2021.
- [10] T.G. Pham, J. Degener, M. Kappas, “Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam”, *International Soil and Water Conservation Research*, 99-110, 2018.
- [11] I. Fenjiro, A. Zouagui, M. Manaouch. “Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Ziz Upper Basin Southeast Morocco”, *University of Craiova, Faculty of Social Sciences, Department of Geography*, 131-142, 2020.

- [12] FAO, PNUMA, “Evaluación Mundial de la Contaminación del Suelo - Resumen para los Formuladores de Políticas”, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación – FAO, 2022.
- [13] K. Renard, G.R. Foster, G. Weesies, D.K. McCool, D.C. Yoder, “Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)”, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703, 404, 1997.
- [14] A. Sharpley, J. Williams, “EPIC - Erosion/Productivity Impact Calculator: 1 Model Documentation”, U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768, 235, 1990.
- [15] H. Tanyas, C. Kolat, M. Lutfi Suzen, “A new approach to estimate cover-management factor of RUSLE and validation of RUSLE model in the watershed of Kartalkaya DAM”, *Journal of Hydrology*, 584-598, 2015.
- [16] J. Wang, P. Lu, D. Valente, I. Petrosillo, S. Babu, S. Xu, C. Li, D. Huang, M. Liu, “Analysis of Soil Erosion Characteristics in Small Watershed of the Loess Tableland Plateau of China”, *Ecological Indicators*, Vol 137, ISSN 1470-160X, 2022.
- [17] H.M.J. ARNOLDUS, “An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation”, In: De Boodst, T., Gabriels, D. (Eds.), *Assesment of erosion*, London, John Wiley Sons, p. 125-132, 1980.
- [18] F. Ramírez-Ortiz, E. Hincapié-Gómez, S. Sadeghian-Khalajabadi, U. Pérez-Gómez, “Erosividad de las lluvias en la Zona Cafetera Central y Occidental del Departamento de Caldas”, *Cenicafé*, 40-52, 2007.
- [19] J. Oliver, “Monthly Precipitation Distribution: A Comparative Index”, *The Professional Geographer*, p.300-309, 1980.
- [20] ISRIC Data Hub, [Internet], “SoilGrids” World Soil Information, 2022, Disponible desde: < <https://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/cfd1c3c5-b285-480f-b60b-3bc407dfc131> >
- [21] T. Hengl, J. Mendes de Jesus, G. Heuvelink, M. Ruiperez González, M. Kilibarda, A. Blagotic, W. Shangguan, M. Wright, X. Geng, B Bauer-Marschallinger, A. Guevara, R. Vargas, R. Macmillan, N. Batjes, J. Leenaars, E. Ribeiro, I. Wheeler, S. Mantel, B. Kempen, “SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning”, *PLOS ONE*, 2-5, 2017.
- [22] A. Trindade, P. De oliveira, J. Anache, E. Wendland, “Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil”. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 1918-1928, 2016.
- [23] C. Colman, K. Garcia, R. Pereira, E. Shinna, F. Lima, “Different approaches to estimate the sediment yield in a tropical watershed”, *Revista Brasileira Recursos Hídricos*, 23-26, 2018.
- [24] C. Martínez López, A. Rivera Paja, J. Menjivar Flores, “Susceptibility to Erosion Risks in Soils Dedicated to the Pineapple Cultivation in the State of Valle del Cauca, Colombia”, *Earth Sciences Research Journal*, 201-206, 2021.
- [25] C. Alewell, P. Borrelli, K. Meusburger, P. Panagos, “Using the USLE: Chances, Challenges and Limitations of Soil Erosion Modelling”, *International Soil and Water Conservation Research*, 203-225, 2019.
- [26] V. Duringon, D. Carvalho, M. Antunes, P. Oliviera, M. Fernandes, “NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in tropical watershed”, *International Journal of Remote Sensing*, 441-453, 2014.

- [27] K. Renard, G. Foster, G. Weesies, J. Porter, "RUSLE Revised Universal Soil Loss Equation", *Journal of Soil and Water Conservation*, 30-33. 1991
- [28] UNESCO, "Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semi-áridas, y sub-húmedas secas de América Latina y el Caribe", CAZALAC, Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°3, 2006.
- [29] P.H. Rivera, A.A. Gómez, "Erosividad de las lluvias de la zona cafetera central colombiana (Caldas, Quindío, Risaralda)", *Cenicafé* 42(2):37-52, 1991.
- [30] L. A. Santos Acuña, C. A. González M., "Mapa de índices de Erodabilidad en la cuenca alta del Río Bogotá utilizando el Sistema de Información Geográfica ARC-INFO™", *Ing. Inv.*, no. 43, pp. 30–33, May 1999.
- [31] R.A. Van Zuidam, "Aerial photointerpretation in terrain analysis and geomorphological mapping". The Hague, Smits Publishers, 442 p, 1986
- [32] Servicio Geológico Colombiano, "GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1: 25.000", Servicio Geológico Colombiano, 188 p, Bogotá, D. C., Colombia Diciembre, 2017.
- [33] P.J.J. Desmet, G. Govers, "A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units", *Journal of Soil and Water Conservation*, 51 (5) 427-433, Sep 1996.
- [34] P.T.S. Oliveira, E. Wendland, M.A. Nearing, "Rainfall erosivity in Brazil: A review". *CATENA*, 100, 139–147, January 2013.
- [35] A. Almagro, T.C. Thomé, C.B. Colman, R.B. Pereira, J. Marcato Junior, D.B.B. Rodrigues, P.T.S. Oliveira, "Improving cover and management factor (C-factor) estimation using remote sensing approaches for tropical regions", *International Soil and Water Conservation Research*, 7(4), 325–334, December 2019.
- [36] S. Pérez, "Modelo Para Evaluar La Erosión Hídrica En Colombia Utilizando Sistemas De Información Geográfica", Servicio Geológico Colombiano, 74 p, Bogotá, D.C. 2001.