



# **Análisis espacial de la erosión del suelo en microcuencas del bajo San Jorge La Mojana mediante RUSLE y NDVI**

Ana Mercedes Negrete Osuna

Carolina Del Carmen Bello Hernández

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Tecnologías de la Información Geográfica

Asesora: Catalina Guevara Giraldo, Magíster (MSc) en TIG

Asesores de recursos académicos: Diego Alejandro Soto Herrera (asesor bibliográfico), Claudia Marcela Cerón Rubio (asesora Centro de Escritura) y Elvia Lucía Sánchez García (asesora de integridad académica)

Universidad de Manizales  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica  
Manizales, Caldas, Colombia

2025

---

<b>Cita</b>	(Negrete & Bello, 2025)
<b>Referencia</b>	<i>Jiménez Quintero, J. D. (2021). Análisis espacial de la erosión del suelo en microcuencas del bajo San Jorge la mojana mediante RUSLE y NDVI [Tesis de maestría]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.</i>
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	

---



Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica, XI

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo

Línea de Investigación Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente.

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo - CIMAD.

**Declaración de inteligencia artificial:** el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, Turnitin, Copilot, Gemini, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

**Biblioteca y Centro de Recursos:** <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

**Repositorio Institucional:** <http://ridum.umanizales.edu.co/>

**Universidad de Manizales:** [www.umanizales.edu.co](http://www.umanizales.edu.co)

**Revistas:** <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

**Fondo Editorial:** <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Agradecimientos**

Esta tesis, aunque ha exigido esfuerzo, dedicación y muchas horas de trabajo, no habría sido posible sin la colaboración desinteresada y el valioso apoyo de personas que fueron un sostén fundamental en este proceso. A todas ellas, mi más profundo agradecimiento.

En primer lugar, agradezco a Dios, por acompañarme en cada paso del camino, por fortalecer mi corazón en los momentos de duda y cansancio, y por iluminar mi mente para continuar con esperanza y firmeza. Su guía ha sido mi mayor fuente de fortaleza espiritual y emocional.

Agradezco hoy y siempre a mis padres, quienes han procurado mi bienestar en todo momento. Su apoyo constante, su cariño incondicional y los valores que me han inculcado han sido clave para alcanzar esta meta.

A mi amada hija, gracias por ser mi mayor fuente de inspiración. Tu presencia me motiva a ser mejor cada día. Aunque eres aún pequeña, tu alegría, tu amor puro y tu sola existencia me impulsan a seguir adelante con determinación. Este logro también es para ti, como ejemplo de que con esfuerzo y fe todo es posible.

A Sergio, mi esposo, le doy las gracias por su comprensión, paciencia y por estar siempre a mi lado, acompañándome con amor y serenidad en los momentos más exigentes de este proceso.

Mi gratitud especial a mi amiga y compañera de tesis, Ana Mercedes, por su apoyo emocional, su compromiso constante y sus palabras de ánimo durante los momentos más desafiantes. Compartir este proyecto contigo ha sido una experiencia enriquecedora, llena de aprendizaje y compañerismo.

Finalmente, agradezco sinceramente a mis profesores y al jurado evaluador, por su enseñanza inspiradora, su guía académica y sus valiosas observaciones, que contribuyeron significativamente al fortalecimiento y mejora de esta investigación.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro.

*Carolina Del Carmen Bello Hernández*

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y mi luz en cada paso de este camino. Su presencia ha sido indispensable en los momentos de dificultad y en los logros alcanzados.

A mis hijas María Celeste y María Andrea, quienes son mi inspiración diaria. Gracias por su amor, por su comprensión y por darme la motivación constante para seguir adelante. Este logro también es de ustedes.

A Jhonny Avendaño Estrada, gracias por ser mi apoyo constante, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por estar a mi lado en cada momento indispensable, y por darme siempre palabras de aliento cuando más lo necesitaba. Tu apoyo ha sido fundamental en esta etapa de mi vida.

A mis padres, por su respaldo constante, por enseñarme con su ejemplo la importancia del esfuerzo, la responsabilidad y la perseverancia. Gracias por creer siempre en mí.

A Carolina Bello Hernández, mi compañera de tesis, por su compromiso, dedicación y por ser un gran apoyo para lograr culminar este trabajo. Fue un verdadero privilegio compartir este camino contigo.

A Sebastián y a todo el grupo de trabajo, gracias por su colaboración y por aportar a este proceso con entusiasmo y compromiso.

Agradezco sinceramente a José Fernando Mejía Correa, director de posgrados, y a Catalina Guevara, por su acompañamiento, orientación y apoyo constante a lo largo de este recorrido. De igual manera, extendo mi gratitud a todos los profesores que hicieron parte de mi formación, por compartir su conocimiento y contribuir a mi crecimiento profesional y personal.

Finalmente, gracias a la Universidad de Manizales por abrirme las puertas, brindarme las herramientas necesarias para alcanzar esta meta y ser parte fundamental de esta etapa tan significativa de mi vida.

A todos, gracias por ser parte de este logro.

*Ana Mercedes Negrete Osuna*

## Tabla de contenido

Contenido	
Resumen .....	10
Abstract .....	11
1. Introducción .....	12
2. Planteamiento del problema.....	14
2.1 Descripción del área problemática .....	15
2.2 Pregunta de investigación.....	16
3. Justificación .....	17
4. Objetivos .....	19
4.1 Objetivo general .....	19
4.2 Objetivos específicos.....	19
5. Marco de referencia .....	20
5.1 Antecedentes .....	20
5.2 Marco contextual.....	22
5.3 Marco normativo y legal .....	26
5.4 Marco teórico .....	29
6. Aspectos metodológicos .....	33
1. Calcular los factores R (erosividad de la lluvia), K (erodabilidad del suelo), LS (topografía), C (cobertura vegetal) y P (prácticas de manejo) del modelo RUSLE, utilizando herramientas de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para las microcuencas de la zona norte de la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge La Mojana.....	34
2. Aplicación del modelo RUSLE y el índice NDVI. Se calculó el modelo RUSLE en el software ArcGIS Pro y el índice NDVI en el lenguaje de programación R, respectivamente. A continuación, se detalla el procedimiento realizado para cada uno. ....	49
7. Resultados y discusión.....	54

7.1	Calcular los factores R (erosividad de la lluvia), K (erodabilidad del suelo), LS (topografía), C (cobertura vegetal) y P (prácticas de manejo) del modelo RUSLE, utilizando herramientas de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para las microcuencas de la zona norte de la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge La Mojana. ....	54
7.2	Estimar la tasa de pérdida de suelo anual promedio en las microcuencas, integrando los mapas de factores previamente calculados. ....	64
7.3	Generar mapas temáticos de susceptibilidad a la erosión para la identificación de las zonas críticas con mayor pérdida de suelo, con el fin de proponer recomendaciones para la gestión y mitigación de la degradación en el área de estudio. ....	69
8.	Conclusiones .....	74
9.	Recomendaciones .....	77
9.	Referencias .....	79
	Anexos .....	88

**Lista de tablas**

Tabla 1. Porcentaje de participación municipal en el área de estudio	23
Tabla 2. Microcuencas área de estudio	25
Tabla 3. Referentes Normativos y Legales	27
Tabla 4. Rangos del Factor K a partir del Tipo de Roca	36
Tabla 5. Clasificación de la Erosividad de las Lluvias de acuerdo a Rivera y Gómez	43
Tabla 6. Clasificación del Factor C a partir de las Coberturas	44
Tabla 7. Clasificación del Factor P a partir del Grado de Pendiente	48
Tabla 8. Clasificación de la Erosión Hídrica Según FAO	52
Tabla 9. Interpretación de los Valores de NDVI	55
Tabla 10. Áreas, Porcentajes de las coberturas	63
Tabla 11. Área y Porcentaje de la Pérdida de Suelo para el Área de Estudio	68

**Lista de figuras**

Figura 1. Localización Área de Estudio	23
Figura 2. Microcuencas en el área de estudio	25
Figura 3. Representación gráfica de la implementación del factor LS en el software SIG ArcGIS Pro.	35
Figura 4. Representación gráfica de la implementación del factor K en el software SIG ArcGIS Pro	38
Figura 5. Localización de las 31 estaciones meteorológicas del IDEAM	40
Figura 6. Representación gráfica de la implementación del factor R en el software SIG ArcGIS Pro.	42
Figura 7. Representación gráfica de la implementación del factor C en el software SIG Pro	47
Figura 8. Representación gráfica de la implementación del factor P en el software SIG ArcGIS Pro	50
Figura 9. Representación gráfica de la implementación de la RUSLE en el software SIG ArcGIS Pro.	53
Figura 10. Proceso del NDVI en el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) RStudio	53
Figura 11. Representación gráfica de la implementación del NDVI en el lenguaje de programación R	55
Figura 12. Factor LS del Área de Estudio	58
Figura 13. Factor k del Área de Estudio	59
Figura 14. Localización de las 31 estaciones meteorológicas del IDEAM	60
Figura 15. Precipitación Mensual	60
Figura 16. Precipitación Anual	61
Figura 17. Factor R del Área de Estudio	62
Figura 18. Coberturas de la Tierra Área de Estudio	62
Figura 19. Factor C del Área de Estudio	65
Figura 20. Pendientes del Área de Estudio	66
Figura 21. Factor P del Área de Estudio	67

<i>ANÁLISIS ESPACIAL DE LA EROSIÓN DEL SUELO EN MICROCUENCAS DEL BAJO SAN JORGE....</i>	9
Figura 22. Modelo RUSLE para el Área de Estudio	68
Figura 23. RGB de las Imágenes Satelitales Procesadas	70
Figura 24. Índice NDVI en diciembre de 2018	70
Figura 25 Índice NDVI en marzo de 2019	71
Figura 26. Índice NDVI para marzo 2020, febrero de 2021, diciembre de 2022 y enero de 2023	72
Figura 27. Índices de Aridez de los Instrumentos de Planificación (POMCAS)	75

## Resumen

Esta tesis tiene como objetivo analizar la erosión del suelo en microcuencas de la zona norte del Bajo San Jorge-La Mojana, en los departamentos de Bolívar y Sucre (Colombia), utilizando el modelo RUSLE y el índice NDVI como herramientas principales. La metodología empleada fue de enfoque mixto, integrando datos cuantitativos y cualitativos. Se calcularon los factores de erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo, topografía, cobertura vegetal y prácticas de manejo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y procesamiento de imágenes satelitales en lenguaje de programación R. Posteriormente, se estimó la pérdida anual de suelo y se generaron mapas temáticos para identificar áreas críticas.

Los resultados evidencian que la mayor parte del área de estudio presenta erosión ligera, favorecida por pendientes suaves y coberturas de pastos, aunque existen sectores con erosión moderada a alta asociados a la pérdida de vegetación y actividades ganaderas. El análisis multitemporal del NDVI mostró una reducción progresiva de la cobertura vegetal desde 2019, lo que incrementa la vulnerabilidad del suelo, especialmente en zonas con déficit hídrico.

Como conclusión, la integración de RUSLE, NDVI y el índice de aridez permite identificar zonas prioritarias para la gestión y restauración, facilitando la toma de decisiones para la conservación del suelo. Se recomienda implementar estrategias de restauración ecológica, manejo adaptado a la taxonomía del suelo y sistemas de monitoreo continuo para mitigar la degradación y promover la sostenibilidad ambiental en la región.

*Palabras claves: Erosión, Índice de Aridez, Coberturas, NDVI, RUSLE, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Programación en R.*

### Abstract

This thesis aims to analyze soil erosion in micro-basins in the northern part of Bajo San Jorge-La Mojana, in the departments of Bolívar and Sucre (Colombia), using the RUSLE model and the NDVI index as the main tools. The methodology employed was a mixed approach, integrating quantitative and qualitative data. Rainfall erosivity factors, soil erodibility, topography, vegetation cover, and management practices were calculated using Geographic Information Systems (GIS) and satellite image processing in the R programming language. Subsequently, annual soil loss was estimated, and thematic maps were generated to identify critical areas.

The results show that most of the study area presents slight erosion, favored by gentle slopes and pasture cover, although there are sectors with moderate to high erosion associated with vegetation loss and livestock activities. The multitemporal analysis of NDVI revealed a progressive reduction in vegetation cover since 2019, which increases soil vulnerability, especially in areas with water deficit.

In conclusion, the integration of RUSLE, NDVI, and the aridity index allows the identification of priority areas for management and restoration, facilitating decision-making for soil conservation. It is recommended to implement ecological restoration strategies, management adapted to soil taxonomy, and continuous monitoring systems to mitigate degradation and promote environmental sustainability in the region.

**Keywords:** *Erosion, Aridity Index, Land Cover, NDVI, RUSLE, Geographic Information Systems (GIS), Programming in R.*

## **1. Introducción**

La erosión del suelo constituye una de las principales amenazas ambientales a escala mundial. Cada día se pierden grandes volúmenes de suelo debido a procesos naturales intensificados por actividades humanas poco sostenibles, como la agricultura intensiva, la deforestación, el sobrepastoreo y la transformación inadecuada del uso de la tierra. El suelo es un recurso limitado, y su pérdida o degradación no puede revertirse en los tiempos de una vida humana, lo que implica consecuencias irreversibles para la productividad y los ecosistemas (FAO, 2019).

Este fenómeno altera profundamente el funcionamiento natural de los sistemas ecológicos, ya que el arrastre de sedimentos hacia fuentes hídricas modifica la calidad del agua, incrementa la turbidez y afecta los hábitats acuáticos. De igual manera, la pérdida de nutrientes esenciales disminuye la productividad de los suelos, lo que repercute en la cobertura vegetal y, en consecuencia, en la fauna que depende de ella. Dichas alteraciones desencadenan un desequilibrio ecológico que limita la capacidad de los ecosistemas para proveer servicios ambientales fundamentales, como la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad y la captura de carbono. En este sentido, la erosión no solo representa un deterioro físico del suelo, sino que también compromete la resiliencia de los ecosistemas y la sostenibilidad de los territorios en el largo plazo. (FAO, 2019).

En el contexto colombiano, la degradación del suelo debido a la erosión sigue siendo una preocupación relevante: estudios recientes del IDEAM señalan que aproximadamente el 40 % del territorio nacional presenta algún grado de erosión, afectando tanto áreas continentales como insulares, con una proporción cercana a 45 millones de hectáreas. Esta cifra refleja una problemática persistente, especialmente asociada a prácticas agrícolas insostenibles, el uso inapropiado del suelo y los efectos del cambio climático

(IECA Iberoamérica, 2019)

Teniendo en cuenta lo anterior, la erosión del suelo es un proceso que actualmente pone en riesgo la seguridad alimentaria y la supervivencia de la raza humana en la tierra. En ese sentido, se requiere realizar investigaciones científicas que contribuyan a entender esta problemática y planteen soluciones para el manejo de la misma. Por ende, el presente trabajo investigativo está orientado en analizar la erosión del suelo en las microcuencas de la zona norte Bajo San Jorge La

Mojana, por medio del uso del modelo RUSLE y su relación con el índice NDVI, para la identificación de las áreas más susceptibles a la degradación, mediante el uso de las tecnologías de la información geográfica y el lenguaje de programación R.

## **2. Planteamiento del problema**

El suelo es un recurso imprescindible para la vida y las sociedades humanas: sustenta la producción de alimentos, facilita el acceso al agua y regula funciones ecológicas esenciales. A lo largo del tiempo, su disponibilidad ha permitido el desarrollo de prácticas agrícolas que transformaron comunidades móviles en asentamientos estables. No obstante, estos valiosos beneficios están amenazados por la degradación acelerada del suelo, que perturba su estructura, fertilidad y capacidad funcional (IECA Iberoamérica, 2022).

La erosión del suelo es un proceso natural que implica la pérdida de la capa superficial del suelo (ya sea por acción del agua, el viento u otros agentes). Sin embargo, cuando a este fenómeno se suman prácticas humanas inadecuadas, como el uso insostenible del suelo y la inadecuada planificación territorial, la erosión se transforma en degradación acelerada, intensificándose y provocando una mayor pérdida de suelo fértil (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2025)

El principal tipo de erosión a nivel global es la erosión hídrica, un proceso físico de desprendimiento y transporte de partículas del suelo provocado por la energía cinética del impacto de la lluvia y la escorrentía superficial (Alvarado Cardona et al., 2007). La susceptibilidad del suelo a este fenómeno no es homogénea y está determinada por sus propiedades intrínsecas, definidas por su clasificación taxonómica. Suelos de órdenes como Entisoles e Inceptisoles, comúnmente de texturas finas y estructura débil, o Ultisoles y Oxisoles altamente meteorizados de regiones tropicales, son particularmente vulnerables debido a su baja actividad arcillosa y capacidad agregadora. Por el contrario, suelos como los Vertisoles, con alto contenido de arcillas expansivas, o Molisoles, con su horizonte superficial oscuro y estable, presentan una mayor resistencia. Se estima que, como consecuencia de esta dinámica, aproximadamente el 80% de las tierras con potencial agrario a nivel global se encuentran afectadas en algún grado por este fenómeno (Alvarado Cardona et al., 2007).

## **2.1 Descripción del área problemática**

De acuerdo con el Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia (IDEAM & MADS, 2015), la zona de estudio, ubicada en los departamentos de Bolívar y Sucre dentro de la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge – La Mojana, presenta una situación crítica frente a este fenómeno. El estudio identifica que los procesos de erosión hídrica son predominantes en la región, manifestándose principalmente a través de arrastres laminares y en surcos, asociados directamente a prácticas agropecuarias no sostenibles, la deforestación y las características físico-químicas de los suelos. Como consecuencia, esta área registra uno de los índices de degradación más altos del país, con extensiones significativas de suelo clasificadas en categorías de afectación moderada a severa, lo que compromete gravemente su productividad agropecuaria, la biodiversidad y la prestación de servicios ecosistémicos vitales para las comunidades locales.

En cuanto a la magnitud y severidad de la erosión en estos departamentos, el estudio revela diferencias significativas. En el departamento de Bolívar, el 46,6% de los suelos presenta algún grado de erosión, con un 2,6% en estado severo. A nivel nacional, este departamento ocupa el puesto 20 en magnitud y el 18 en severidad por erosión. Se identifican importantes focos de erosión al norte, en municipios como Clemencia, El Guamo, Turbaco, Calamar, Santa Catalina y Villanueva. La problemática también impacta áreas de especial importancia ambiental y productiva: afecta más del 20% de las zonas de protección legal, más del 30% de las áreas prioritarias para conservación y el 60% de los suelos con clases agrológicas II, IV (con vocación agrícola). En las zonas de vocación productiva, la degradación afecta a más del 60% del área agrícola y forestal, y cerca del 30% de las áreas ganaderas. Además, en las zonas de mayor densidad poblacional, la erosión alcanza el 60%, mientras que en las reservas campesinas —que representan el 1,61% del departamento la afectación supera el 50% (IDEAM & MADS, 2015).

Por su parte, el departamento de Sucre presenta una situación aún más crítica. El 75,1% de sus suelos está afectado por algún grado de erosión, con un 7,6% en estado severo, lo que lo posiciona en el noveno lugar a nivel nacional en magnitud y en el quinto en severidad. Los focos de erosión se distribuyen ampliamente en su territorio: hacia el sur en el municipio de Majagual; en la zona central en El Roble, Galeras, Sampués, Corozal, Sincé, San Juan de Betulia y San Pedro; y al noroccidente, en Sincelejo, San Onofre, Tolúviejo y Morroa. La erosión impacta el 40% de las áreas prioritarias para conservación. En las zonas productivas, la afectación llega al 60% en áreas

ganaderas, al 80% en áreas agrícolas y forestales, y alcanza un alarmante 95% en sistemas agrosilvopastoriles. En las áreas con mayor densidad de población, la erosión supera el 90%. Cabe destacar que, aunque las reservas indígenas representan solo el 0,3% del territorio departamental, la totalidad de su extensión se encuentra afectada por esta problemática (IDEAM & MADS, 2015).

Estos datos evidencian la magnitud y gravedad de la degradación del suelo en la región de estudio, con implicaciones profundas para la sostenibilidad ambiental, la seguridad alimentaria y el desarrollo socioeconómico local.

## **2.2 Pregunta de investigación**

¿Cómo se distribuye la erosión del suelo en las microcuencas del Bajo San Jorge La Mojana, y cuál es la relación entre la tasa de pérdida de suelo estimada mediante la RUSLE y el índice NDVI para identificar las áreas más susceptibles a la degradación?

### 3. Justificación

La evaluación del riesgo de erosión en la zona norte de la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge – La Mojana constituye una herramienta fundamental para cuantificar el deterioro acelerado del suelo causado por la interacción de factores naturales y antrópicos. Esta evaluación reviste especial importancia dado que la degradación del suelo representa una amenaza crítica para la seguridad alimentaria, la estabilidad de los ecosistemas y el desarrollo socioeconómico regional (Borrelli et al., 2020). En Colombia, se estima que aproximadamente el 40% del territorio nacional presenta algún grado de degradación por erosión, siendo esta zona particularmente vulnerable debido a sus condiciones agroclimáticas y prácticas de uso del suelo (IDEAM & MADS, 2015).

La implementación de esta investigación es crucial para llenar vacíos de información específicos a escala local, permitiendo la identificación precisa de áreas prioritarias de intervención. Como señalan Poesen (2018) y Alewell et al. (2019), la cuantificación espacialmente explícita de las tasas de erosión es un requisito previo indispensable para el diseño efectivo de políticas de conservación y la optimización de recursos limitados en programas de restauración.

La selección de las herramientas metodológicas se sustenta en su complementariedad y robustez técnica. El modelo Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) ha demostrado ser efectivo para la evaluación de erosión hídrica en diversas regiones tropicales, gracias a su capacidad para integrar factores climáticos, edáficos, topográficos y antrópicos (Abdo & Salloum, 2021). Su implementación mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos espaciales heterogéneos (coberturas de la tierra, geología, pendientes y propiedades del suelo), facilitando el mapeo de riesgo a alta resolución espacial (Pourghasemi et al., 2020). La integración con el entorno de programación R añade capacidades analíticas avanzadas, permitiendo la automatización de procesos, el análisis estadístico robusto y la aplicación de técnicas de machine learning para la validación y refinamiento de los resultados (Hijmans, 2022; Wang et al., 2022).

El conocimiento generado sobre la distribución espacial y magnitud de la erosión proporciona insumos científicos vitales para la planificación territorial, el ordenamiento de cuencas hidrográficas y el diseño de prácticas agrícolas sostenibles. Como destacan Jiang et al. (2021), la información derivada de este tipo de modelos es esencial para la toma de decisiones informadas que busquen equilibrar la producción agropecuaria con la conservación de los recursos naturales.

En consecuencia, este estudio no solo busca cuantificar la pérdida de suelo en la región, sino también demostrar la aplicabilidad de una metodología replicable y escalable que pueda ser implementada en otras regiones del país con problemáticas similares, contribuyendo así a la generación de estrategias efectivas para la mitigación de la degradación del suelo en Colombia.

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

Analizar la erosión del suelo en las microcuencas de la zona norte de la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge La Mojana, por medio del uso del modelo RUSLE y su relación con el índice NDVI, para la identificación de las áreas más susceptibles a la degradación.

### **4.2 Objetivos específicos**

Calcular los factores R (erosividad de la lluvia), K (erodabilidad del suelo), LS (topografía), C (cobertura vegetal) y P (prácticas de manejo) del modelo RUSLE, utilizando herramientas de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para las microcuencas de la zona norte de la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge La Mojana.

Estimar la tasa de pérdida de suelo anual promedio en las microcuencas, integrando los mapas de factores previamente calculados.

Generar mapas temáticos de susceptibilidad a la erosión para la identificación de las zonas críticas con mayor pérdida de suelo, con el fin de proponer recomendaciones para la gestión y mitigación de la degradación en el área de estudio.

## 5. Marco de referencia

### 5.1 Antecedentes

Para el desarrollo de la presente investigación es apropiado examinar las investigaciones precedentes de los distintos autores en el mundo que han trabajado (global, regional y local) la pérdida del suelo mediante la aplicación de la RUSLE con los sistemas de información geográfica (SIG) y el lenguaje de programación R.

Uno de los principales problemas que presenta el mundo es la erosión del suelo, propiciando la pérdida de nutrientes, de materia orgánica y en general de la capa superficial del suelo (Borrelli et al., 2021), afectando significativamente la productividad agrícola y la calidad del agua (Wang et al., 2023). El modelo RUSLE, es uno de los modelos más utilizados para la estimación de la erosión (Cerretelli et al., 2023; Medjani et al., 2023; Patriche, 2023; Räsänen et al., 2023), el cual considera 5 factores para su cálculo, tales como (R, K, LS, C y P); la erosividad de la lluvia (R), la erodabilidad del suelo (K), la longitud y pendiente de la ladera (LS), la cobertura vegetal (C) y las prácticas de manejo (P), es decir, estos son los factores que constituyen la ecuación universal de pérdida de suelo (RUSLE) (Nepal et al., 2021; Wang et al., 2022). Esta ecuación se ha usado en diferentes lugares del mundo para la estimación de la pérdida de la erosión, siendo algunos de estos Etiopía (Getu et al., 2022; Sinshaw et al., 2021; Taye et al., 2023), India (George K et al., 2021; Saha et al., 2022), Bangladesh (Chowdhury, 2023), centroamérica (Cerretelli et al., 2023), Colombia (Muñoz et al., 2022), entre otros.

En una región montañosa de Etiopía con intensa actividad agrícola, han encontrado altas tasas de erosión asociadas a pendientes pronunciadas y baja cobertura vegetal (Getu et al., 2022) estimaron una tasa media de erosión de 32.84 t/ha/año (toneladas de suelo pérdidas por hectárea al año) en la cuenca Megech ubicada en la región de Amhara. Identificaron que el 82% de la cuenca tenía niveles de riesgo alto a extremadamente severo, requiriendo medidas urgentes de manejo. Asimismo, (Taye et al., 2023) reportaron un incremento en la tasa de erosión, atribuido a la deforestación y expansión de tierras agrícolas. Por otro lado, en India, otro país con zonas montañosas y agricultura intensiva, estimaron la tasa media de erosión de 27.45 t/ha/año, siendo las pendientes empinadas las más afectadas (George K et al., 2021). En el distrito Ratlam de India

central, el 20.34% del área tuvo niveles de erosión muy severos superiores a 40 t/ha/año (Saha et al., 2022).

En otros países como Siria, han utilizado diferentes modelos a la RUSLE para la estimación de la erosión, pero no han obtenido muy buenos resultados en estos análisis, debido a que no proporciona datos congruentes con la estimación de la erosión (Mohammed et al., 2021). No obstante, el modelo RUSLE, como variación del USLE, ha aportado información relevante para la estimación de la carga de sedimentos en el desierto de Sinaí (Helmi, 2023); asimismo, en investigaciones realizadas en china para estimar la erosión del suelo (Rong et al., 2022), se evidenció que factores específicos de la RUSLE (Pendiente, elevaciones, socioeconómicos, etc.) presentan importancias determinantes que permiten discernir a partir de las escalas (regional o local), a cuál de estas se ajustan más. Es decir, hay factores como los naturales que presentan mayor importancia a nivel regional, en cambio a nivel local cuentan con mayor significancia los factores socioeconómicos (Zhang et al., 2023).

La pérdida de la capa superficial del suelo se debe a muchas actividades que están en el diario vivir de las personas. Estas generan incrementos en la erosión mediante actividades socioeconómicas, como los cambios de los usos del suelo por tierras agrícolas (Liu et al., 2023). No obstante, las buenas prácticas de conservación, como la rotación de cultivos o de potreros, el aumento de coberturas boscosas, entre otras, favorecen la reducción significativamente de pérdida de suelo (Liu et al., 2021), como es el caso de los cafetales en Centroamérica en los cuales realizando aumentos de cobertura vegetal y mejorando las prácticas de conservación, podría reducir la erosión entre 17-40% (Cerretelli et al., 2023).

Además de la RUSLE, se encuentran muchos otros modelos para la estimación de la erosión del suelo; tales como, SWAT, ANNAGNPS, MUSLE (MUSLE se enfoca en erosión por escorrentía; SWAT y AnnAGNPS estima más factores de hidrología y contaminantes, yendo mucho más allá del cálculo simple de pérdida de suelo), entre otros (Lamane et al., 2022). De estos, el modelo ANNAGNPS en Tailandia, proporcionó ajustes favorables con datos de campo para la estimación de la escorrentía y las cargas de sedimentos (Jirasirichote et al., 2021). Sin embargo, hay que tener en cuenta que los modelos presentan algunas incertidumbres en las predicciones asociadas principalmente a la falta de datos (Yang et al., 2023), así como a las extensiones espaciales (Meinen & Robinson, 2021). Esto quiere decir que son necesarios más investigaciones

referentes a la efectividad de los modelos de erosión que consideren la disponibilidad de datos para su calibración (Pandey et al., 2021).

La teledetección puede ser una alternativa para mejorar los análisis de degradación y erosión de suelos (Masroor et al., 2022). Los índices espectrales siguen siendo herramientas clave en sensado remoto para estimar propiedades del suelo, como materia orgánica, textura o humedad. Gracias al uso estratégico de estas transformaciones de bandas, se ha logrado una mejora notable en la precisión de los modelos predictivos. Por ejemplo (Peng, y otros, 2024) demuestran que al aplicar índices espectrales optimizados en combinación con aprendizaje automático, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para la predicción de carbono orgánico del suelo aumentó de 0,94 a 0,97, y para nitrógeno total de 0,57 a 0,78. Los sensores remotos son muy utilizados para la evaluación de la erosión (Abbondanza, 2019; Cevallos Alvarado, 2020; Meléndez et al., 2020; Molina Luna, 2019; Moreira et al., 2020; Sánchez, 2021); como es el caso de Colombia que, al presentar graves problemas de erosión del suelo, hace uso de técnicas de teledetección y de la estimación de la erosión por medio del modelo RUSLE. Estas son herramientas importantes en el estudio y la gestión de la erosión y la degradación del suelo en el país (Muñoz et al., 2022), ya que así se han realizado estudios en diferentes lugares del país; tales como, Bogotá (Salgado & Porras, 2021), Quindío (Castro Quintero et al., 2017), Atlántico (Avila & Avila, 2015), Valle del Cauca (Calero et al., 2021; Martínez et al., 2023).

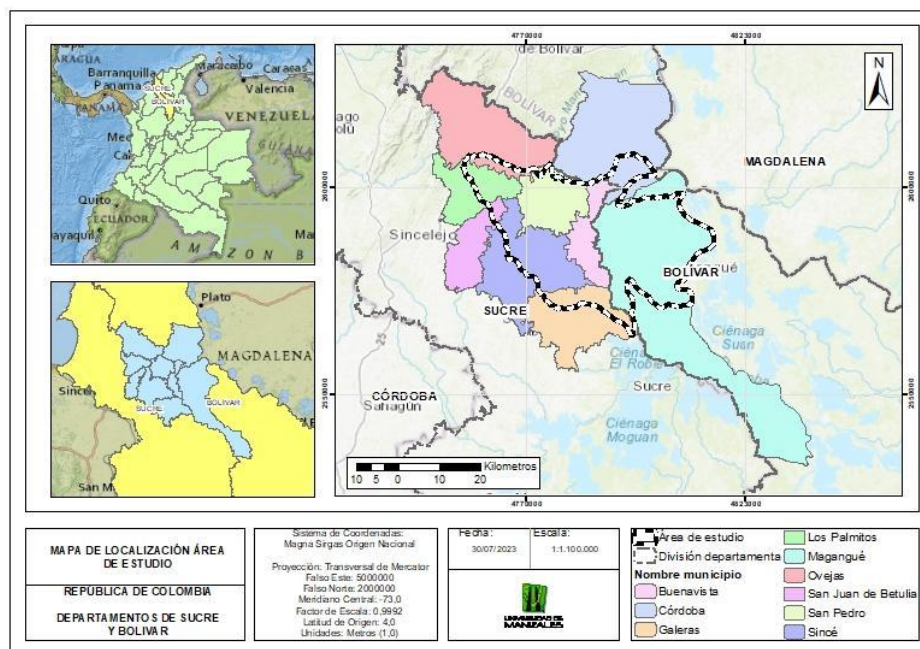
Para finalizar, la erosión del suelo sigue siendo un grave problema ambiental prioritario a nivel global, que requiere más investigación para su adecuada predicción y mitigación. Aunque existen varios métodos de estimación de la erosión, la RUSLE es la más usada actualmente y de la mano de los sensores remotos y técnicas de aprendizaje automático (Golkarian et al., 2023; Saikh & Mondal, 2023; TENG et al., 2019) se posicionan como herramientas prometedoras para mejorar los cálculos y representaciones de la erosión del suelo.

## **5.2 Marco contextual**

La ubicación del problema de investigación se centra en dos departamentos de Colombia, que hacen parte de la región del Caribe, estos son los departamentos de Bolívar y Sucre. Bolívar limita al norte con el mar Caribe, al este con el departamento de Sucre, al sur con el departamento de Córdoba, y al oeste con el departamento de Atlántico y el Canal del Dique que lo separa del

departamento de Magdalena y su capital es Cartagena de Indias. Adicionalmente, Sucre también se encuentra en la región Caribe de Colombia y limita al norte con el mar Caribe, al este con el departamento de Bolívar, al sur con el departamento de Córdoba, y al oeste con el departamento de Bolívar y el Golfo de Morrosquillo, y su capital es Sincelejo. A continuación, se puede observar la ubicación geográfica del área de estudio en relación con límites departamentales y municipales.

Figura 1. Localización Área de Estudio



El área de estudio alberga la jurisdicción de 9 municipios, que se listan a continuación con su porcentaje de participación.

Tabla 1. Porcentaje de participación municipal en el área de estudio

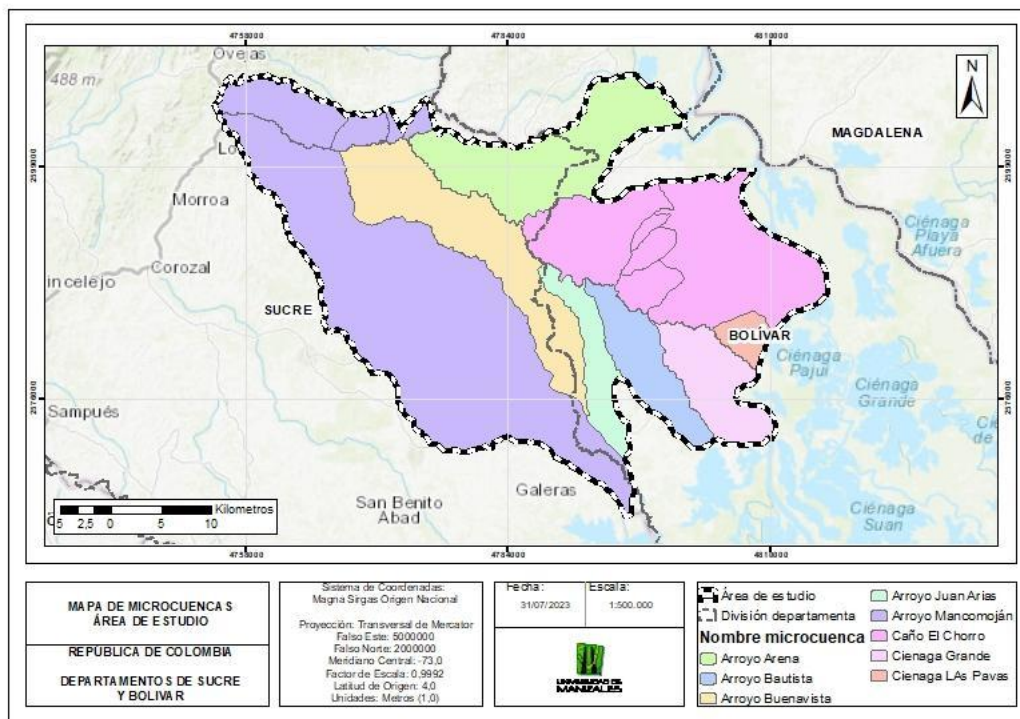
Departamento	Municipio	Área total del municipio (ha)	Participación del municipio en el área de estudio (ha)	Participación porcentual del municipio en el área de estudio (%)
Bolívar	Córdoba	59686,56	6945,85	11,64
Bolívar	Magangué	112998,75	55075,43	48,74

Departamento	Municipio	Área total del municipio (ha)	Participación del municipio en el área de estudio (ha)	Participación porcentual del municipio en el área de estudio (%)
Sucre	Los palmitos	19876,45	8237,35	41,44
Sucre	Ovejas	45979,99	3616,57	7,87
Sucre	Sincé	41871,91	23532,50	56,20
Sucre	San Juan de Betulia (betulia)	16802,63	1674,02	9,96
Sucre	Buenavista	14640,00	14590,19	99,66
Sucre	San pedro	21280,26	19959,22	93,79
Sucre	Galeras	32163,59	9084,05	28,24

Según lo anterior, los municipios que cuentan con un mayor porcentaje de participación son Buenavista y San Pedro del Departamento de Sucre, y con un menor porcentaje de participación el municipio de Ovejas, también del departamento de Sucre.

Ahora bien, el área de estudio se encuentra localizada en dos cuencas hidrográficas (Mojana Río Cauca y Río Bajo San Jorge), ambas tienen Plan de Ordenación y Manejos de Cuencas Hidrográficas POMCA formulados por las corporaciones autónomas regionales de la zona. En este contexto, el área objeto de estudio, se encuentra en 9 microcuencas que pueden ser visualizadas a continuación:

Figura 2. Microcuencas en el área de estudio



El área de participación que tienen las microcuencas se detalla a continuación:

Tabla 2. Microcuencas área de estudio

Cuenca	Microcuenca	Área (ha)
LA MOJANA - RÍO CAUCA	Arroyo Arena	16423,04
	Arroyo Mancomoján	7796,12
	Caño El Chorro	29870,51
	Ciénaga Grande	7740,63
	Ciénaga Las Pavas	1978,77
	<b>Total</b>	<b>63809,08</b>

Cuenca	Microcuenca	Área (ha)
<b>RIO BAJO SAN JORGE</b>	Arroyo Bautista	7131,16
	Arroyo Buenavista	17297,82
	Arroyo Juan Arias	5302,84
	Arroyo Mancomoján	49174,29
	Total	<b>78906,10</b>
<b>Total</b>		<b>142715,18</b>

La microcuenca Arroyo Mancomoján se encuentra presente en las dos cuencas, pero tiene una mayor participación de área en la cuenca del Rio Bajo San Jorge. Cabe resaltar que, para esta investigación, la selección y definición del área de estudio parte de criterios fundamentales para el desarrollo de la misma, cómo, por ejemplo, disponibilidad del POMCA, delimitar el área de estudio estratégicamente en dos cuencas diferentes para contrastar información de diferente instrumento de planificación y finalmente, se realiza acotación de área de estudio a partir de microcuencas como una alternativa practica para el desarrollo de esta investigación.

### 5.3 Marco normativo y legal

El impacto de la erosión ha afectado en múltiples escenarios, como la reducción de la producción agrícola, la pérdida de hábitats naturales, la degradación de los ecosistemas y la afectación de comunidades locales que dependen de la tierra para su subsistencia.

Debido a lo anterior, el gobierno colombiano ha promulgado leyes y regulaciones para abordar el problema de la erosión, para minimizar y mitigar los posibles impactos ambientales que trae la manifestación del problema de investigación. A continuación, se enuncian las leyes, decretos y resoluciones que en marcan el desarrollo del trabajo investigativo:

Tabla 3. Referentes Normativos y Legales

<b>Norma / Política</b>	<b>Año</b>	<b>Alcance principal</b>	<b>Relación con la erosión del suelo y RUSLE/TIG</b>
<b>Decreto Ley 2811 – Código de Recursos Naturales</b>	1974	Regula conservación, uso y protección de recursos naturales renovables.	Incluye el suelo como recurso estratégico y ordena prevenir procesos de degradación (erosión).
<b>Constitución Política, Art. 79-80</b>	1991	Derecho a un ambiente sano y deber del Estado de planificar el uso sostenible de los recursos naturales.	Fundamenta la obligación de prevenir la erosión y promover el manejo sostenible del suelo.
<b>Ley 99 – Creación del MinAmbiente y SINA</b>	1993	Crea el Ministerio de Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental.	Reconoce al suelo como recurso estratégico e impulsa la gestión ambiental descentralizada.
<b>Ley 373 – Uso eficiente y ahorro del agua</b>	1997	Establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.	Relaciona la gestión del recurso hídrico con la conservación del suelo en cuencas, lo que contribuye a reducir la erosión y fortalecer la planificación con modelos como RUSLE y TIG.
<b>Ley 461 – Convención de Lucha contra la Desertificación (UNCCD)</b>	1998	Adopta compromisos internacionales contra desertificación y degradación del suelo.	Vincula al país a programas de control y monitoreo de erosión y pérdida de tierras.
<b>Decreto 291 – Reestructuración IDEAM</b>	2004	Reorganiza el IDEAM y fortalece la generación de información ambiental.	IDEAM produce información base para la modelación de erosión con TIG y RUSLE.
<b>Resolución 284 – IDEAM (Grupo de Suelos y Tierras)</b>	2006	Crea el Grupo de Suelos y Tierras en el IDEAM.	Define la entidad técnica encargada de metodologías y estudios de erosión y degradación de suelos.
<b>Decreto 3851 – Infraestructura Colombiana de Datos</b>	2006	Establece el sistema oficial de información geoespacial estandarizada.	Favorece la disponibilidad de cartografía e insumos para análisis con TIG y RUSLE.

Norma / Política	Año	Alcance principal	Relación con la erosión del suelo y RUSLE/TIG
<b>Decreto 1640 – ordenación de Cuencas Hidrográficas (POMCA)</b>	2012	Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones	Reglamenta parcialmente la Ley 99 de 1993 y la Ley 2811 de 1974 en lo relacionado con la planificación, ordenación, manejo y seguimiento de las cuencas hidrográficas. Define instrumentos como los <b>Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA)</b> , que son fundamentales para la gestión integral del recurso hídrico y del suelo.
<b>Agenda 2030 – ODS 15.3</b>	2015 (adoptada en Colombia)	Objetivo de detener desertificación y rehabilitar tierras degradadas.	Marco global que orienta estudios de erosión como aporte al desarrollo sostenible.
<b>Política Nacional para la Gestión Sostenible del Suelo</b>	2016	Estrategia integral para prevenir y mitigar la degradación del suelo.	Línea estratégica sobre monitoreo de suelos fortalece estudios de erosión y uso de TIG.
<b>FAO – Directrices voluntarias de suelos</b>	2017	Lineamientos técnicos para la gestión sostenible del suelo.	Proveen estándares internacionales aplicables en estudios con RUSLE y TIG.
<b>Decreto 50 – Ordenamiento hídrico y vertimientos al suelo</b>	2018	Regula el recurso hídrico y vertimientos al suelo.	Reconoce la interacción agua-suelo en microcuencas, clave para modelar erosión con RUSLE.
<b>Resolución 471 - IGAC (MAGNA-SIRGAS Origen Nacional)</b>	2020	Reglamenta el uso oficial del MAGNA-SIRGAS Origen Nacional como marco geocéntrico de referencia en Colombia.	Garantiza que los insumos cartográficos y geoespaciales usados en estudios de erosión con TIG (como RUSLE) estén estandarizados y alineados con la cartografía oficial del país.

#### 5.4 Marco teórico

Actualmente, la ciencia del suelo ha evolucionado para estudiar este recurso natural como un componente fundamental y no renovable para el sustento de la vida en la tierra. Existen diferentes definiciones para este recurso según el área del conocimiento que la estudie, por ejemplo; pedología, edafología, geología, agronomía, ciencias ambientales, entre otras. Para fines del presente estudio, analizamos el suelo desde una perspectiva ambiental, es decir, de la relación sociedad – naturaleza, que ha permitido que el hombre interactúe con su medio y lo transforme, de acuerdo con su modelo de desarrollo. En ese orden de ideas, el suelo es aquella delgada capa, de pocos centímetros hasta algunos metros de espesor, de material terroso, no consolidado, que se forma en la interfase atmósfera – biosfera – litosfera. En ella interactúan elementos de la atmósfera e hidrosfera (aire, agua, temperatura, viento, etc.), de la litosfera (rocas, sedimentos) y de la biosfera y se realizan intercambios de materiales y energía entre lo inerte y lo vivo, produciéndose una enorme complejidad. (Daniel Francisco Jaramillo Jaramilo, 2002)

En ese sentido, el suelo por su composición y estructura es considerado un recurso indispensable para el desarrollo de las actividades humanas. Debido a que este recurso se materializan las actividades productivas, económicas, sociales y culturales, convirtiéndose en uno de los principales elementos que hace posible la vida en la tierra. Además, el suelo es uno de los factores importantes en el paisaje, es la capa más fértil de la Tierra y se estima como uno de los elementos principales para el desarrollo de la agricultura. Sin embargo, con el paso de los años, los cambios en las condiciones ambientales y el acelerado crecimiento económico, ha ocasionado que por factores naturales como antropogénico, se incrementen los procesos de erosión del suelo.

La erosión hídrica, causada por la acción de la lluvia que desprende y arrastra partículas del suelo, es la forma más prevalente de degradación del suelo a nivel global. Se estima que esta erosión puede provocar pérdidas de hasta un 10 % en el rendimiento de los cultivos para el año 2050, lo que subraya su potencial impacto en la seguridad alimentaria futura (UNDRR, 2021).

En Colombia, el 40 % del territorio continental muestra algún grado de erosión, lo que equivale a aproximadamente 45,38 millones de hectáreas. De esa extensión, alrededor del 20 % presenta erosión ligera, el 17 % erosión moderada, y cerca del 3 % erosión severa o muy severa. Este fenómeno es particularmente crítico porque, en las áreas con erosión moderada, el suelo ya ha perdido parte de su capa superficial, donde se concentra la actividad agrícola más intensa y la

mayor parte de materia orgánica, lo que compromete la estabilidad ecológica del recurso (IGAC & MADS, 2025) . Lo que significa que no somos ajenos a esta problemática y, por ende, se deben realizar investigaciones científicas que contribuyan a ampliar el conocimiento sobre la misma y plantear medidas para su control y mitigación.

La erosión del suelo es un proceso natural en el que intervienen factores bióticos (plantas y animales) y factores abióticos (agua, viento, temperatura, entre otros), que ocasiona a corto y largo plazo la paulatina degradación del suelo. Según la FAO (2020) la erosión del suelo es un proceso natural que ocurre bajo todas las condiciones climáticas y en todos los continentes, provocado por agentes como el agua, el viento y el arado. No obstante, este fenómeno se intensifica de manera debido a prácticas humanas insostenibles como la agricultura intensiva, la deforestación, el sobrepastoreo y los cambios inadecuados en el uso del suelo. Para (Borrelli, y otros, 2020) la erosión puede manifestarse a lo largo de millones de años, alterando la morfología superficial del terreno y transformando formaciones rocosas sedimentarias mediante procesos continuos de desgaste y transporte de material.

Teniendo en cuenta lo anterior, la erosión es causada por diferentes factores, los cuales se clasifican de acuerdo con el elemento que la genera. Los tipos de erosión ampliamente conocidos en el mundo se clasifican en hídrica y eólica.

Según (Borrelli, y otros, 2020) la erosión hídrica se produce como resultado de la interacción de múltiples variables: la precipitación, la cobertura vegetal, la topografía y las propiedades del suelo, actúan de forma conjunta para desencadenar el proceso de arrastre y desplazamiento del suelo. Estos factores trabajan conjuntamente para desplazar partículas de suelo y transportar sustancias químicas, materia orgánica y nutrientes hacia las partes más bajas de las laderas. Para (Zulaica et al., 2020), la erosión hídrica ocurre principalmente cuando el flujo superficial transporta partículas del suelo desprendidas por el impacto de las gotas de lluvia o la escorrentía superficial.

Es importante mencionar que, que la erosión hídrica es una de las principales causas de pérdida de suelo en el mundo, debido a que amenaza la producción agrícola y con ello se pone en riesgo la seguridad alimentaria. (Adicionalmente, la erosión hídrica afecta negativamente la calidad de las fuentes hídricas superficiales; al incorporar elementos contaminantes al agua y el aumento paulatino en los niveles de turbiedad. Por ende, se altera el régimen hidrológico, generando riesgo a desbordamientos de fuentes hídricas debido a los cambios en los patrones morfológicos.

La erosión eólica, es causada por el efecto de las corrientes de aire que elevan y trasladan las pequeñas partículas del suelo, luego de ese transporte se van produciendo acumulaciones que son denominadas dunas, médanos y torbellinos principalmente formadas por polvo.(Cordero Rebolledo Helmer, 2022). De acuerdo con la (FAO, 2021), la erosión eólica ocurre principalmente en suelos con escasa cobertura vegetal, bajos niveles de humedad y pérdida de estructura, condiciones que facilitan el desprendimiento y transporte de partículas por acción del viento.

La erosión eólica no solo afecta la calidad de los suelos, en sus componentes físico y químico. Adicionalmente, su aporte de partículas al aire contribuye a la contaminación atmosférica. Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2022), la exposición a partículas en suspensión ( $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$ ) incrementa los niveles de polución ambiental y está asociada con un mayor riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares (OPS, 2022). Adicionalmente, investigaciones recientes realizadas con mediciones en campo en diferentes ambientes demuestran que este tipo de erosión genera alteraciones negativas en nutrientes del suelo como el carbono orgánico (CO), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT), debido al efecto que tiene el viento como agente que causa remoción, transporte y depósito de partículas a la atmósfera. (Juan Cruz Colazo & Daniel Eduardo Buschiazzi, 2022).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es uno de los modelos más utilizados en el mundo para estimar las pérdidas de suelo ocasionadas por erosión hídrica. Fue desarrollada en Estados Unidos a partir de extensos datos experimentales y se basa en la interacción de seis factores principales: la erosividad de la lluvia (R), la erodabilidad del suelo (K), la longitud y pendiente del terreno (L y S), el uso y cobertura del suelo (C) y las prácticas de conservación (P).

Su principal fortaleza radica en su simplicidad y aplicabilidad en diferentes contextos, lo que la convierte en una herramienta fundamental para la planificación territorial y la conservación de suelos. Actualmente, la versión revisada RUSLE integra avances metodológicos y tecnologías geoespaciales, lo que permite estimaciones más precisas y adaptadas a condiciones locales. De esta manera, la USLE y sus derivados se mantienen como referentes científicos y técnicos en la gestión sostenible del recurso suelo (Baye Terefe, y otros, 2025)

Sin embargo, a partir de la ecuación USLE se creó la ecuación RUSLE es una versión revisada y mejorada que incluye factores adicionales y ajustes para una mayor precisión en la estimación del suelo. La metodología RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) es una versión revisada de la Universal Soil Loss Equation (USLE), que es un modelo ampliamente

utilizado para estimar la erosión del suelo. En ese sentido, la RUSLE fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-NRCS) y ha sido utilizado en todo el mundo para evaluar el potencial de erosión del suelo y diseñar medidas de conservación.

Para fines del presente trabajo investigativo se implementará el modelo RUSLE, debido a que es un método integrador ampliamente utilizado en el mundo y validado por diferentes estudios científicos. Adicionalmente, es un modelo que permite la adaptación a condiciones de suelos tropicales, al igual que la integración de factores geológicos e hidrológicos con el medio físico-biótico que lo rodea. La RUSLE permite predecir y evaluar el riesgo de erosión del suelo mediante la integración de factores biótico y abióticos, que contribuyen a determinar las áreas vulnerables a la erosión del suelo, en los procesos de planificación del uso de la tierra y en la implementación de prácticas de conservación del suelo.

## 6. Aspectos metodológicos

El presente trabajo investigativo adoptó un enfoque metodológico mixto, integrando datos cualitativos y cuantitativos, con una orientación metodológica analítica. En este contexto, se realizó un análisis integrador que involucró; la RUSLE, el NDVI y los índices de aridez calculados por los Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS). Primero, se determinaron cuantitativamente los factores del modelo de la ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE), que son: factores R (erosividad de la lluvia), K (erodibilidad del suelo), LS (topografía), C (cobertura vegetal) y P (prácticas de manejo). Segundo, estimación del modelo RUSLE y el índice NDVI en R y SIG, es decir, se aplicó el modelo RUSLE en software SIG y el índice NDVI en R para la identificación de las zonas de las microcuencas más afectadas por los procesos de erosión. Por último, se llevó a cabo un análisis cualitativo del modelo RUSLE respecto al índice NDVI calculado en R y al índice de aridez en las microcuencas de la zona norte de la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge – La Mojana realizados en los instrumentos de planificación (POMCAS).

De acuerdo con lo anterior, el diseño de investigación es no experimental, específicamente de tipo transaccional correlacional-causal, lo cual implicó observar el fenómeno tal como se presenta en su contexto natural, sin intervenir ni manipular variables. Este estudio se basa en hechos ya ocurridos y se centra en la descripción y análisis de relaciones entre variables existentes. Su utilidad radica en la posibilidad de interpretar el comportamiento del objeto de estudio de forma global, a partir de categorías, conceptos o sucesos presentes en el entorno.

En cuanto al muestreo, se implementó un enfoque no probabilístico que permitió seleccionar específicamente las unidades de estudio más relevantes o representativas para nuestro análisis. Se tuvo en cuenta su importancia en el contexto de la investigación y los aspectos clave que permitieron obtener una visión integral de las condiciones ambientales que intervienen en los procesos erosivos.

Es importante resaltar que, este trabajo de grado se enmarca en la escala 1:25.000, debido a que, los datos fuente utilizados son semidetallados debido al tipo de estudio realizado. La elección de esta escala se justifica técnicamente al estar alineada con los estándares del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y las prácticas establecidas para los estudios de ordenamiento territorial y ambiental en Colombia. La escala 1:25.000, categorizada como semidetallada, es óptima para estudios a nivel de microcuencas, ya que proporciona el nivel de detalle necesario para modelar

procesos erosivos mediante la RUSLE, capturando la variabilidad fisiográfica requerida para factores críticos como la topografía (LS), sin incurrir en la complejidad de manejar datos ultra-detallados para un área extensa. Esta escala garantiza la compatibilidad con la información oficial semidetallada (como modelos digitales de elevación, suelos y coberturas de la tierra) disponible por parte del IGAC y otras entidades ambientales, y asegura que los resultados sean directamente homologables y aplicables a los instrumentos de planificación (POMCAS), según lo establecido en guías técnicas y marcos normativos como el Decreto 1076 de 2015. Por lo tanto, la información obtenida no solo se ajusta a los requerimientos de los diferentes instrumentos de planificación a nivel nacional, sino que también valida metodológicamente la investigación al enmarcarse en un estándar nacional que permite la comparación de hallazgos y fortalece la solidez técnica del estudio.

A continuación, se describe de manera general el procedimiento metodológico llevado a cabo para la obtención de resultados por cada uno de los objetivos planteados en el proyecto:

**1. Calcular los factores R (erosividad de la lluvia), K (erodabilidad del suelo), LS (topografía), C (cobertura vegetal) y P (prácticas de manejo) del modelo RUSLE, utilizando herramientas de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para las microcuencas de la zona norte de la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge La Mojana.**

- Factor LS

El factor LS, factor de la pendiente (factor S) y de la longitud de laderas (factor L), se calculó a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM) descargado de la interfaz de búsqueda satelital de Alaska de datos de radar (Alaska Satellite Facility, 2015). Posteriormente, se estimó el factor S (pendiente) en el software ArcGIS Pro, a partir del modelo de pendientes del terreno y la herramienta Raster Calculator. Luego, se calculó el factor L (longitud de ladera) mediante las herramientas de análisis hidrológico del mismo programa. Finalmente, se aplicó la ecuación propuesta por Moore y Burch (1986) (cita por verificar), la cual define el factor combinado LS:

$$LS = \left( \frac{L}{22.13} \right)^m (\sin \theta)^n$$

Donde:

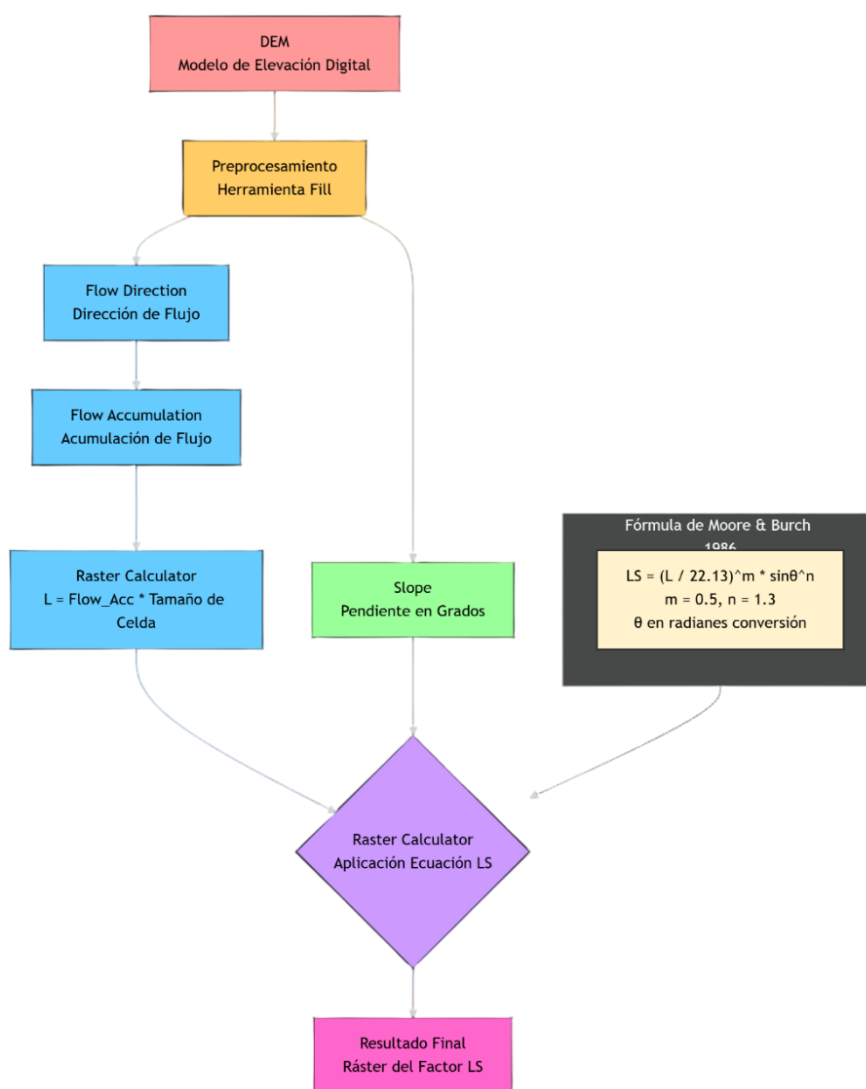
$L$  es la longitud de la pendiente (en metros),

$\theta$  es el ángulo de la pendiente (en grados),

$m$  y  $n$  son parámetros empíricos que dependen de las condiciones de la cuenca, generalmente con valores de 0.5 y 1.3, respectivamente.

Cuanto mayor es la longitud y la pendiente del terreno, mayor es la velocidad y la erosión por agua.

Figura 3. Representación gráfica de la implementación del factor LS en el software SIG ArcGIS Pro.



La Figura 3 describe el proceso metodológico para calcular el factor LS mediante el uso del software SIG de escritorio ArcGIS Pro.

- El factor K

Es el factor de erodabilidad del suelo que representa la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica. En este se tienen en cuenta las propiedades fisicoquímicas como textura, estructura, infiltración, entre otros para su cálculo. Sin embargo, para el caso del análisis realizado en las microcuencas de la zona norte de la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge – La Mojana, se estimó el factor k a partir del tipo de roca que conforma el sustrato superficial, ya que no se cuenta con información edafológica con más detalle para hacer el análisis por medio de las propiedades fisicoquímicas del suelo.

La información cartográfica del tipo de roca para la estimación del factor k, se obtuvo a partir del mapa de suelos del IGAC, el cuál cubre todos los departamentos de Colombia a escala 1:100.000. En este sentido, se usó esta escala de trabajo porque no hay más información actual, se asignaron los valores del factor K conforme a la metodología propuesta por (Wischmeier & Smith, 1978), la cual expresa los rangos del factor k según el tipo de roca formadora del sustrato superficial.

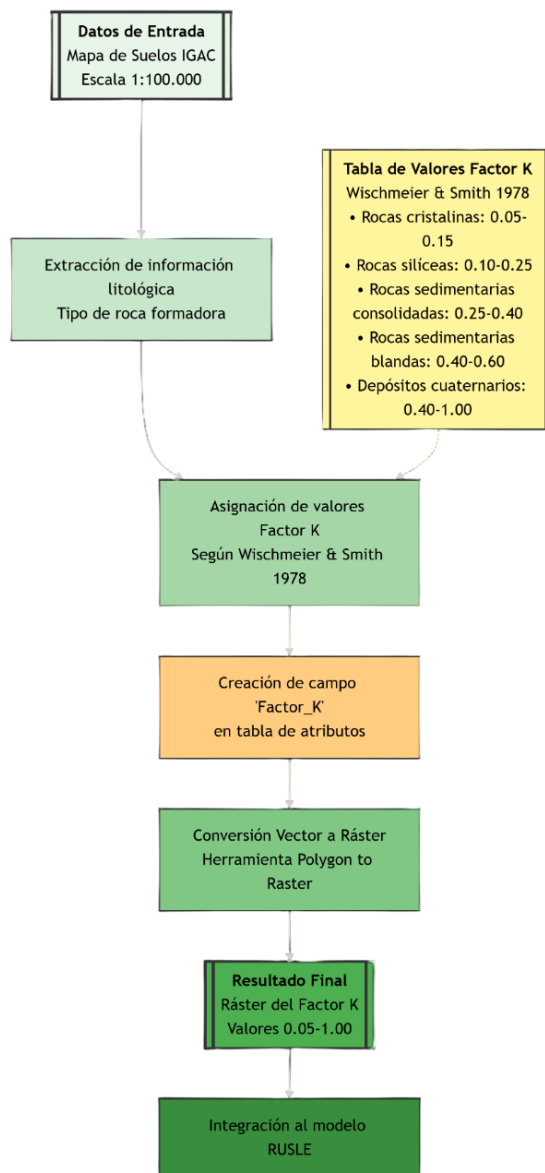
A continuación, se presenta la tabla con los valores y el tipo de roca asociado de acuerdo a la propuesta por (Wischmeier & Smith, 1978):

Tabla 4. Rangos del Factor K a partir del Tipo de Roca

<b>Tipos de rocas formadoras del sustrato superficial o litofacies</b>	<b>Rango del factor K</b>
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)	0,25 – 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

Posterior a establecer los rangos del factor K con base en la información litológica de la información de suelos del área de estudio, se procedió a utilizar la herramienta " Polygon to Raster" del software ArcGIS Pro para convertir la información del factor K de formato vectorial a raster.

*Figura 4. Representación gráfica de la implementación del factor K en el software SIG ArcGIS Pro*



La Figura 4 describe el proceso metodológico para calcular el factor k mediante el uso del software SIG de escritorio ArcGIS Pro.

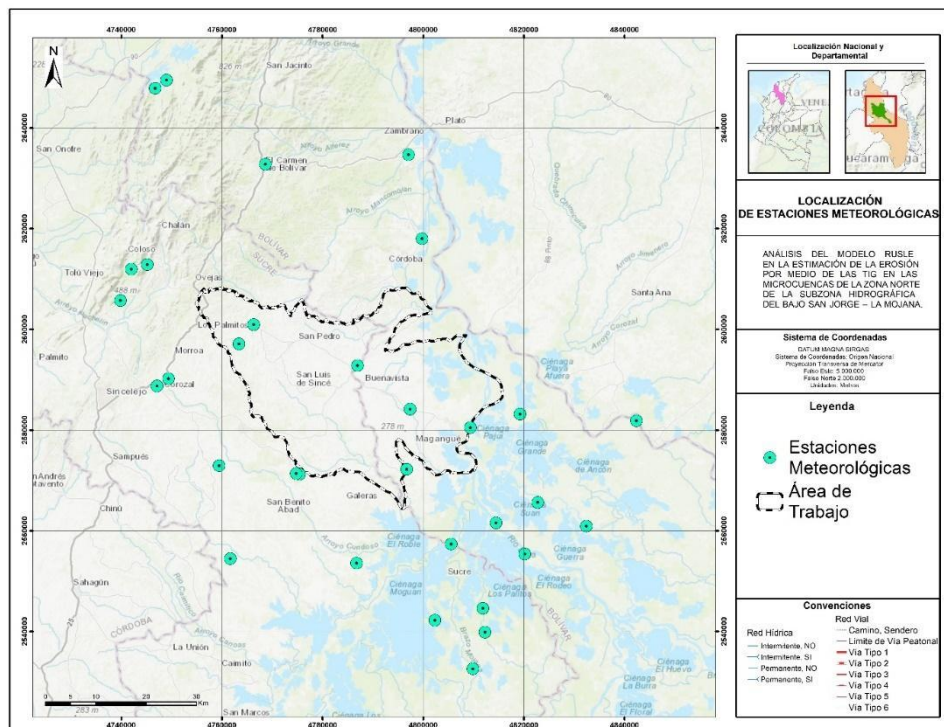
- **Factor R:**

El factor erosividad de la lluvia es un índice numérico que expresa la capacidad de la lluvia para erosionar el suelo, se define como la suma del producto de la energía total de la precipitación por su máxima intensidad en 30 minutos para todos los eventos importantes de precipitación en un área durante un año promedio (Wischmeier & Smith, 1978). Consideran que el término de R en forma de producto es el mejor parámetro de la precipitación que refleja la interacción entre el potencial combinado del impacto de lluvias y la turbulencia del escurrimiento para transportar las partículas desprendidas (Wischmeier & Smith, 1978).

En ese orden de ideas, para la determinación del factor R o factor de erosividad de la lluvia se aplicó el Índice Modificado de Fournier (IMF), el cual consideran no solo la precipitación mensual del mes más húmedo, sino también la del resto de los meses. Este índice fue comprobado por el científico (Arnoldus, 1977), quien determinó que el IMF se correlaciona mucho mejor con el valor de la precipitación por su máxima intensidad en 30 minutos. Adicionalmente, el IMF es uno de los índices ampliamente utilizado a nivel mundial, debido a que es considerado como un buen estimador de la erosividad de las lluvias para el modelamiento de los procesos erosivos en zonas tropicales con régimen de tipo bimodal y para sitios con escasos datos de precipitaciones pluviográficas (Arnoldus, 1977).

Teniendo en cuenta lo anterior, para realizar el cálculo del IMF se utilizaron los registros diarios de lluvia de 31 estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) del año 2024 para la zona de estudio (Figura 5).

Figura 5. Localización de las 31 estaciones meteorológicas del IDEAM



La Figura 4 representa las estaciones meteorológicas disponibles para la zona de estudio.

Ahora bien, a partir de la información obtenida se estimó el Índice Modificado Fournier (IMF), mediante la ecuación propuesta por (Arnoldus, 1977), la cual se describe a continuación:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t}$$

Donde:

IMF: Índice Modificado de Fournier

P<sub>i</sub>: Precipitación mensual (mm)

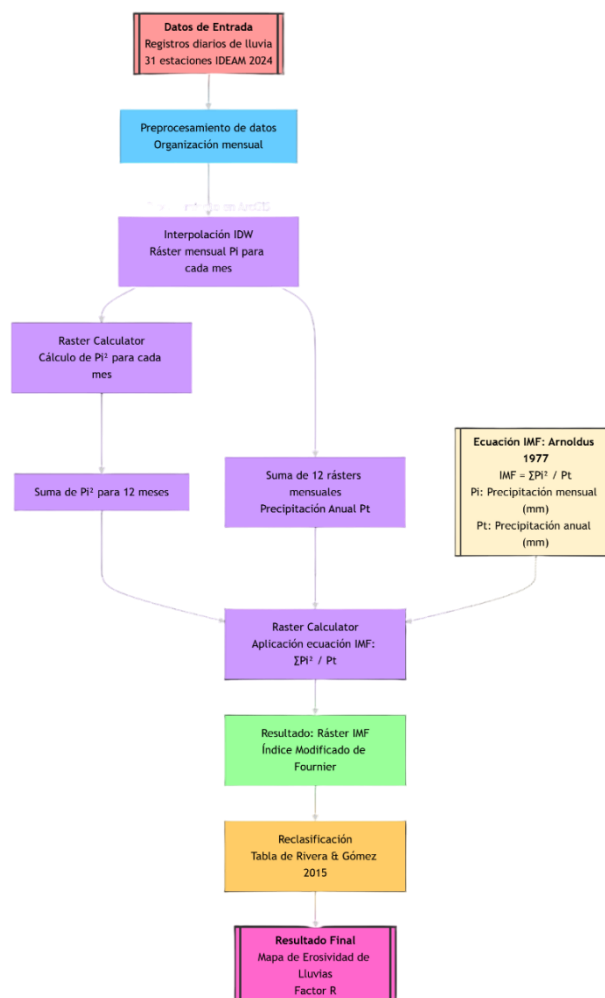
P<sub>t</sub>: Precipitación anual (mm)

En ese orden de ideas, para realizar la aplicación de la ecuación 2, primero debemos hacer el cálculo de la variable (p<sub>i</sub>) para ello se tiene una capa geográfica de 31 estaciones meteorológicas del IDEAM. La selección del método de interpolación se realizó considerando las características de la red de monitoreo y la naturaleza del fenómeno. Frente a alternativas geoestadísticas como el Kriging, el método de ponderación por distancia inversa (IDW) se seleccionó por su mayor

idoneidad técnica para este caso específico. Esta decisión se fundamenta en que la escasa densidad de la red de estaciones (31 puntos) es insuficiente para modelar de manera robusta y estable un variograma experimental, requisito indispensable para una aplicación fiable del Kriging que no introduzca incertidumbre adicional. Además, el principio de proximidad geográfica en el que se basa el IDW es particularmente adecuado para capturar la alta variabilidad espacial y la influencia orográfica local que caracteriza a la precipitación, garantizando al mismo tiempo una consistencia metodológica crucial para la generación coherente de las 12 superficies mensuales ( $P_i$ ) requeridas para el cálculo posterior del IMF mediante álgebra de mapas. Las estaciones fueron interpoladas utilizando el método de interpolación ponderación de distancia inversa (IDW), mediante el cual se obtuvieron los raster la precipitación mensual para los 12 mes del año para el 2024. Segundo, se realiza una suma de cada uno de los raster obtenido para cada mes con el fin de calcular el valor precipitación anual ( $p_t$ ), mediante la herramienta de algebra de mapas de ArcGIS Pro.

Tercero, una vez calculados los valores de  $p_i$  y  $p_t$ , se procedió aplicar la ecuación mediante el software SIG ArcGIS Pro versión 3.4.3, obteniendo como resultado el IMF (Figura 6).

Figura 6. Representación gráfica de la implementación del factor R en el software SIG ArcGIS Pro.



La Figura 6 describe el proceso metodológico para calcular el factor R mediante el uso del software SIG de escritorio ArcGIS Pro.

Finalmente, el resultado obtenido del IMF se clasificó con base en la propuesta metodológica por (Lince & Castro, 2015).

Tabla 5. Clasificación de la Erosividad de las Lluvias de acuerdo a Rivera y Gómez

Clasificación de la Erosividad de las Lluvias		
Clase	Erosividad ( $Mj \cdot Mm \cdot Ha^{-1} \cdot Año^{-1}$ )	Clasificación
1	< 1000	Natural
2	1.000 - 5.000	Muy baja
3	2.500 - 5.000	Baja
4	5.000 - 7.500	Moderada
5	7.500 - 10.000	Alta
6	10.000 - 15.000	Muy alta
7	15.000 - 20.000	Severa
8	> 20.000	Extremadamente severa

- Factor C:

Este factor indica el efecto de la cubierta vegetal en la pérdida de suelo. Se expresa como la relación entre la pérdida de suelo de un área o parcela con una vegetación dada y sistemas de manejo específicos, y la pérdida de suelo en una parcela en barbecho continuo, limpia y arada, en el sentido de la pendiente, a intervalos regulares. Los valores de C son pequeños cuando el suelo está protegido del impacto del agua de lluvia y de la acción de la escorrentía superficial, y viceversa; es decir, a mayor valor de C, menor es la cobertura del suelo y, por ende, hay menor protección.

La determinación del factor C se hace a partir de valores tabulados según se trate de

cultivos agrícolas o vegetación forestal. Por ende, para el cálculo de factor para el presente trabajo investigativo se basó en lo planteado por (Wischmeier & Smith, 1978), quienes publicaron numerosas tablas del factor C por tipos de cultivos, etapa de desarrollo y sistemas de manejo.

Teniendo en cuenta lo anterior, para realizar el cálculo del factor C se tomó como base la actualización de las coberturas de la tierra para el 2020, realizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Con base en este insumo se realizó el recorte para el área de estudio y se les asignó el valor del factor C a las coberturas de la tierra (ver tabla 6) con base en la propuesta metodológica de (Wischmeier & Smith, 1978).

En la Tabla 6 se visualiza la clasificación dada a cada cobertura de la tierra en función del factor C.

*Tabla 6. Clasificación del Factor C a partir de las Coberturas*

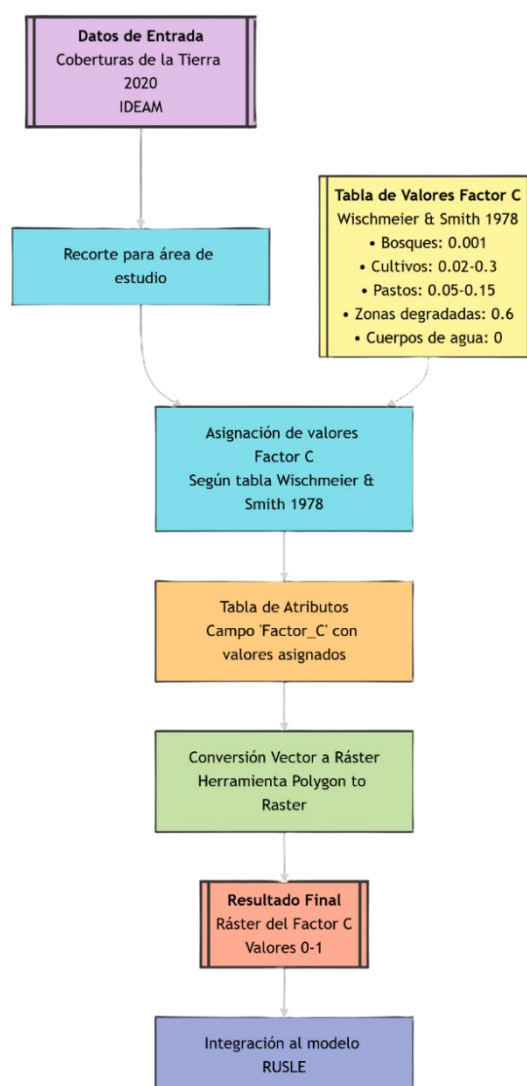
<b>Coberturas</b>	<b>Factor C</b>
Aeropuertos	0,05
Arbustal	0,03
Bosque de galería y/o ripario	0,001
Bosque denso	0,001
Cultivos agroforestales	0,02
Cultivos permanentes arbóreos	0,03
Herbazal	0,05
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0
Mosaico de cultivos	0,25
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0,2

Coberturas	Factor C
Mosaico de pastos con espacios naturales	0,15
Mosaico de pastos y cultivos	0,2
Otros cultivos transitorios	0,3
Pastos arbolados	0,05
Pastos enmalezados	0,08
Pastos limpios	0,15
Plantación forestal	0,02
Ríos (50 m)	0
Tejido urbano continuo	0,05
Tejido urbano discontinuo	0,1
Tierras desnudas y degradadas	0,6
Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	0
Vegetación secundaria o en transición	0,05
Zonas arenosas naturales	0,3
Zonas de extracción minera	0,5
Zonas industriales o comerciales	0,05
Zonas pantanosas	0,01

Después de haber realizado la asignación del factor C a las coberturas de la tierra de la zona de estudio, se procedió a realizar la conversión de esta capa vectorial a raster, mediante la herramienta " Polygon to Raster" del software ArcGIS Pro, para posteriormente integrar este factor a la ecuación del modelo RUSLE.

A continuación, se describe mediante un mapa conceptual el proceso metodológico implementado para el cálculo del factor C mediante el software SIG ArcGIS Pro (Figura 7)

Figura 7. Representación gráfica de la implementación del factor C en el software SIG Pro



La Figura 7, describe el proceso metodológico para calcular el factor C mediante el uso del software SIG de escritorio ArcGIS Pro.

- Factor P:

El factor P, también conocido como factor de prácticas de manejo y conservación del suelo, desempeña un papel fundamental en la estimación de la erosión hídrica. La definición de este factor está estrechamente relacionada con la morfometría, especialmente con la pendiente del terreno.

En este contexto, la pendiente del terreno influye directamente en la velocidad y volumen del flujo de agua superficial. A medida que la inclinación aumenta, también lo hace la energía del agua en movimiento, lo que incrementa su capacidad de arrastre de partículas del suelo. En terrenos con pendientes pronunciadas, la escorrentía tiende a concentrarse, generando mayores tasas de erosión en comparación con zonas más planas, donde el agua se dispersa y tiene menor fuerza erosiva y gran parte se infiltra en el suelo.

El cálculo de este factor se realiza considerando la pendiente del terreno expresada en grados, la cual se clasifica en distintos rangos. Se utilizó como insumo principal un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido de ALOS PALSAR, correspondiente al año 2011 (Alaska Satellite Facility, 2015). Este modelo presenta una resolución espacial de  $12,5 \times 12,5$  metros por píxel, lo que permite una representación detallada del relieve y una adecuada caracterización de las pendientes del terreno de la zona de estudio; para la clasificación, se empleó una tabla de referencia basada en un estudio aplicado al análisis de erosión hídrica en Nigeria, desarrollado por (Okenmuo & Ewemoje, 2023). Este esquema permite asociar cada rango de pendiente con un valor específico del factor P, facilitando su integración en modelos predictivos de pérdida de suelo (Okenmuo & Ewemoje, 2023). A continuación, se relaciona los rangos de pendientes y valor asignado como Factor P:

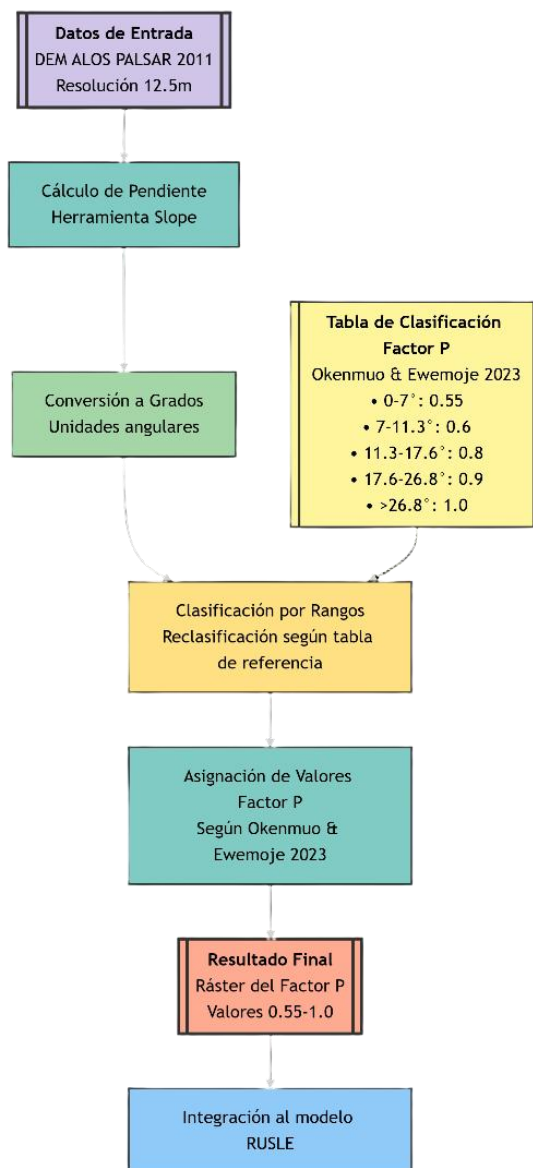
*Tabla 7. Clasificación del Factor P a partir del Grado de Pendiente*

Grado de pendiente	Factor P asignado
0-7	0,55
7-11,3	0,6
11,3-17,6	0,8
17,6-26,8	0,9
>26,8	1

De acuerdo con el valor asignado al factor P, se evidencia que las zonas con menor pendiente presentan valores más bajos. Esto indica que en de menor pendiente la susceptibilidad a la erosión es menor.

A continuación, se presenta mediante un mapa conceptual el proceso metodológico implementado para el cálculo del factor P en el software SIG ArcGIS Pro (Ver Figura 8)

Figura 8. Representación gráfica de la implementación del factor P en el software SIG ArcGIS Pro



La Figura 8 describe el proceso metodológico para calcular el factor P mediante el uso del software SIG de escritorio ArcGIS Pro.

**2. Aplicación del modelo RUSLE y el índice NDVI. Se calculó el modelo RUSLE en el software ArcGIS Pro y el índice NDVI en el lenguaje de programación R, respectivamente. A continuación, se detalla el procedimiento realizado para cada uno.**

- Modelo RUSLE

Una vez calculados los factores determinantes para la aplicación de la ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) en las microcuencas de la zona norte de la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge – La Mojana, se procedió hacer el procesamiento y análisis espacial de los factores del modelo RUSLE, haciendo uso de los sistemas de información geográfica (SIG), a través de la aplicación de técnica de análisis espacial como álgebra de mapas se realizó el cálculo de la ecuación RUSLE, como se describe a continuación.

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

Donde:

A: es la pérdida de suelo en t. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup> (toneladas por hectárea por año).

R: es el factor erosividad de la lluvia en Mjmm/ha.año (megajulio-milímetro por hectárea por año).

K: es el factor erosionabilidad el suelo en (t/ha)/(Mj.mm/ha.h) (toneladas por hectárea, por cada Megajulio-milímetro por hectárea por hora).

LS: es el factor longitud y pendiente del terreno (adimensional)

C: es el factor cobertura y manejo de la vegetación (adimensional).

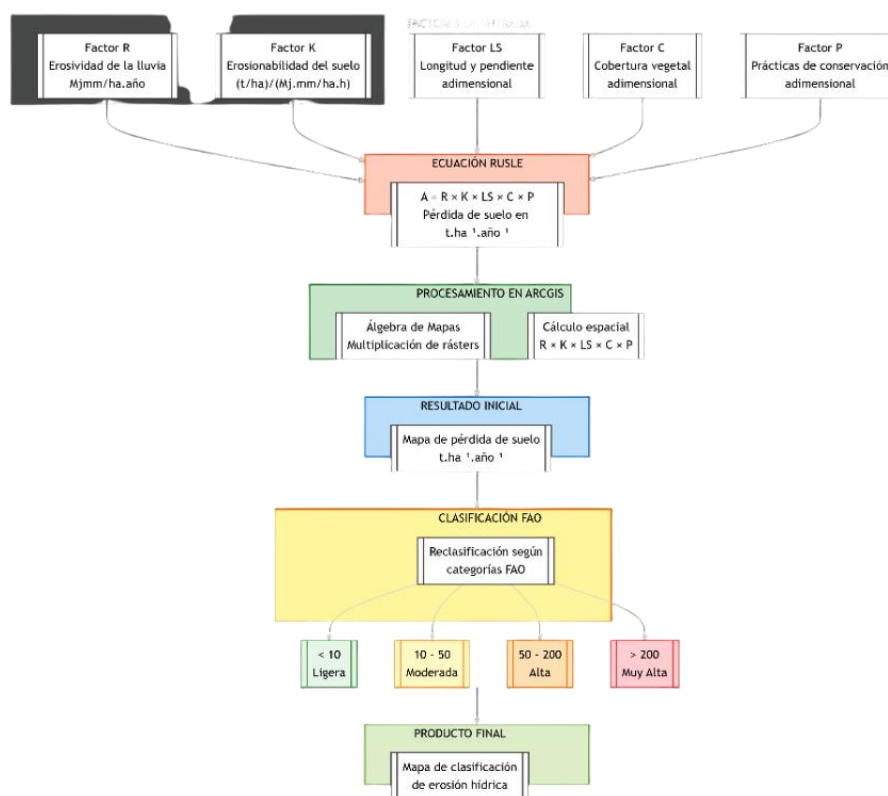
P: es el factor prácticas de conservación (adimensional).

Ahora bien, el resultado obtenido mediante la ecuación RUSLE fue clasificado de acuerdo a la siguiente tabla. La tabla 8 representa las diferentes categorías de clasificación de la erosión del suelo, establecidas por la FAO en el año 2016.

Tabla 8. Clasificación de la Erosión Hídrica Según FAO

Clasificación de la Erosión Hídrica del Suelo Según FAO	
Clasificación	Perdida De Suelo (T/Ha <sup>-1</sup> ·Año <sup>-1</sup> )
Ligera	< 10
Moderada	10 -50
Alta	50 - 200
Muy Alta	> 200

Figura 9. Representación gráfica de la implementación de la RUSLE en el software SIG ArcGIS Pro.



La Figura 9, describe el proceso metodológico para calcular la RUSLE mediante el uso del software SIG de escritorio ArcGIS Pro.

## ● Índice NDVI

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se desarrolló a partir de imágenes multispectrales del satélite Sentinel-2 de los años 2018, 2019 y 2020. Se seleccionaron estas imágenes, debido a que la nubosidad tenía un porcentaje muy bajo. Posteriormente, se implementó un flujo de trabajo automatizado en lenguaje R mediante paquetes especializados para el procesamiento geoespacial y visualización de información, como sf, raster, rgdal, terra, ggplot2 y RColorBrewer (Figura 10).

Figura 10. Proceso del NDVI en el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) RStudio

```
# Cargar librerías
library(sf); library(raster); library(ggplot2); library(tidyverse)

# Configuración inicial
setwd("D:/RASTER/IMAGENES")
magna_proj <- "+proj=utmcrs +lat_0=4 +lon_0=-73 +k=0.9992 +x_0=5000000 +y_0=2000000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs"
shapefile <- shapefile("D:/UTP/OneDrive - Universidad Tecnológica de Pereira/Cartografía_Tesis_AnaNegrete/SHP/Area_Trabajo_Buffer100m.shp")

# Crear carpetas de salida
dir.create("NDVI_TIFF", showWarnings = FALSE)
dir.create("NDVI_PNG", showWarnings = FALSE)

# Función para procesar NDVI
procesar_ndvi <- function(sub) {
  nombre <- basename(sub)
  banda_4 <- list.files(sub, pattern = "B04.*\\.tif$", full.names = TRUE)
  banda_8 <- list.files(sub, pattern = "B08.*\\.tif$", full.names = TRUE)

  if (length(banda_4) == 0 | length(banda_8) == 0) return(NULL)

  red <- raster(banda_4[1]); nir <- raster(banda_8[1])
  red_crop <- mask(crop(red, shapefile), shapefile)
  nir_crop <- mask(crop(nir, shapefile), shapefile)

  red_proj <- projectRaster(red_crop, crs = magna_proj)
  nir_proj <- projectRaster(nir_crop, crs = magna_proj)

  NDVI <- (nir_proj - red_proj) / (nir_proj + red_proj)

  # Reclassificación
  reclas_matrix <- matrix(c(-Inf,0.1,1, 0.1,0.15,2, 0.15,0.25,3,
                           0.25,0.40,4, 0.40,0.60,5, 0.60,Inf,6), ncol=3, byrow=TRUE)
  NDVI_reclas <- reclassify(NDVI, reclas_matrix)

  # Guardar resultados
  writeRaster(NDVI_reclas, file.path("NDVI_TIFF", paste0("NDVI_", nombre, ".tif")), format="GTiff", overwrite=TRUE)

  png(file.path("NDVI_PNG", paste0("NDVI_", nombre, ".png")), width=500, height=500)
  plot(NDVI_reclas, col=c("#680404", "#D73027", "#FC8D62", "#FFD300", "#91CF60", "#005F10"),
       breaks=1:6, main=paste("NDVI:", nombre), legend=FALSE)
  legend("topleft", legend=c("No vegetal", "Suelo", "Veg. abierta", "Veg. dispersa", "Veg. cerrada", "Veg. densa"),
        fill=c("#680404", "#D73027", "#FC8D62", "#FFD300", "#91CF60", "#005F10"), cex=0.8)
  dev.off()

  cat("✅ Procesado:", nombre, "\n")
}

# Ejecutar procesamiento
lapply(list.dirs(getwd(), recursive=FALSE), procesar_ndvi)
```

Las imágenes se incorporaron en una carpeta y el área de estudio se le realizó un buffer de 100 metros y se guardó en formato Shapefile. Ahora bien, se realizó un script (Anexo 1) para el procesamiento de las imágenes Sentinel-2, partiendo de la identificación y extracción de las bandas espectrales 4 (rojo) y 8 (infrarrojo cercano), con las cuales se realizó el cálculo del NDVI. Esto debido a su sensibilidad a la actividad fotosintética y estructura de la vegetación. Además, se recortaron y enmascararon las bandas para ajustarlas al área de estudio. También se reproyectaron al sistema de coordenadas vigente para Colombia (MAGNA- SIRGAS / Origen - Nacional).

El índice NDVI se calculó con la ecuación estándar que establece la diferencia normalizada entre las reflectancias del infrarrojo cercano y el rojo. Esta se describe a continuación

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Donde:

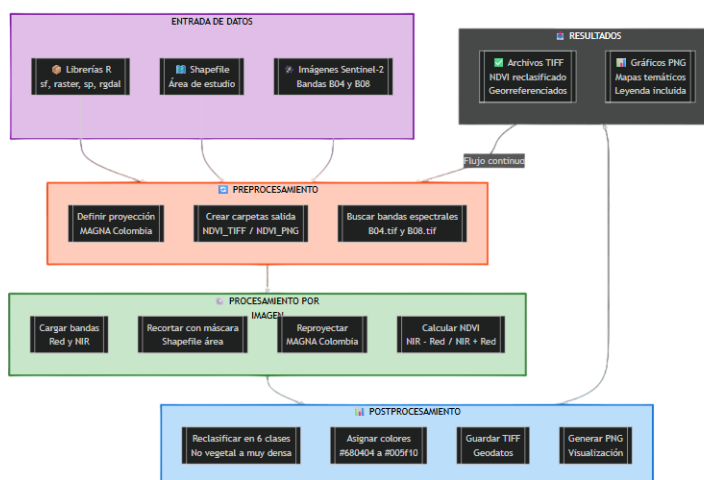
NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR Hace referencia al infrarrojo cercano, es decir, la banda 8

Red es la banda 4 o banda roja

La ecuación genera resultados que están dentro del rango de -1 a 1, donde los valores más altos indican mayor densidad y vigor de la vegetación. Posteriormente, se agruparon en 6 categorías de coberturas (Medina, 2023), como se evidencia en la siguiente tabla:

Figura 11. Representación gráfica de la implementación del NDVI en el lenguaje de programación R



La Figura 11, describe el proceso metodológico para calcular el NDAVI mediante el uso en el lenguaje de programación R.

Tabla 9. Interpretación de los Valores de NDVI

NDVI	Cobertura de la Tierra	Interpretación
< 0,1	Clases no vegetales	Cuerpos de agua, nubes, construcciones.

NDVI	Cobertura de la Tierra	Interpretación
0,1 a 0,15	Suelo descubierto	Tierras degradadas, asentamientos, vías, suelo sin cobertura vegetal.
0,15 a 0,25	Vegetación muy abierta	Tierras cultivadas, herbazales, arbustos, pastizales, terreno arado.
0,25 a 0,40	Vegetación dispersa	Vegetación leñosa, plantación arbustiva, bosques.
0,40 a 0,60	Vegetación cerrada	Plantas densas en crecimiento, bosque húmedo.
> 0,6	Vegetación muy densa	Cobertura con altas densidades de hojas verdes.

## 7. Resultados y discusión

### 7.1 Calcular los factores R (erosividad de la lluvia), K (erodabilidad del suelo), LS (topografía), C (cobertura vegetal) y P (prácticas de manejo) del modelo RUSLE, utilizando herramientas de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para las microcuencas de la zona norte de la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge La Mojana.

Con el fin de calcular la pérdida de suelo, mediante el modelo RUSLE para las microcuencas de la zona norte de la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge – La Mojana, se estimaron los factores LS, K, C, R y P. Esto se llevó a cabo teniendo en cuenta las características específicas de la región y los insumos disponibles desde los instrumentos de ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas. A continuación, se describen los factores determinados para el modelo RUSLE:

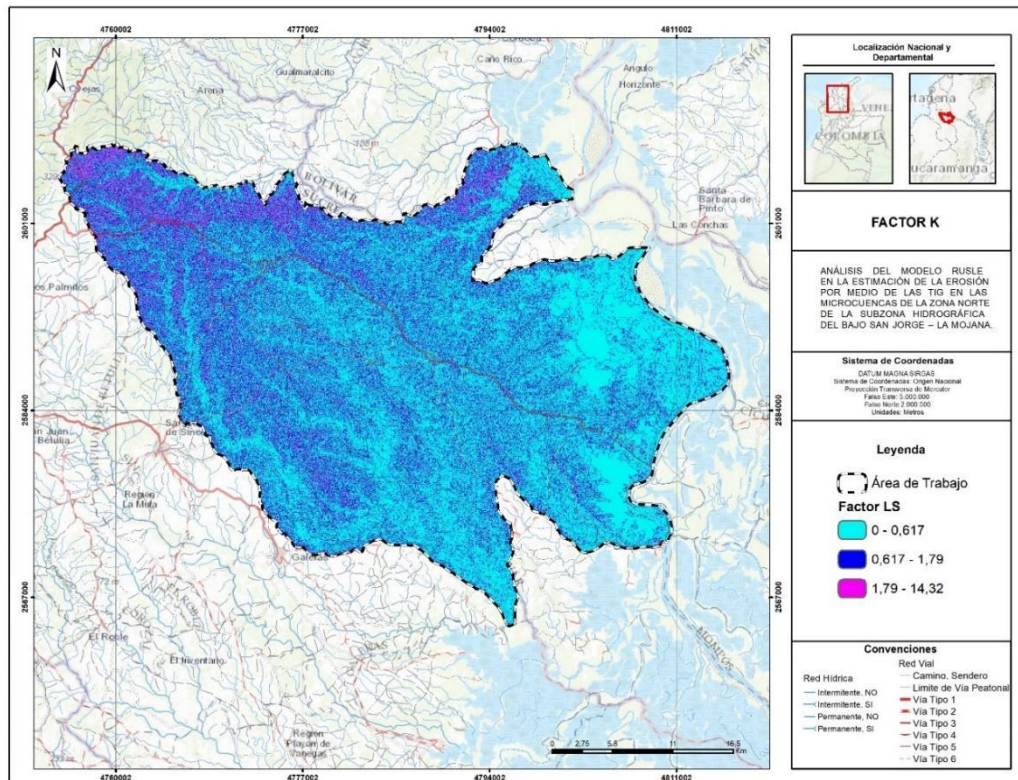
- **Factor LS**

La figura 4, representa la combinación de la longitud de las pendientes (L) y la inclinación del terreno (S) en el área de estudio, observándose una distribución heterogénea, ya que los valores de LS varían desde 0 hasta aproximadamente 14.3, clasificados en tres rangos de intensidad: baja (0 - 0.617), media (0.617 - 1.79) y alta (1.79 - 14.32).

De acuerdo con lo anterior, la mayor parte del área se encuentra en los rangos bajos y medios, lo cual indica que predominan las zonas de relieve plano a suavemente ondulado. Estas condiciones, típicas de la región de La Mojana, se asocian a una menor susceptibilidad a la erosión por escorrentía, dado que la energía del agua superficial en estos terrenos tiende a ser baja.

No obstante, también se identifican sectores puntuales con valores elevados del factor LS, principalmente hacia el norte y suroccidente del área de trabajo. Estas áreas presentan pendientes más pronunciadas y laderas más extensas, lo cual incrementa significativamente el riesgo de erosión hídrica. Estos sectores deben considerarse prioritarios en la formulación de medidas de manejo y conservación de suelos, debido a que el factor topográfico puede acelerar los procesos de degradación si se combina con suelos poco resistentes o coberturas vegetales escasas.

Figura 12. Factor LS del Área de Estudio



- Factor K

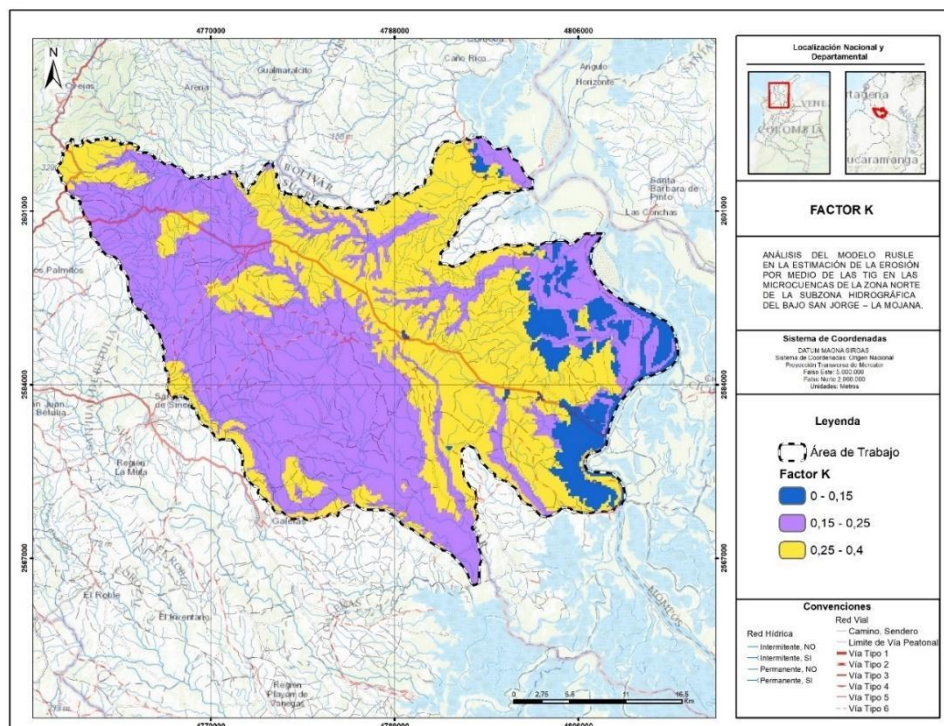
El factor K representa la erodabilidad del suelo, es decir, la vulnerabilidad a ser erosionado por el agua.

La figura 5, agrupa tres categorías de clasificación del factor k, baja erodabilidad (0 - 0.15), media (0.15 - 0.25) y alta (0.25 - 0.4). Los valores medios corresponden a la categoría con más área, es decir, ocupa la mayor parte del territorio con suelos de materiales sedimentarios consolidados y otras formaciones rocosas de dureza intermedia. Esta categoría representa una condición de vulnerabilidad moderada frente a la erosión, en la que el tipo de suelo puede resistir la acción erosiva, aunque sigue siendo susceptible si se combina con factores como pendiente o cobertura vegetal deficiente.

Por otra parte, se identifican áreas con valores bajos de K, particularmente al noreste del área de estudio. Estos suelos, posiblemente derivados de rocas más resistentes como granitos o basaltos, presentan una menor probabilidad de ser erosionados, incluso en condiciones de

topografía desfavorable. Su presencia es favorable para el control natural de la erosión, ya que la resistencia física del suelo mitiga el impacto del escurrimiento superficial. Sin embargo, la taxonomía del suelo en esta zona indica que algunos suelos son más susceptibles a la erosión debido a su textura arenosa y drenaje excesivo, características presentes en los polígonos que muestran erosión moderada a severa.

Figura 13. Factor k del Área de Estudio



- Factor R

En la Figura 5, se representa la espacialización de 31 estaciones meteorológicas del IDEAM, utilizada como insumo para el cálculo del factor R. Estas estaciones meteorológicas fueron interpoladas utilizando el método de interpolación ponderación de distancia inversa (IDW), mediante el cual se obtuvieron los raster de precipitación mensual para los 12 meses del año para el 2024 (figura 7).

Figura 14. Localización de las 31 estaciones meteorológicas del IDEAM

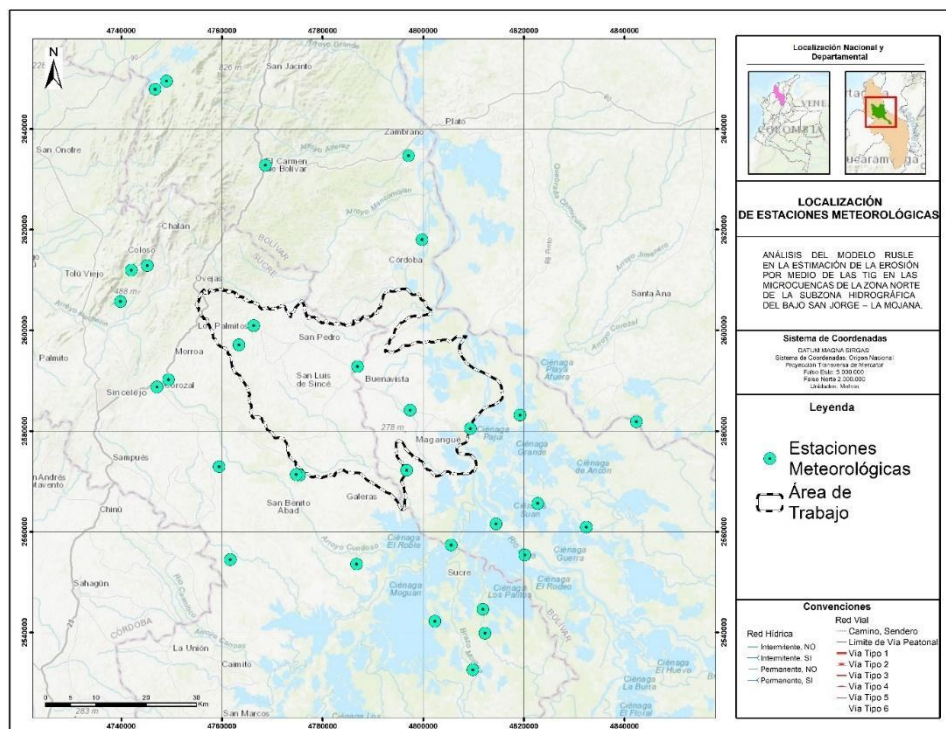
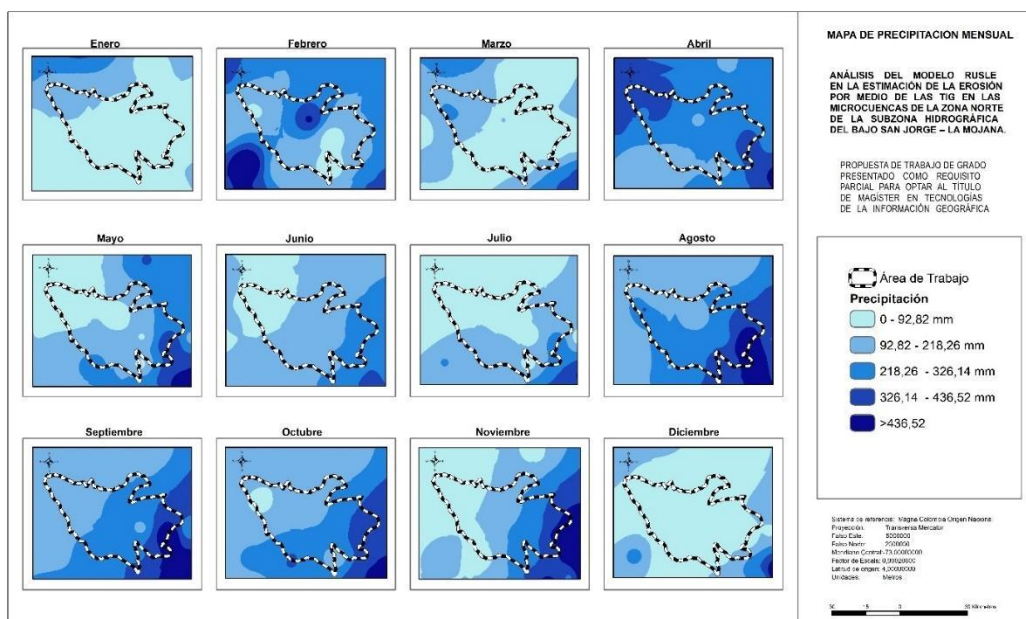


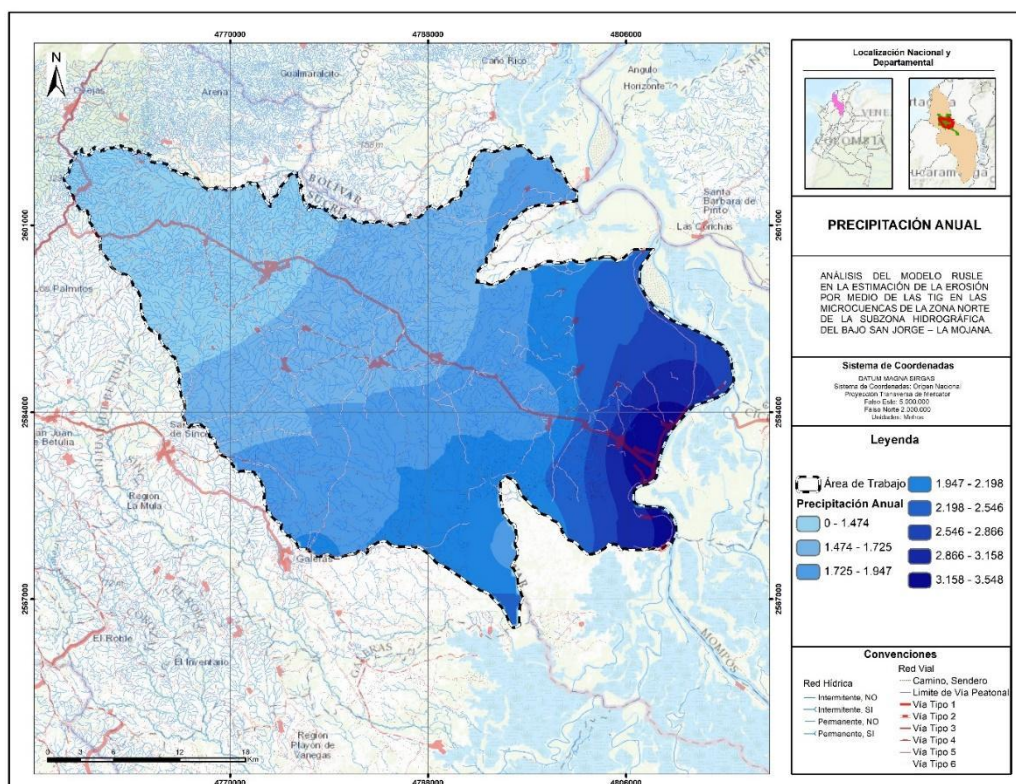
Figura 15. Precipitación Mensual



En la Figura 15, se ilustra que los meses de enero, marzo, julio y diciembre corresponden a un periodo de pocas lluvias o periodo seco y los meses febrero, abril, mayo, junio, agosto, septiembre, octubre y noviembre corresponden al periodo de lluvias o temporada de invierno, lo cual es típico de un régimen de precipitación bimodal.

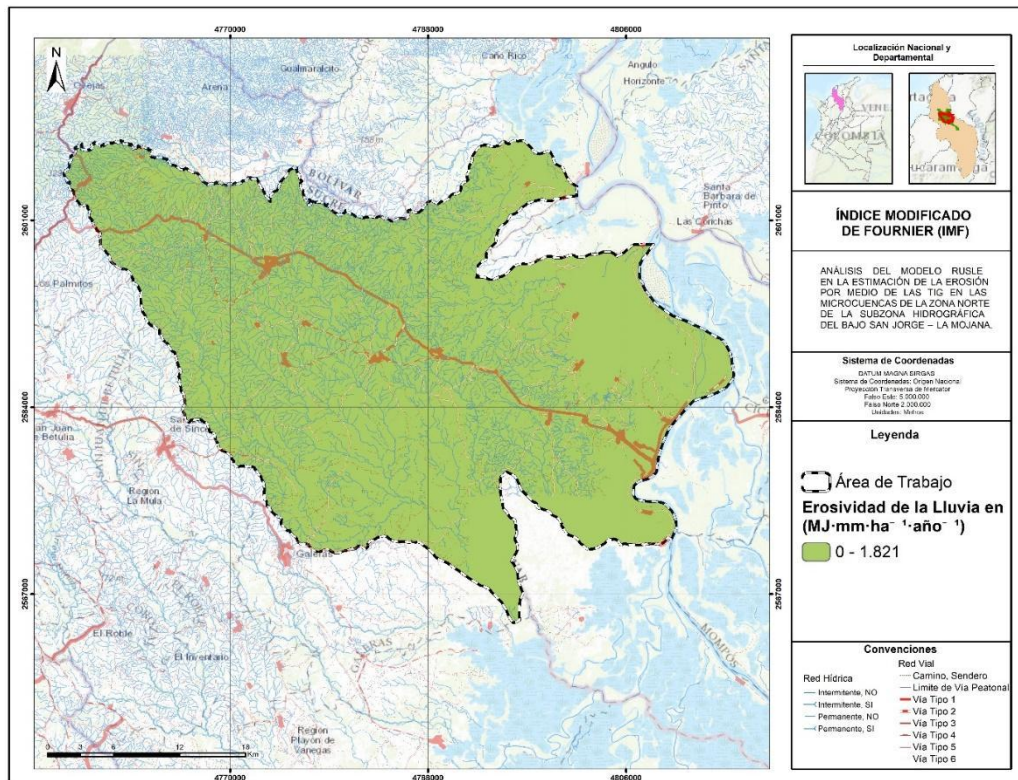
Ahora bien, en la Figura 16 se observa que los valores de la precipitación anual para el área de estudio oscilan entre 1270,94 y 3548,02 mm, lo cual nos indica que es una zona con bajas precipitaciones en los diferentes periodos del año. Esta distribución de lluvia es típica de la región caribe.

Figura 16. Precipitación Anual



En la figura 9 se presenta el Índice Modificado de Fournier (IMF), equivalente al factor R. Estos valores del IMF tienen una distribución entre 0 y 1821 mega julios por milímetro por hectárea por año ( $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ ). En este sentido, se visualiza que la erosividad del área de estudio es muy baja, debido al régimen meteorológico, ya que para esta zona se registran bajas precipitaciones durante la mayor parte del año.

Figura 17. Factor R del Área de Estudio



- Factor C:

Las coberturas predominantes para el área de estudio son pastos y mosaico de pastos y cultivos, con un porcentaje de 56% y 11% respectivamente. Esto indica que las principales actividades productivas están asociada a la ganadería. En la tabla 10 se describen las áreas y porcentajes de las coberturas de la zona de estudio. Adicionalmente, en la Figura 18 se visualizan las coberturas utilizadas para el cálculo del factor C.

Figura 18. Coberturas de la Tierra Área de Estudio

## ANÁLISIS ESPACIAL DE LA EROSIÓN DEL SUELO EN MICROCUENCAS DEL BAJO SAN JORGE....

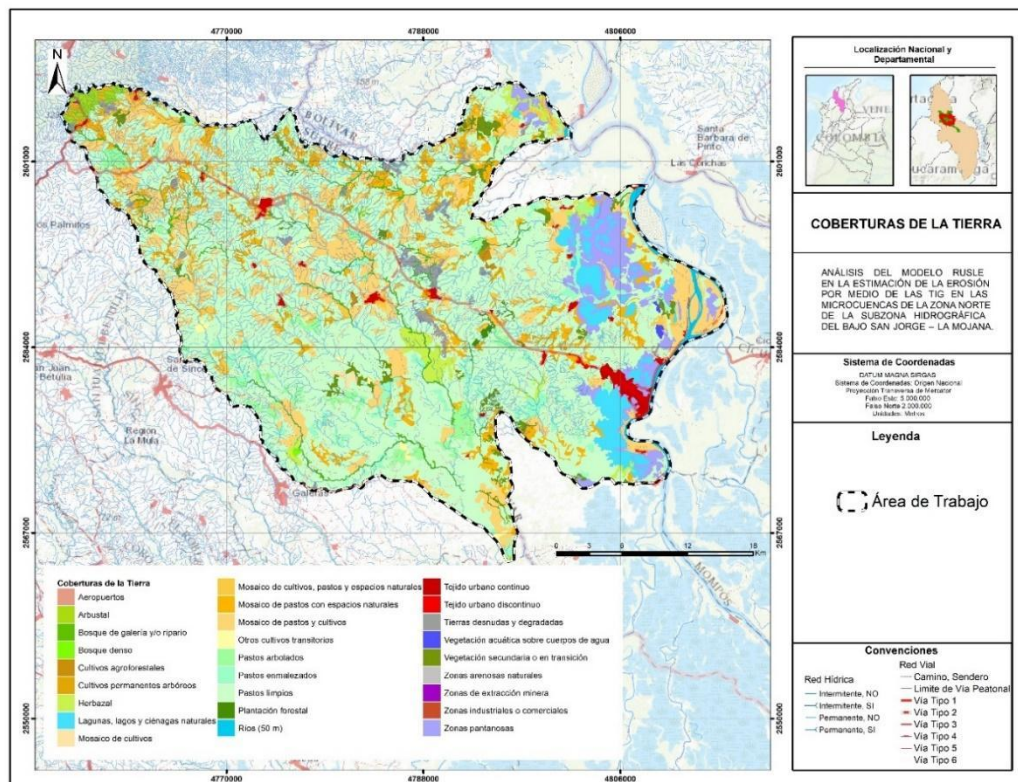


Tabla 10. Áreas, Porcentajes de las coberturas

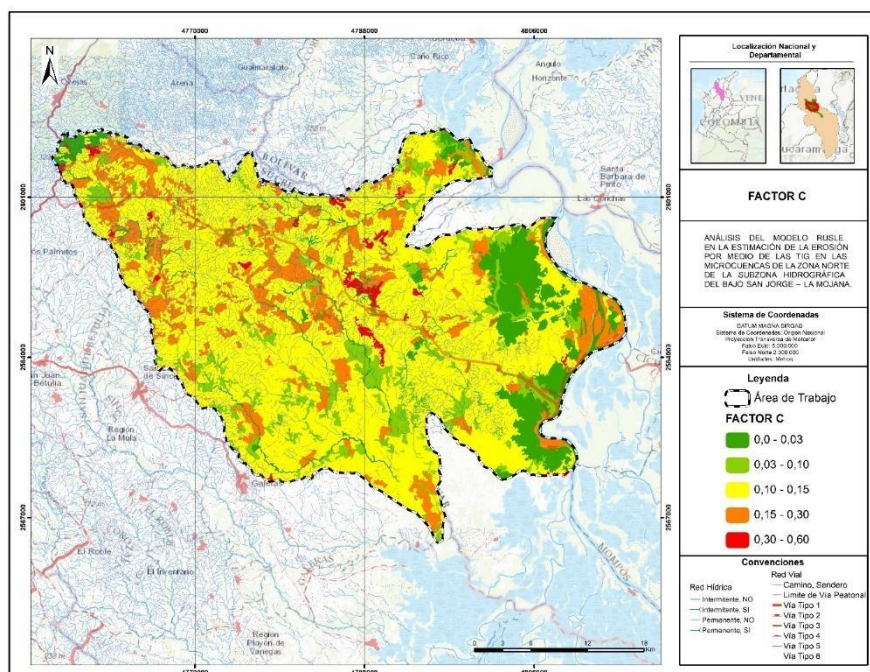
Coberturas	Factor C	Área Ha	Porcentaje
Aeropuertos	0,05	19,52	0,01%
Arbustal	0,03	1035,61	0,71%
Bosque de galería y/o ripario	0,001	1858,80	1,28%
Bosque denso	0,001	48,76	0,03%
Cultivos agroforestales	0,02	209,81	0,14%
Cultivos permanentes arbóreos	0,03	41,98	0,03%
Herbazal	0,05	2324,88	1,60%

<b>Coberturas</b>	<b>Factor C</b>	<b>Área Ha</b>	<b>Porcentaje</b>
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0	3996,31	2,75%
Mosaico de cultivos	0,25	361,72	0,25%
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0,2	6091,12	4,20%
Mosaico de pastos con espacios naturales	0,15	9250,22	6,37%
Mosaico de pastos y cultivos	0,2	16359,55	11,27%
Otros cultivos transitorios	0,3	398,13	0,27%
Pastos arbolados	0,05	3417,37	2,35%
Pastos enmalezados	0,08	4302,58	2,96%
Pastos limpios	0,15	81302,70	56,00%
Plantación forestal	0,02	101,01	0,07%
Ríos (50 m)	0	1627,16	1,12%
Tejido urbano continuo	0,05	1468,12	1,01%
Tejido urbano discontinuo	0,1	141,55	0,10%
Tierras desnudas y degradadas	0,6	1789,34	1,23%
Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	0	121,85	0,08%
Vegetación secundaria o en transición	0,05	2864,45	1,97%
Zonas arenosas naturales	0,3	30,20	0,02%

Coberturas	Factor C	Área Ha	Porcentaje
Zonas de extracción minera	0,5	10,22	0,01%
Zonas industriales o comerciales	0,05	5,68	0,00%
Zonas pantanosas	0,01	5998,13	4,13%
<b>TOTAL</b>		<b>145176,78</b>	<b>100%</b>

Ahora bien, los resultados de la valoración de la susceptibilidad que tienen las coberturas a la erosión se presentan en la Figura 19.

Figura 19. Factor C del Área de Estudio



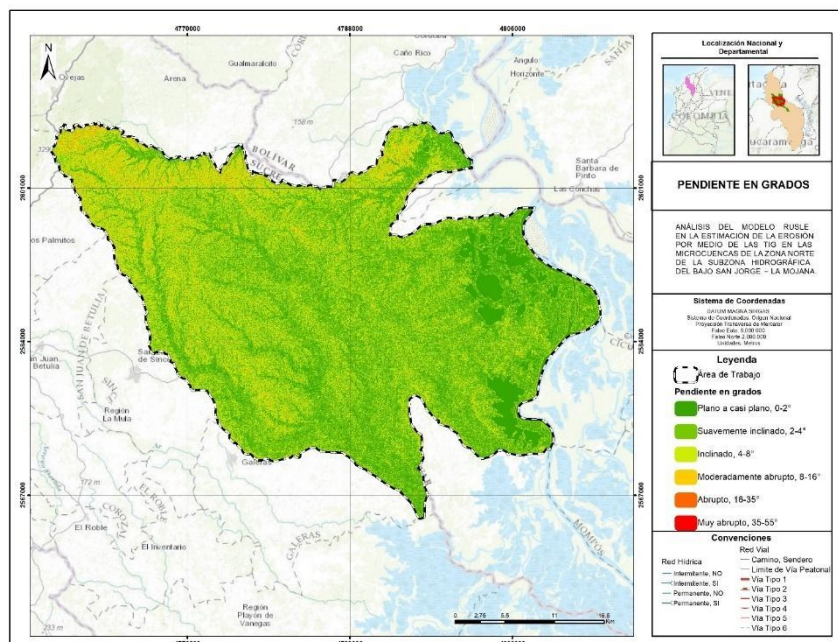
En la Figura 19, se visualiza la susceptibilidad que tiene cada cobertura vegetal a la erosión por incidencia de la precipitación. En esta se identifican que las áreas con cobertura en tierras desnudas y degradadas y zonas de extracción minera, son las áreas con mayor valor en el factor C el cual corresponde a 0,6 y 0,5 respectivamente; además, tienen un área de 1757,25 ha para la cobertura de tierras desnudas y degradadas, la cual corresponde al 1,23% del área de estudio. En cuanto

a la cobertura de zonas de extracción minera tiene un área de 10,22 ha y un porcentaje de 0,007%. De acuerdo a lo anterior, es importante tener en cuenta que la cobertura de la tierra que mayor porcentaje de área tiene en las microcuencas son pastos limpios con 56,10% y un factor C de 0,15.

### • Factor P

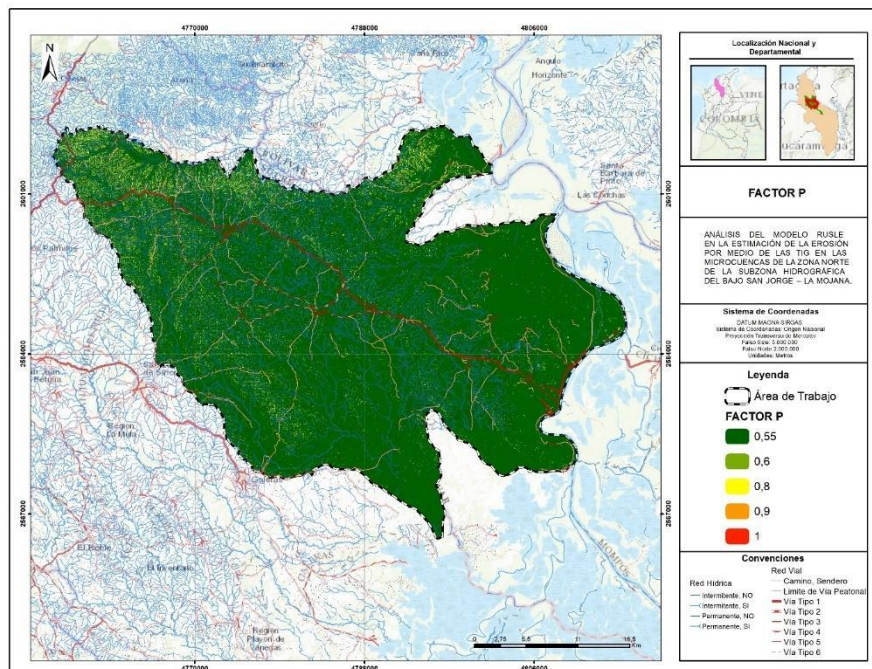
En el área de estudio, predominan las pendientes bajas, con una clara concentración en los rangos de  $0^{\circ}$  a  $4^{\circ}$ . Específicamente, las categorías "Plano a casi plano" ( $0^{\circ}$ – $2^{\circ}$ ) y "Suavemente inclinado" ( $2^{\circ}$ – $4^{\circ}$ ) representan el 28,2% y 38,1% del total del terreno, respectivamente, sumando en total un 66,3%. En general, estos datos reflejan una topografía predominantemente plana a suavemente inclinada, lo cual es relevante para el cálculo del factor de prácticas de manejo (P). A continuación, se presentan las pendientes para el área de estudio:

Figura 20. Pendientes del Área de Estudio



En relación con lo anterior, y considerando la asignación del factor conforme a los rangos de pendiente establecidos en el apartado de metodología, el factor P queda finalmente representado de la siguiente manera:

Figura 21. Factor P del Área de Estudio



## 7.2 Estimar la tasa de pérdida de suelo anual promedio en las microcuencas, integrando los mapas de factores previamente calculados.

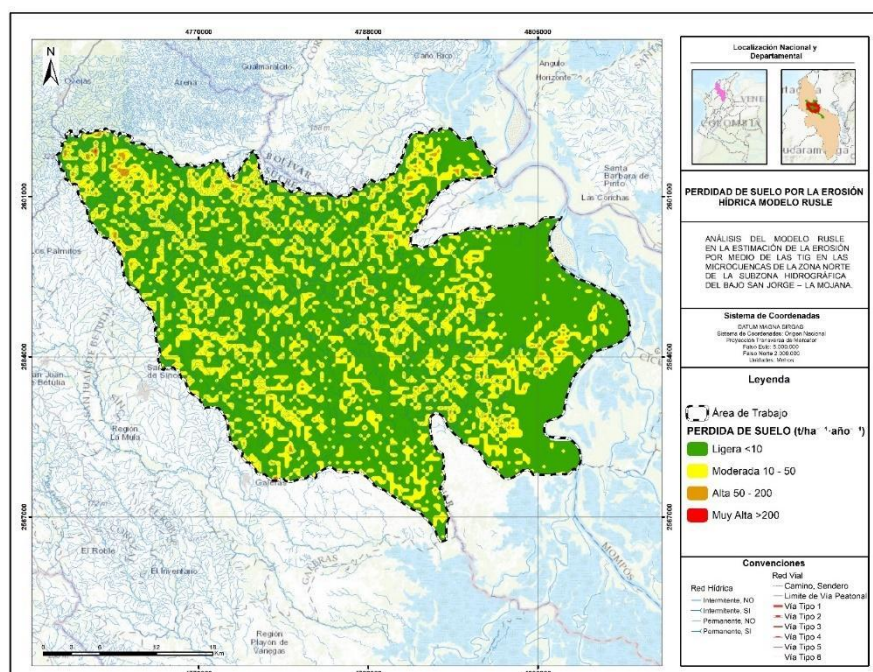
El resultado de la aplicación de la ecuación RUSLE, genera como resultado un raster con los valores de erosión del suelo que varían entre 0 hasta los 437,38 ( $t/ha^{-1} \cdot año^{-1}$ ) toneladas por hectárea por año. El cual es clasificado con base en el manual de evaluación de tierras para agricultura de secano de la FAO (2000) y se representa a través de la tabla 11.

Tabla 11. Área y Porcentaje de la Pérdida de Suelo para el Área de Estudio

Clasificación	Perdida De Suelo (T/Ha <sup>-1</sup> ·Año <sup>-1</sup> )	Área Ha	Porcentaje
Ligera	< 10	99134,04	69,46
Moderada	10 -50	40650,05	28,48
Alta	50 - 200	2896,90	2,03
Muy Alta	> 200	34,22	0,02

En la Figura 22, se representa el resultado de la clasificación del modelo RUSLE según las categorías establecidas por la FAO.

Figura 22. Modelo RUSLE para el Área de Estudio



En ese orden de ideas, y con base en la información de la Tabla 11y Figura 22. Modelo RUSLE para el Área de Estudio, se puede inferir que, la erosión de la zona de estudio es principalmente ligera

o baja con una representación en la zona de estudio de 69,46%. Seguida por la categoría de erosión moderada que representa el 28,48%, mientras que las categorías que menor porcentaje y área tiene en la zona de estudio son la alta y muy alta, que representan el 2,03% y 0,02% respectivamente.

De manera general, se analiza que la erosión de la zona de estudio es principalmente baja, debido a los siguientes factores; como la baja precipitación la cual oscila entre el 1270,94 y 3548,02 mm al año. Adicionalmente, las coberturas vegetales que mayor susceptibilidad presentan a la erosión en el área de estudio son; las zonas de extracción minera y las tierras desnudas y degradadas, que representan 0,007% y 1,23% respectivamente. Asimismo, se debe tener en cuenta que el área de trabajo presenta pendientes suaves o predominantemente bajas, destacándose aquellas que oscilan entre 0° y 4°, las cuales abarcan aproximadamente el 66,3% del área de estudio.

Ahora bien, en cuanto a las zonas con categoría moderada, alta y muy alta, se asociadas con las zonas con topografías más accidentadas, en donde el uso actual del suelo y las prácticas de manejo desempeñaron un papel importante, en conjunto con las actividades humanas intensivas que contribuyen al aumento de la susceptibilidad a la erosión en la región.

En cuanto al análisis multitemporal del NDVI, que abarcó los periodos comprendidos entre diciembre de 2018 y enero de 2023, es posible observar que, en diciembre de 2018 y 2022, se evidenció mayor presencia de coberturas vegetales densas, en particular en el sector oriental del área de estudio. Esto sugiere la existencia, para estos años, de más coberturas naturales respecto a los otros años (Figura 23 y Figura 24).

Figura 23. RGB de las Imágenes Satelitales Procesadas

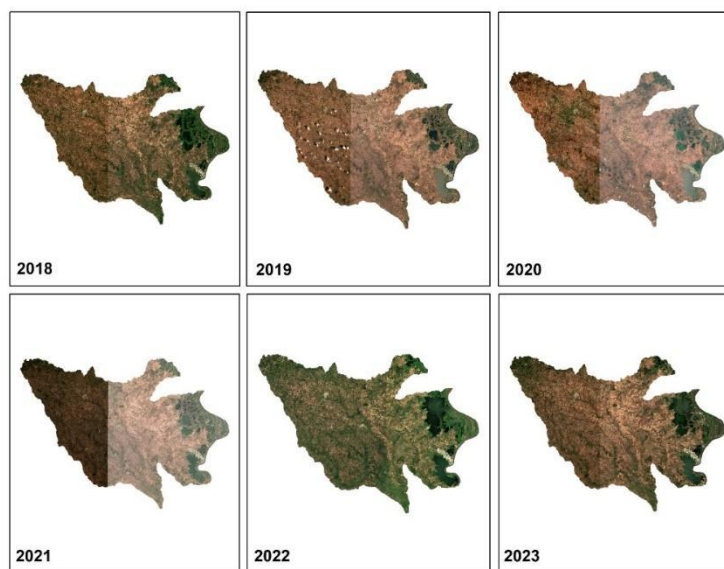
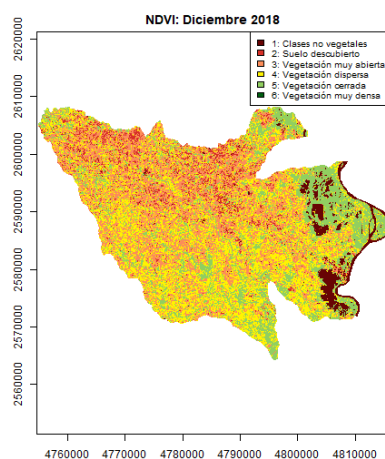
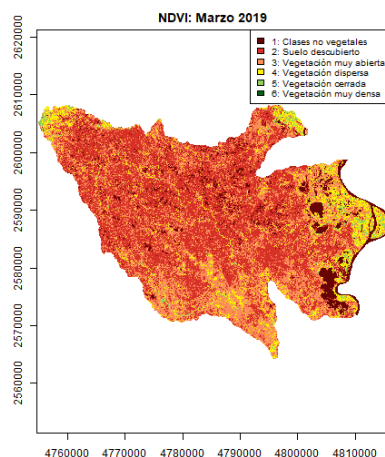


Figura 24. Índice NDVI en diciembre de 2018



Sin embargo, a partir de marzo de 2019 se comienza a observar una tendencia distinta de la vegetación, ya que esta disminuye progresivamente, mientras que su vez, que aumentan visiblemente las áreas con suelo descubierto o áreas con poca vegetación.

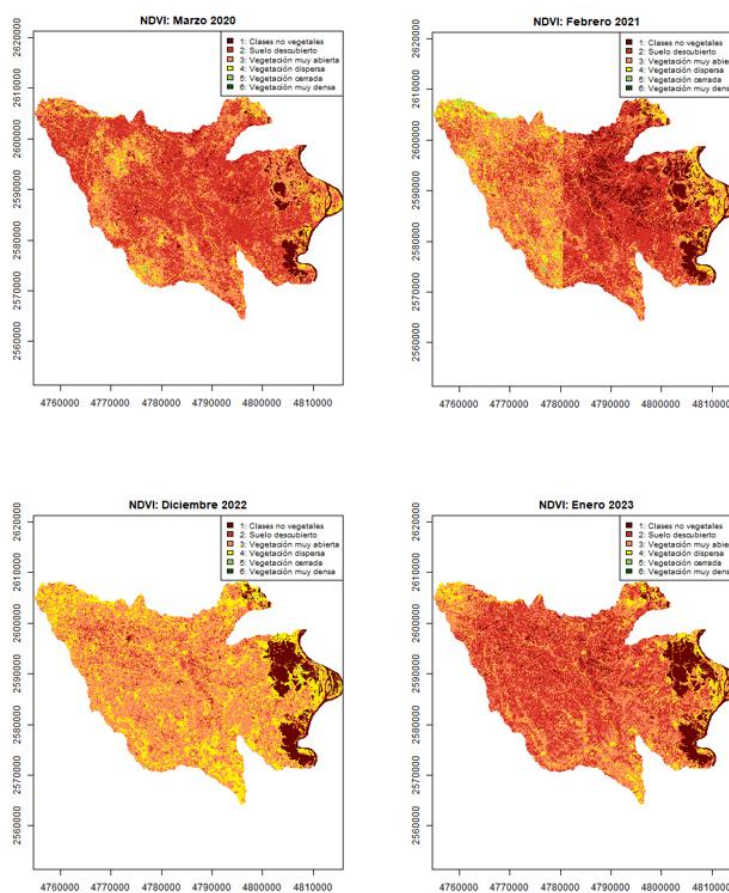
Figura 25 Índice NDVI en marzo de 2019



Los resultados de NDVI correspondientes a marzo de 2020 y 2021, se evidencia la continuación de pérdida de cobertura vegetal. Esto está vinculado con una con el avance de la frontera agropecuaria, tal como se evidencia en las coberturas vegetales del IDEAM (2020). En 2022 y comienzos de 2023, se siguen presentando parches de vegetación, es decir, fragmentos aislados de vegetación y aumento en las áreas erosionadas. Sin embargo, se observa que durante las épocas de lluvias los parches de vegetación se incrementan significativamente. Esto se evidencia en los meses de diciembre para los años de 2018 y 2022, donde se nota un crecimiento de la cobertura vegetal, favorecido por la disponibilidad de agua en las zonas áridas.

Por el contrario, en enero de 2023 es notable el cambio en un solo mes, ya que se continúa con el patrón de degradación de la zona, por la disminución de la disponibilidad de agua y sus condiciones áridas. En las figuras 15, se observa el retroceso de las zonas verdes y el aumento de las áreas con suelo descubierto o con vegetación muy abierta, reflejando un deterioro de la cobertura vegetal en muy poco tiempo.

Figura 26. Índice NDVI para marzo 2020, febrero de 2021, diciembre de 2022 y enero de 2023



No obstante, es importante tener en cuenta que los resultados están influenciados por factores técnicos relacionados a la resolución de las imágenes, tales como resolución espacial, radiométrica y espectral. Esto genera algo de incertidumbre en la interpretación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), especialmente en áreas que presenta poca vegetación, ya que de acuerdo con la resolución espacial no es posible visualizar a mayor detalle los cambios atribuidos a procesos de degradación. Es decir, los píxeles pueden contener mezclas de vegetación y suelo desnudo, dificultando la interpretación.

### **7.3 Generar mapas temáticos de susceptibilidad a la erosión para la identificación de las zonas críticas con mayor pérdida de suelo, con el fin de proponer recomendaciones para la gestión y mitigación de la degradación en el área de estudio.**

El análisis integrado de los resultados obtenidos a partir del modelo de Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y los índices de aridez, permitió establecer una comprensión holística de los principales factores que inciden en la generación de procesos erosivos en las microcuencas ubicadas en la zona norte del Bajo San Jorge – La Mojana.

Por un lado, el análisis multitemporal del NDVI evidenció patrones y tendencias en la pérdida de cobertura vegetal, especialmente durante las épocas secas. Esta disminución en la vegetación constituye un factor crítico que incrementa la vulnerabilidad del suelo a la erosión, al reducir la protección natural frente al impacto de la lluvia y la escorrentía superficial.

La clasificación de las coberturas del suelo, con base en las categorías del NDVI (Tabla 10), describe que un 43,88% del área corresponde a vegetación muy abierta y un 37,22% a vegetación dispersa, lo que indica que más del 80% de la superficie presenta coberturas vegetales con baja a media densidad. En contraste, categorías como vegetación cerrada (8,76%) y vegetación muy densa (0,10%) se encuentran en proporciones marginales. Asimismo, las áreas clasificadas como suelo descubierto (2,62%) y clases no vegetales (7,42%) son las áreas con menor porcentaje respecto al total del área de estudio. Sin embargo, las coberturas de vegetación muy abierta y suelo descubierto son altamente susceptibles a procesos erosivos debido a la nula o escasa cobertura vegetal.

Estos resultados se correlacionan estrechamente con el comportamiento del factor C en la RUSLE, el cual representa el efecto de la cobertura y manejo de la vegetación sobre la pérdida de suelo. Se identificó que las coberturas de tierras desnudas y degradadas, zonas de extracción minera y áreas de pastos limpios son las categorías con mayor valor del factor C, lo que indica una alta susceptibilidad a la erosión. Estas áreas, al presentar baja biomasa y escasa cobertura vegetal, están directamente expuestas al impacto de la gota de lluvia y a los procesos de escorrentía que favorecen el arrastre del material superficial del suelo.

Por otra parte, el modelo RUSLE indica que la mayor parte del área presenta niveles de erosión ligera (69,46%), en correspondencia con zonas donde persisten coberturas vegetales densas, según los resultados del NDVI en los primeros años analizados (2018). Las coberturas vegetales cumplen un rol fundamental en la protección del suelo, debido a que contribuyen a la estabilidad estructural del suelo ante eventos climáticos como la precipitación.

Sin embargo, a partir de 2019, el análisis multitemporal del NDVI revela una disminución progresiva de las áreas de vegetación densa, particularmente en el sur y suroccidente del área de estudio. Estas zonas coinciden con sectores donde el modelo RUSLE muestra un aumento en la severidad de la erosión, con una transición hacia categorías de erosión moderada y alta. Dicha correlación confirma el papel crucial de la cubierta vegetal como factor controlador de la erosión, ya que su pérdida expone el suelo, incrementa la escorrentía y, en consecuencia, acelera la tasa de pérdida de suelo.

En este sentido, resulta fundamental incorporar el reconocimiento taxonómico de los suelos afectados, ya que la severidad y el tipo de erosión identificados por RUSLE no pueden interpretarse de forma adecuada sin considerar las propiedades inherentes del suelo. No es equiparable el efecto de la erosión hídrica en suelos arenosos con alta susceptibilidad al arrastre, pero también mayor infiltración con el que se presenta en suelos limo-arcillosos, más propensos a la sellificación superficial y a la formación de cárcavas, o en suelos francos, que exhiben un comportamiento intermedio. La textura, la estructura y el contenido de materia orgánica, propiedades definidas por la clasificación taxonómica modulan directamente la vulnerabilidad del suelo a los procesos erosivos. Por lo tanto, la integración de esta variable es indispensable para ajustar los modelos predictivos, priorizar zonas de intervención y diseñar estrategias específicas y eficaces de conservación de suelos para cada unidad identificada.

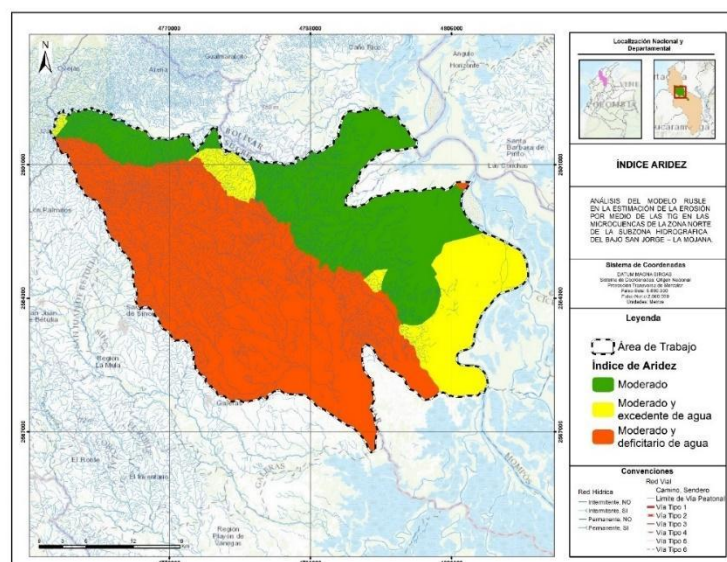
Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente, es importante analizar como índice de aridez aporta insumo para comprender las dinámicas de la pérdida a la erosión en el área de estudio, en relación con los resultados obtenidos por medio de la RUSLE y el índice de NDVI.

El análisis del índice de aridez, obtenido a partir de los instrumentos de planificación ambiental (POMCA Río La Mojana – Cauca y POMCA Río San Jorge), evidenció la existencia de tres condiciones de aridez diferenciadas en la región: zonas con aridez moderada y déficit hídrico, zonas con aridez moderada y excedentes de agua, y áreas con condiciones de aridez moderada (Figura 27). Estas variaciones reflejan un patrón espacial de vulnerabilidad que incide directamente en la capacidad de recuperación de la vegetación y en la persistencia de los procesos erosivos. Las zonas clasificadas con aridez moderada y déficit hídrico presentan condiciones de sequedad y elevada evapotranspiración, factores que reducen el vigor vegetal y dificultan la recuperación de la cobertura perdida. De este modo, la aridez no solo limita la resiliencia del ecosistema frente a

disturbios (naturales o antrópicos), sino que también intensifica los procesos erosivos al dejar los suelos más expuestos y menos protegidos.

En particular, las áreas con déficit hídrico tienden a coincidir espacialmente con las zonas de mayor pérdida de cobertura detectadas por el NDVI, y con las categorías de erosión moderada a alta identificadas en RUSLE. Esto sugiere que, en regiones con aridez, los procesos de degradación del suelo se aceleran cuando se pierde la cobertura vegetal.

Figura 27. Índices de Aridez de los Instrumentos de Planificación (POMCAS)



La Figura 27, indica que las zonas hacia el sur occidente del área de estudio presentan condiciones de aridez más agresivas, mientras que la zona norte presenta condiciones moderadas. En sentido, la representación espacial del índice de aridez es crucial para entender la vulnerabilidad climática que presenta la región frente a la erosión, debido a que zonas más áridas tienden a ser más susceptibles a la degradación del suelo, afectando actividades como la agricultura, la conservación de recursos hídricos y el manejo ambiental.

En síntesis, la articulación de los resultados del modelo RUSLE, el NDVI y el índice de aridez permite establecer dinámicas claras: mayores áreas con cobertura vegetal densa en 2018 se asociaron con menores tasas de erosión; mientras que la pérdida progresiva de vegetación desde 2019, combinada con condiciones de aridez, incrementó significativamente la susceptibilidad a la erosión y la pérdida de suelo.

Adicionalmente, las condiciones climáticas predominantes en la zona caracterizadas por bajas precipitaciones y alta radiación solar, generan un balance hídrico heterogéneo que agrava los procesos erosivos. Las áreas donde coinciden baja cobertura vegetal y aridez son las más vulnerables, evidenciando la urgente necesidad de implementar estrategias de manejo del suelo y restauración ecológica.

En conclusión, el modelo RUSLE cuantifica la erosión, el NDVI explica las dinámicas y patrones de cambio de la cobertura vegetal, y el índice de aridez proporciona el contexto climático que condiciona la resiliencia y vulnerabilidad del suelo. El análisis integral de estos factores demuestra que la pérdida de suelo en la región no es atribuible a un solo factor, sino que responde a una interacción sinérgica entre el deterioro de la cobertura vegetal, las condiciones de aridez y las características del paisaje, intensificadas por las actividades humanas.

La integración del NDVI, RUSLE y el índice de aridez constituye así una herramienta fundamental para el diagnóstico ambiental y la planificación territorial, permitiendo identificar zonas críticas, comprender la dinámica de la degradación del suelo y orientar acciones estratégicas para la conservación de las microcuencas y la gestión sostenible de los recursos naturales en la subzona hidrográfica del Bajo San Jorge – La Mojana.

## 8. Conclusiones

- Por medio del cálculo del factor LS, se determinó que la mayor parte del área se encuentra en los rangos bajos y medios, lo cual indica que predominan las zonas de relieve plano a suavemente ondulado. Caracterizado por rangos de pendientes de "plano a casi plano" ( $0^{\circ}$ – $2^{\circ}$ ) y "suavemente inclinado" ( $2^{\circ}$ – $4^{\circ}$ ) representan el 28,2% y 38,1% del total del terreno, respectivamente, sumando en conjunto un 66,3% del área de trabajo. En ese orden de ideas, estas condiciones nos permiten inferir que el área de estudio presenta una baja susceptibilidad a la erosión por escorrentía, dado que la energía del agua superficial en estos terrenos tiende a ser baja. Sin embargo, se identifican sectores puntuales hacia la zona norte y suroccidente del área de trabajo con pendientes más pronunciadas y laderas más extensas, que influyen significativamente al aumento de la erosión, teniendo en cuenta el tipo de suelo donde se presente.
- El factor de coberturas vegetales tiene una fuerte incidencia en la generación de condiciones de erosión, debido a que, la baja tasa de biomasa y escasa cobertura vegetal, están directamente expuestas al impacto de la gota de lluvia y a los procesos de escorrentía que favorecen el arrastre del material superficial del suelo y por ende generan erosión.
- Con los resultados de la RUSLE, se puede inferir que, la erosión de la zona de estudio es principalmente ligera o baja con una representación en la zona de estudio de 69,46%. Seguida por la categoría de erosión moderada que representa el 28,48%, mientras que las categorías que menor porcentaje y área tiene en la zona de estudio son la alta y muy alta, que representan el 2,03% y 0,02% respectivamente. En ese sentido, factores como la baja precipitación, las coberturas vegetales que mayor susceptibilidad presentan a la erosión en el área de estudio son; las zonas de extracción minera y las tierras desnudas y degradadas, que representan 0,007% y 1,23% respectivamente. Asimismo, se debe tener en cuenta que el área de trabajo presenta pendientes suaves o predominantemente bajas, destacándose aquellas que oscilan entre  $0^{\circ}$  y  $4^{\circ}$ , las cuales abarcan aproximadamente el 66,3% del área de estudio.

- La cobertura vegetal es un factor clave en la protección del suelo contra la erosión. Los resultados del NDVI evidencian que más del 80% del área de estudio presenta coberturas de baja a media densidad (vegetación muy abierta y dispersa), lo que incrementa la vulnerabilidad del suelo a los procesos erosivos.
- La disminución progresiva de la cobertura vegetal intensifica los procesos de erosión. El análisis multitemporal del NDVI entre 2018 y 2023 muestra una pérdida progresiva de vegetación densa, especialmente a partir de 2019, lo cual coincide espacialmente con el aumento de la severidad de la erosión según los resultados del modelo RUSLE.
- Las áreas con bajo índice de cobertura vegetal presentan los valores más altos del factor C en RUSLE. Las categorías de suelo descubierto y vegetación muy abierta muestran alta susceptibilidad a la erosión, lo que evidencia la relación directa entre la falta de cobertura y el incremento en la tasa de pérdida de suelo.
- Las condiciones de aridez agravan la vulnerabilidad a la erosión. Las zonas clasificadas con aridez moderada y déficit hídrico limitan la recuperación de la vegetación y aceleran la degradación del suelo, especialmente en sectores donde ya existe una pérdida significativa de cobertura vegetal.
- Existe una sinergia entre factores climáticos, cobertura vegetal y erosión del suelo. La combinación de baja cobertura vegetal, condiciones de aridez y características topográficas, intensificadas por actividades humanas, explica la dinámica compleja de degradación del suelo en las microcuencas de la zona norte del Bajo San Jorge – La Mojana.
- La articulación del NDVI, RUSLE e índice de aridez constituye una herramienta eficaz para la gestión ambiental. El enfoque integrado permite identificar zonas críticas, comprender las dinámicas de degradación y plantear lineamientos para la conservación de las microcuencas y la gestión sostenible del territorio.
- La evaluación efectiva del riesgo erosivo y el diseño de estrategias de mitigación robustas requieren ir más allá de estos modelos (NDVI, RUSLE e índice de aridez) e incorporar de manera obligatoria el reconocimiento taxonómico de los suelos. La respuesta a la erosión hídrica es inherentemente distinta según las propiedades del suelo (textura, estructura, materia orgánica), por lo que intervenciones

estandarizadas resultarían ineficaces. Por lo tanto, la integración de la clasificación taxonómica del suelo es un paso fundamental para transformar los datos cuantitativos de erosión en conocimiento aplicable, permitiendo la priorización precisa de áreas críticas y el desarrollo de políticas de conservación edáfica específicas, sostenibles y efectivas adaptadas a la realidad de cada unidad de suelo.

## 9. Recomendaciones

- Programas de Restauración Ecológica y Manejo de la Cobertura Vegetal

La evidencia demuestra que la pérdida de cobertura vegetal es el detonante crítico de la erosión. Por lo tanto, la estrategia principal debe centrarse en su recuperación. Esto implica priorizar la intervención en las zonas del sur y suroccidente, identificadas como críticas por la convergencia de erosión severa, aridez y pérdida de biomasa. Las acciones deben orientarse hacia la reforestación con especies nativas resilientes adaptadas al déficit hídrico, asegurando así su supervivencia. Simultáneamente, es fundamental transformar el paisaje productivo promoviendo la transición de los "pastos limpios" –identificados como altamente erosivos– hacia sistemas agroforestales y silvopastoriles que incrementen la biomasa, protejan el suelo y diversifiquen los ingresos económicos. Complementariamente, la implementación de cercas vivas y barreras rompeviento con especies de rápido crecimiento ayudará a reducir la velocidad del viento y de la escorrentía, protegiendo los suelos más expuestos.

- Prácticas de Conservación de Suelos Adaptadas a la Taxonomía y Condiciones Locales

Dado que la vulnerabilidad del suelo está modulada por sus propiedades inherentes, las prácticas de conservación deben ser específicas para cada tipo de suelo. Para los suelos limo-arcillosos, propensos a la sellificación y formación de cárcavas, se recomienda la construcción de terrazas de lento escurrimiento y zanjas de infiltración que controlen la escorrentía y favorezcan la recarga hídrica. En contraste, para los suelos arenosos, susceptibles al arrastre pero con mayor infiltración, son más efectivas las barreras muertas utilizando residuos de cosecha o piedras para retener sedimentos. A nivel de manejo, es crucial implementar labranza de conservación o labranza cero para minimizar la remoción del suelo, junto con la rotación de cultivos y el uso de abonos verdes para mejorar la estructura del suelo, aumentar su contenido de materia orgánica y, en consecuencia, su resistencia a la erosión.

- Manejo Integral del Agua para Enfrentar la Aridez

El índice de aridez revela un balance hídrico heterogéneo que agrava la degradación, por lo que la gestión del agua es un pilar fundamental. Para combatir el déficit hídrico en las épocas secas, se propone la captación y almacenamiento de agua de lluvia mediante la construcción de aljibes, tanques y pequeñas represas que permitan almacenar los excedentes estacionales y destinarlos al

riego de apoyo eficiente (por goteo o microaspersión) para asegurar la supervivencia de los proyectos de restauración y los cultivos. Paralelamente, en las zonas donde la aridez se combina con excedentes puntuales de agua por lluvias torrenciales, es necesario diseñar estructuras de disipación y conducción segura para evitar que la escorrentía concentrada cause erosión, transformando así una amenaza en un recurso.

- **Ordenamiento Territorial y Gobernanza con Enfoque de Cuenca**

La planificación a escala de cuenca es indispensable para la sostenibilidad de las intervenciones. Los hallazgos de este estudio deben integrarse formalmente en la revisión y actualización de los POMCA (Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas), sirviendo como base científica para una zonificación ambiental precisa. Esta zonificación debe definir áreas de protección y restauración prioritaria, así como establecer prácticas de uso sostenible obligatorias en zonas de alta susceptibilidad. Este marco regulatorio debe ir acompañado de una firme labor de educación y capacitación a comunidades y productores, demostrando los beneficios de las prácticas conservacionistas, y de un control efectivo de actividades degradantes como la minería, exigiendo planes de manejo ambiental con medidas de compensación y mitigación.

- **Establecimiento de un Sistema de Monitoreo Continuo y Alertas Tempranas**

Para garantizar la efectividad de las estrategias y permitir ajustes oportunos, es vital implementar un sistema de monitoreo permanente. Este sistema debe basarse en el análisis periódico de imágenes satelitales (NDVI) para rastrear los cambios en la cobertura vegetal y detectar nuevas áreas de degradación de manera temprana. De forma complementaria, se recomienda la actualización bianual del modelo RUSLE para cuantificar objetivamente el impacto de las medidas implementadas sobre las tasas de erosión, permitiendo reorientar los recursos y esfuerzos hacia las áreas o estrategias que más lo necesiten, asegurando así una gestión adaptativa y basada en evidencia.

## 9. Referencias

- Abbondanza, S. C. (2019). Cambios en la cobertura vegetal y erosión del suelo en Sierras Chicas – Córdoba, en el periodo 2005-2017: aproximaciones desde el modelo RUSLE con base en la teledetección. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/17655>
- Alaska Satellite Facility. (2015). ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected High-Resolution data (Version 1). NASA Earthdata. <https://doi.org/https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>
- Ángel Daniel Peralta Umatambo. (2015). APLICACIÓN DEL MODELO RUSLE PARA EL CÁLCULO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA MICROCUENCA RÍO CUBÍ. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/7258/1/T-UCE-0004-42.pdf>
- Arnoldus, H. (1977). Methodology used to determine the maximum average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. In *Assessing Soil Degradation* (34th ed., pp. 34–51). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/ar114e/ar114e.pdf>
- Avila, H. F., & Avila, B. D. (2015). Spatial and temporal estimation of the erosivity factor R based on daily rainfall data for the department of Atlántico, Colombia. *Ingeniería e Investigación*, ISSN 0120-5609, ISSN-e 2248-8723, Vol. 35, No. 2, 2015, Págs. 23-29, 35(2), 23–29. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5158014>
- Baye Terefe, T., Melese, T., Tsegaye, A., Afework, A., Yibeltal, T., Anagaw, A., ... Mencho, B. (2025). Soil loss estimation in Ethiopia: A comprehensive review of the RUSLE model integrated with geospatial technologies. *Journal of Sustainable Land Management*. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01037-8>
- Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerdà, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., De Girolamo, A. M., Gessesse, G. D., Deumlich, D., Diodato, N., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., ... Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of The Total Environment*, 780, 146494. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.146494>
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., ... Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>

- Calero, D., Martínez, C., & Menjívar, J. C. (2021). Evaluación de modelos para estimar la erosividad de la lluvia en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agronómica*, 70(2), 198–210. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n2.95115>
- Camargo, C., Pacheco, C., & López, R. (2017). Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. *Gestión y Ambiente*, 20(2), 265–280. [https://doi.org/10.15446/ga.v20n2.\\_\\_\\_\\_\\_](https://doi.org/10.15446/ga.v20n2._____)
- Cardoso, D., Avanzi, J., Ferreira, D., Acuña Guzmán, S., Silva, M., Pires, F., & Curi, N. (2022). Rainfall erosivity estimation: Comparison and statistical assessment among methods using data from Southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcv20210122>
- Castro Quintero, A. F., Lince Salazar, L. A., & Riaño Melo, O. (2017). Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia. *RIAA*, ISSN-e 2145-6453, Vol. 8, No. 1, 2017, Págs. 17-26, 8(1), 17–26. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6285724&info=resumen&idioma=SPA>
- Cerretelli, S., Castellanos, E., González-Mollinedo, S., Lopez, E., Ospina, A., & Hagggar, J. (2023). A scenario modelling approach to assess management impacts on soil erosion in coffee systems in Central America. *CATENA*, 228, 107182. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2023.107182>
- Cevallos Alvarado, M. J. (2020). Determinación del flujo de sedimentos y susceptibilidad a erosión, mediante sistemas de información geográfica y teledetección, en la cuenca del río Chone. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/49922>
- Chowdhury, M. S. (2023). Modelling hydrological factors from DEM using GIS. *MethodsX*, 10, 102062. <https://doi.org/10.1016/J.MEX.2023.102062>
- Cordero Rebolledo Helmer. (2022). Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el Cálculo del Índice de Erosión Usando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) en la Cuenca del Río de Oro del Municipio de Girón, Santander. <https://repositorio.udes.edu.co/server/api/core/bitstreams/39183e57-6eec-4fc2-b61d-32c5d1e492b3/content>
- da Silva, B. A., Giongo, P. R., Martins, P. T. de A., Barbosa, T. A., Moraes, V. H., Cavalcante, T. J., & Giongo, A. M. M. (2019). Soil erosion vulnerability in the southern part of the meia ponte watershed, Goias, Brazil. *Idesia*, 37(2), 81–86. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000200081>

- Daniel Francisco Jaramillo Jaramilo. (2002). INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/70085/70060838.2002.pdf?sequen>
- Durigon, V. L., Carvalho, D. F., Antunes, M. A. H., Oliveira, P. T. S., & Fernandes, M. M. (2014). NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. <Http://Dx.Doi.Org/10.1080/01431161.2013.871081>, 35(2), 441–453. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.871081>
- FAO. (2019). Mensajes clave sobre la erosión del suelo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/about/meetings/soil-erosion-symposium/key-messages/es>
- FAO. (2019, 19 de mayo). Detengamos la erosión del suelo para garantizar la seguridad alimentaria en el futuro. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/newsroom/story/Let-s-StopSoilErosion-to-ensure-a-food-secure-future/es>
- FAO. (2020). Soil erosion is defined as the accelerated removal of topsoil from the land surface through water, wind and tillage (Global Symposium on Soil Erosion). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2021). The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point (SOLAW 2021). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>
- FAO. (2024). Estado de la degradación del suelo por erosión hídrica en tierras agrícolas. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Fernando Avecilla, Juan Esteban Panebianco, & Daniel Eduardo Buschiazzo. (2019). Erosión eólica y emisión de pm10 en dos suelos agrícolas de la provincia de La Pampa, Argentina. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672019000200002](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672019000200002)
- George K, J., Kumar, S., & Hole, R. M. (2021). Geospatial modelling of soil erosion and risk assessment in Indian Himalayan region—A study of Uttarakhand state. *Environmental Advances*, 4, 100039. <https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2021.100039>

- Getu, L. A., Nagy, A., & Addis, H. K. (2022). Soil loss estimation and severity mapping using the RUSLE model and GIS in Megech watershed, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 8, 100560. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2022.100560>
- Golkarian, A., Khosravi, K., Panahi, M., & Clague, J. J. (2023). Spatial variability of soil water erosion: Comparing empirical and intelligent techniques. *Geoscience Frontiers*, 14(1), 101456. <https://doi.org/10.1016/J.GSF.2022.101456>
- Helmi, A. M. (2023). Quantifying catchments sediment release in arid regions using GIS-based Universal soil loss equation (USLE). *Ain Shams Engineering Journal*, 14(8), 102038. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2022.102038>
- IECA Iberoamérica. (2019, 22 de abril). Erosión de suelos en Colombia. IECA Iberoamérica. <https://iecaiberoamerica.org/erosion-de-suelos-en-colombia>
- IECA Iberoamérica. (2022, 12 de agosto). El recurso subestimado: el suelo y su importancia para el desarrollo sostenible. *Dato Ciencia*. <https://datociencia.com/el-recurso-subestimado-el-suelo-y-su-importancia-para-el-desarrollo-sostenible>
- IGAC & MADS. (2025, 1 de julio). Colombia ya cuenta con ‘salvavidas’ para el suelo, un recurso natural que también puede agotarse. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. <https://antiguo.igac.gov.co/es/noticias/colombia-ya-cuenta-con-salvavidas-para-el-suelo-un-recurso-natural-que-tambien-puede>
- Instituto de Hidrología, M. y E. A.-I., Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS, & Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales - U.D.C.A. (2015). Estudio Nacional de la Degradación de Suelos por Erosión en Colombia 2015. <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=38114>
- Jirasirichote, A., Ninsawat, S., Shrestha, S., & Tripathi, N. K. (2021). Performance of AnnAGNPS model in predicting runoff and sediment yields in Nan Province, Thailand. *Heliyon*, 7(11), e08396. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E08396>
- Juan Cruz Colazo, & Daniel Eduardo Buschiazzo. (2022). REMOCIÓN DE CARBONO ORGÁNICO, NITRÓGENO Y FÓSFORO POR EROSIÓN EÓLICA EN UN HAPLUSTOL ÉNTICO. *Suelo*, 40(1), 59–66. <https://www.suelos.org.ar/publicaciones/Volumen40n1/685-FINAL%20Texto%20del%20art%C3%ADculo-4051-1-6-20220321.pdf>

- La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. (2016). Estado Mundial del Recurso Suelo. [www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)
- Lamane, H., Moussadek, R., Baghdad, B., Mouhir, L., Briak, H., Laghlimi, M., & Zouahri, A. (2022). Soil water erosion assessment in Morocco through modeling and fingerprinting applications: A review. *Heliyon*, 8(8), e10209. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E10209>
- Lince, A., & Castro, A. (2015). EROSIVIDAD DE LA LLUVIA EN LA REGIÓN CAFETERA DE QUINDÍO, COLOMBIA. *Cenicafe*, 66(1), 25–31. [www.cenicafe.org/es/publications/3.Erosividad\\_25-31.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/3.Erosividad_25-31.pdf)
- Liu, X., Bao, Y., Wang, Y., Zhang, D., Hu, M., Wu, X., Wen, J., Li, S., & Sun, M. (2023). Spatiotemporal variation characteristics of sediment nutrient load from the soil erosion of the Yangtze River Basin of China from 1901 to 2010. *Ecological Indicators*, 150, 110206. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2023.110206>
- Liu, X., Xin, L., & Lu, Y. (2021). National scale assessment of the soil erosion and conservation function of terraces in China. *Ecological Indicators*, 129, 107940. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107940>
- Martinez, C., Menjivar, J. C., & Calero, D. (2023). Estimation of soil losses due to water erosion in the Dagua River Basin, Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, 26(4), 271–278. <https://doi.org/10.15446/esrj.v26n4.103275>
- Masroor, M., Sajjad, H., Rehman, S., Singh, R., Hibjur Rahaman, M., Sahana, M., Ahmed, R., & Avtar, R. (2022). Analysing the relationship between drought and soil erosion using vegetation health index and RUSLE models in Godavari middle sub-basin, India. *Geoscience Frontiers*, 13(2), 101312. <https://doi.org/10.1016/J.GSF.2021.101312>
- Medina, Y. O. (2023). Estimación y análisis comparativo de las islas de calor urbano en los municipios de el Cerrito y Palmira en el Valle del Cauca [Universidad de Manizales]. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/7178>
- Medjani, F., Derradji, T., Zahi, F., Djidel, M., Labar, S., & Bouchagoura, L. (2023). Assessment of soil erosion by Universal Soil Loss Equation model based on Geographic Information System data: a case study of the Mafragh watershed, north-eastern Algeria. *Scientific African*, 21, e01782. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2023.E01782>

- Meinen, B. U., & Robinson, D. T. (2021). From hillslopes to watersheds: Variability in model outcomes with the USLE. *Environmental Modelling & Software*, 146, 105229. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2021.105229>
- Mejía, J., Pino-Vargas, E., Guevara-Pérez, E., Olivos-Alvites, V., & Condori-Ventura, M. (2021). Predicción espacial de la erosión del suelo en zonas áridas mediante teledetección. Estudio de caso: Quebrada del Diablo, Tacna, Perú. *Revista Ingeniería UC*, 28(2), 252–264. <https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i2.24>
- Meléndez, I., Gómez, I., Navarro-Pedreño, J., & Koch, M. (2020). Erosión y desertificación.-Análisis de series temporales de vegetación obtenidas mediante teledetección como herramienta para el seguimiento de procesos de desertificación. *Congreso Internacional Sobre Desertificación*. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/97485>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2025). Erosión del suelo: causas, impactos y acciones de mitigación. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2592-40-del-territorio-colombiano-presenta-algun-grado-de-degradacion-de-suelos-por-erosion>
- Mohammed, S., Hussien, M., Alsafadi, K., Mokhtar, A., Rianna, G., Kbibo, I., Barkat, M., Talukdar, S., Szabó, S., & Harsanyi, E. (2021). Assessing the WEPP model performance for predicting daily runoff in three terrestrial ecosystems in western Syria. *Heliyon*, 7(4), e06764. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E06764>
- Molina Luna, K. M. (2019). Teledetección multitemporal para la determinación de suelos degradados en el distrito de Palpa 2019. *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/91906>
- Moreira, J. M., Rodríguez Surián, M., & Ojeda Zújar, J. (2020). Aportaciones de la teledetección y los SIG para la mejora de los modelos de evaluación de las pérdidas de suelo en Andalucía. *Congreso Internacional Sobre Desertificación*. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/89270>
- Morgan, R. P. C. (Royston P. C. (1995). *Soil erosion and conservation*. <https://archive.org/details/soilerosionconse0000morg/mode/2up>
- Muñoz, F. A., Rengifo, I. Y., & Toro, O. A. (2022). Modelo USLE para estimar la erosión hídrica en siete municipios de la zona andina colombiana. *Biociencia En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(2), 1–13. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v20.n2.2022.1738>

- Nepal, S., Tripathi, S., & Adhikari, H. (2021). Geospatial approach to the risk assessment of climate-induced disasters (drought and erosion) and impacts on out-migration in Nepal. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 59, 102241. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2021.102241>
- Okenmuo, F. C., & Ewemoje, T. A. (2023). Estimation of soil water erosion using RUSLE, GIS, and remote sensing in Obibia River watershed, Anambra, Nigeria. *DYSONA - Applied Science*, 4(1), 6–14. <https://doi.org/10.30493/DAS.2022.349144>
- OPS. (2022). Contaminación del aire y salud. Organización Panamericana de la Salud (OPS). <https://www.paho.org/es/temas/contaminacion-aire-salud>
- Pandey, S., Kumar, P., Zlatic, M., Nautiyal, R., & Panwar, V. P. (2021). Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed. *International Soil and Water Conservation Research*, 9(3), 305–318. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2021.03.001>
- Patriche, C. V. (2023). Applying RUSLE for soil erosion estimation in Romania under current and future climate scenarios. *Geoderma Regional*, 34, e00687. <https://doi.org/10.1016/J.GEODRS.2023.E00687>
- Peng, X., Wang, S., Chen, J., Zhou, H., Li, Y., & Zhang, L. (2024). Three-band spectral indices for accurate prediction of soil organic carbon and total nitrogen. *Discover Applied Sciences*, 4, 1–11.
- Räsänen, T. A., Tähtikarhu, M., Uusi-Kämpä, J., Piirainen, S., & Turtola, E. (2023). Evaluation of RUSLE and spatial assessment of agricultural soil erosion in Finland. *Geoderma Regional*, 32, e00610. <https://doi.org/10.1016/J.GEODRS.2023.E00610>
- Restrepo Estrada, C., & Alviar Ramírez, M. (2013). Usos óptimos del suelo bajo enfoques ambientales y económicos. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia* N, 69, 229–243. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-62302013000400019](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302013000400019)
- Rong, Y., Li, K., Guo, J., Zheng, L., Luo, Y., Yan, Y., Wang, C., Zhao, C., Shang, X., & Wang, Z. (2022). Multi-scale spatio-temporal analysis of soil conservation service based on MGWR model: A case of Beijing-Tianjin-Hebei, China. *Ecological Indicators*, 139, 108946. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2022.108946>
- Saha, S., Sarkar, D., & Mondal, P. (2022). Assessing and mapping soil erosion risk zone in Ratlam District, central India. *Regional Sustainability*, 3(4), 373–390. <https://doi.org/10.1016/J.REGSUS.2022.11.005>

- Saikh, N. I., & Mondal, P. (2023). Gis-based machine learning algorithm for flood susceptibility analysis in the Pagla river basin, Eastern India. *Natural Hazards Research*. <https://doi.org/10.1016/J.NHRES.2023.05.004>
- Salgado, C. N., & Porras, M. V. (2021). Planteamiento De Estrategias Para El Manejo De Zonas Vulnerables A Erosión En La Cuenca Del Rio Bogotá Con El Método Rusle Por Medio De Herramientas SIG. <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/3379>
- Sánchez, Y. (2021). Estudio geoambiental del Valle del Jerte aplicado a los riesgos de erosión: teledetección y sig. 1. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=304885>
- Sinshaw, B. G., Belete, A. M., Tefera, A. K., Dessie, A. B., Bizuneh, B. B., Alem, H. T., Atanaw, S. B., Eshete, D. G., Wubetu, T. G., Atinkut, H. B., & Moges, M. A. (2021). Prioritization of potential soil erosion susceptibility region using fuzzy logic and analytical hierarchy process, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Water-Energy Nexus*, 4, 10–24. <https://doi.org/10.1016/J.WEN.2021.01.001>
- Taye, G., Teklesilassie, T., Teka, D., & Kassa, H. (2023). Assessment of soil erosion hazard and its relation to land use land cover changes: Case study from alage watershed, central Rift Valley of Ethiopia. *Heliyon*, 9(8), e18648. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E18648>
- TENG, H. fen, HU, J., ZHOU, Y., ZHOU, L. qing, & SHI, Z. (2019). Modelling and mapping soil erosion potential in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(2), 251–264. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62045-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62045-3)
- UNDRR. (2021). Soil Degradation. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). <https://www.undrr.org/understanding-disaster-risk/terminology/hips/gh0402>
- Universidad Autónoma Chapingo. (2018). XIV Congreso Nacional Sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas. [https://congresorebiza.mx/wp-content/uploads/2019/11/REBIZA\\_2018.pdf#page=65](https://congresorebiza.mx/wp-content/uploads/2019/11/REBIZA_2018.pdf#page=65)
- Wang, J., Lu, P., Valente, D., Petrosillo, I., Babu, S., Xu, S., Li, C., Huang, D., & Liu, M. (2022). Analysis of soil erosion characteristics in small watershed of the loess tableland Plateau of China. *Ecological Indicators*, 137, 108765. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2022.108765>
- Wang, J., Zhen, J., Hu, W., Chen, S., Lizaga, I., Zeraatpisheh, M., & Yang, X. (2023). Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(3), 429–454. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2023.03.002>

- Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning* - Walter H. Wischmeier, Dwight David Smith - Google Libros (537th ed.). Science and Education Administration.
- [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=rRAUAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=Predicting+Rainfall+Erosion+Losses.+A+guide+to+conservation+planning&ots=cvtnvPop\\_X&sig=ORRTbGXXIQViWKIZV-JUfj8xIJ4&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Predicting%20Rainfall%20Erosion%20Losses.%20A%20guide%20to%20conservation%20planning&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=rRAUAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=Predicting+Rainfall+Erosion+Losses.+A+guide+to+conservation+planning&ots=cvtnvPop_X&sig=ORRTbGXXIQViWKIZV-JUfj8xIJ4&redir_esc=y#v=onepage&q=Predicting%20Rainfall%20Erosion%20Losses.%20A%20guide%20to%20conservation%20planning&f=false)
- Yang, M., Yang, Q., Zhang, K., Wang, C., Pang, G., & Li, Y. (2023). Effects of soil rock fragment content on the USLE-K factor estimating and its influencing factors. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(2), 263–275. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2022.07.003>
- Zhang, Q., Qin, W., Ding, L., Cao, W., Xu, H., Liu, Q., & Shi, C. (2023). Impact of land use/cover change (LUCC) on sediment connectivity in small watersheds based on a revised index algorithm. *Geoderma*, 438, 116622. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2023.116622>
- Zulaica, L., Vazquez, P., & Daga, D. (2020). Transformaciones territoriales en el periurbano hortícola de Mar del Plata (Argentina) y su incidencia en los procesos de erosión hídrica Territorial transformations in the peri-urban horticultural area of Mar del Plata (Argentina) and its incidence on water erosion processes. 75, 179–200. <https://www.scielo.cl/pdf/rgeong/n75/0718-3402-rgeong-75-179.pdf>

## Anexos

### 1. Script de RStudio

```
#install.packages(c("sf", "raster", "sp", "rgdal", "rgeos", "rasterVis", "terra", "ggplot2", "factoextra"))

#install.packages("tidyverse")

#update.packages("raster", dependencies = TRUE)

#update.packages("sp", dependencies = TRUE)

library(sf)

library(raster)

library(sp)

library(rgdal)

library(rgeos)

library(rasterVis)

library(terra)

library(ggplot2)

library(factoextra)

library(tidyverse)

library(RColorBrewer)

# Carpeta de trabajo

setwd("D:/RASTER/IMAGENES")

# Cargar shapefile y transformar a sf
```

```

shapefile_path <- "D:/SHP/Area_Trabajo_Buffer100m.shp"

lc <- shapefile(shapefile_path)

# Proyección Magna Colombia

magna_colombia_proj <- "+proj=tmerc +lat_0=4 +lon_0=-
73 +k=0.9992 +x_0=5000000 +y_0=2000000 +ellps=GRS80 +towgs84=0,0,0,0,0,0 +units=m +no_defs
"

# Transformar shapefile a sf con proyección Magna

lc_sf <- st_as_sf(lc)

lc_proj <- st_transform(lc_sf, crs = magna_colombia_proj)

# Calibración radiométrica

layer_calibrated <- radiometric(lc_proj, calibration_image)

# Listar carpetas con imágenes Sentinel-2

subcarpetas <- list.dirs(getwd(), recursive = FALSE)

# Crear carpetas de salida si no existen

dir.create("NDVI_TIFF", showWarnings = FALSE)

dir.create("NDVI_PNG", showWarnings = FALSE)

# Función para procesar cada carpeta

procesar_carpeta <- function(sub) {

  nombre <- basename(sub)

  cat("🔄 Procesando:", nombre, "\n")

  # Buscar bandas 4 y 8

```

```
banda_4 <- list.files(sub, pattern = "B04.*\\.tif$", full.names = TRUE)
```

```
banda_8 <- list.files(sub, pattern = "B08.*\\.tif$", full.names = TRUE)
```

```
if (length(banda_4) == 0 | length(banda_8) == 0) {
```

```
  cat(" ⚠ No se encontraron ambas bandas en:", nombre, "\n")
```

```
  return(NULL)
```

```
}
```

```
# Cargar bandas
```

```
red <- raster(banda_4[1])
```

```
nir <- raster(banda_8[1])
```

```
# Recorte y reproyección
```

```
red_crop <- mask(crop(red, lc), lc)
```

```
nir_crop <- mask(crop(nir, lc), lc)
```

```
red_proj <- projectRaster(red_crop, crs = magna_colombia_proj)
```

```
nir_proj <- projectRaster(nir_crop, crs = magna_colombia_proj)
```

```
# Calcular NDVI
```

```
NDVI <- (nir_proj - red_proj) / (nir_proj + red_proj)
```

```
# Reclasificación en 5 clases
```

```
reclasificacion <- matrix(c(
```

```
-Inf, 0.1, 1, # Clases no vegetales
```

```
0.1, 0.15, 2, # Suelo descubierto
```

```
0.15, 0.25, 3, # Vegetación muy abierta
```

```
0.25, 0.40, 4, # Vegetación dispersa
```

```
0.40, 0.60, 5, # Vegetación cerrada
```

```
0.60, Inf, 6 # Vegetación muy densa
```

```
), ncol = 3, byrow = TRUE)
```

```
NDVI_reclasificado <- reclassify(NDVI, reclasificacion)
```

```
# Guardar raster clasificado
```

```
writeRaster(NDVI_reclasificado, filename = file.path("NDVI_TIFF", paste0("NDVI_reclasificado_", nombre, ".tif")),
```

```
format = "GTiff", overwrite = TRUE)
```

```
# Asignación de Colores
```

```
colores_ndvi <- c("#680404", "#D73027", "#FC8D59", "#fff301", "#91CF60", "#005f10")
```

```

# Guardar gráfico

png(file.path("NDVI_PNG", paste0("NDVI_reclasificado_", nombre, ".png")), width = 500, height = 500)

par(mfrow = c(1, 1), mar = c(2, 2, 2, 2))

plot(NDVI_reclasificado,

     col = colores_ndvi,

     breaks = c(1, 2, 3, 4, 5, 6),

     main = paste("NDVI:", nombre),

     legend = FALSE)

legend("topright", legend = c("1: Clases no vegetales", "2: Suelo descubierto", "3: Vegetación muy abierta",

                             "4: Vegetación dispersa", "5: Vegetación cerrada", "6: Vegetación muy densa" ),

     fill = colores_ndvi, cex = 0.8)

dev.off()

cat("☑ NDVI generado y reclasificado para:", nombre, "\n")

}

# Ejecutar para todas las subcarpetas

lapply(subcarpetas, procesar_carpeta)

```