

CARTOGRAFÍA DIGITAL

Ecuación RUSLE

Reflexión espacial sobre el factor R

Estudiante:

Moisés Carvajal Angarita

Docentes:

Kenneth Roy Cabrera Torres

Luis Alberto Arias López

Universidad Nacional de Colombia

Sede Medellín

Facultad de Ciencias

Noviembre 2023

Resumen

La erosividad de la lluvia o Factor R se reconoce como uno de los elementos fundamentales en la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) o en su forma revisada (RUSLE), ya que esta variable tiene la capacidad de estimar de manera directa el potencial erosivo que causa la lluvia en el suelo. Sin embargo, para estimar la erosividad de la lluvia de manera correcta se requieren datos de precipitaciones en intervalos inferiores a los 30 minutos para calcular la intensidad. En Colombia la gran mayoría de datos son registros diarios de precipitaciones, lo que dificulta la estimación de la intensidad de cada tormenta y, por lo tanto, dificulta el estudio de este tipo de modelo de erosión en múltiples zonas.

Para este estudio, se suplirá la falta de datos haciendo uso de un modelo matemático de Wischmeier, que permite determinar la erosividad de la lluvia anual como una relación entre la precipitación media mensual y la anual. Todo esto a partir de registros diarios de precipitaciones de 9 estaciones del IDEAM, que contenían datos entre los años de 2000 a 2019. Los cuales fueron procesados y espacializados en el área de influencia mediante la interpolación tipo Kriging, utilizando un modelo esférico.

Con los mapas continuos de precipitaciones tanto anuales como mensuales se implementó el modelo de Wischmeier, permitiendo establecer correlaciones de estacionalidad climática para los meses del año y categorías a partir de la similitud de las precipitaciones anuales. Del mismo modo, se pudo correlacionar zonas preferenciales de las precipitaciones y en donde tendrán más poder erosivo de acuerdo con las 9 clases obtenidas a partir del cruce de la estacionalidad climática con las categorías de los años.

Tabla de contenido

1. Introducción	4
2. Planteamiento del problema.....	5
2.1. Zona de estudio.....	5
3. Objetivos	6
3.1. General.....	6
3.2. Específicos.....	6
4. Marco teórico	7
5. Metodología	10
5.1. Insumos.....	10
5.2. Reconocimiento de las fórmulas del factor R.....	10
5.3. Procedimiento para productos finales.....	11
6. Resultados	14
6.1. Características de las lluvias divididas en periodos.....	14
6.2. Características del factor R dividido en periodos.	16
7. Conclusiones	18
8. Recomendaciones	19
Referencias	19

1. Introducción

La erosión de suelos es un fenómeno natural que genera efectos perjudiciales para la supervivencia, el progreso y el desarrollo de la humanidad (Wang et al., 1996), pues implica el desprendimiento y transporte de partículas del suelo desde zonas superiores de la cuenca, generando la pérdida de calidad de suelo y disminuyendo drásticamente la productividad de las tierras damnificadas (Fernández et al., 2003). La posterior sedimentación en zonas bajas de la cuenca resultante de la erosión trae consigo cambios morfológicos en los ríos e inconvenientes en construcciones civiles como los embalses de las hidroeléctricas (Galeta et al., 2011).

La erosividad de la lluvia es uno de los factores potenciales que generan erosión del suelo, ya que está asociado al impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo que provoca desprendimiento de partículas y posteriormente fluyen por escorrentía. La erosión de la lluvia se ve afectada principalmente por la intensidad y la energía cinética de la lluvia (Barfield, et al. 1983), sin embargo, se debe tener en cuenta que se ve influenciada por los parámetros del suelo presente y la disposición de la vertiente (Huang, et al. 1983).

Estas variables, se ven reflejadas en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada o también conocida como RUSLE (Renard, et al. 1987), que se basó en modificaciones de la Ecuación de Pérdida de Suelo por sus siglas en inglés USLE (Wischmeier y Smith 1959, 1965, 1978). La RUSLE es una de las ecuaciones más representativas de los tantos procedimientos existentes, ya que logra integrar el modelado espacial de la zona de interés haciendo uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), por lo tanto, es menester establecer el uso de la herramienta GRASS GIS y Arc GIS para su correcta aplicación.

Es importante aclarar que la RUSLE integra la erosividad de la lluvia como factor que depende de la energía cinética total y la intensidad máxima para eventos de lluvias de 30 minutos, lo que correspondería a tener una base de datos que registre como mínimo los eventos de precipitaciones cada 30 minutos. Sin embargo, este tipo de bases de datos no están disponibles en gran parte del mundo, y Colombia no es la excepción, pues para obtener información con intervalos inferiores a 30 minutos se debe requerir al uso de los pluviógrafos y estos están limitados a zonas específicas a lo largo de todo el territorio nacional (Villamizar et al., 2018).

Por lo tanto, se comprenderá la erosividad como una relación de la lluvia mensual respecto a la anual, que es un modelo matemático aproximado planteado por Wischmeier en 1959, haciendo uso de la base de datos nacional de precipitaciones ofrecida por Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

2. Planteamiento del problema

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada es una herramienta valiosa utilizada para evaluar e intentar predecir la erosión del suelo. Uno de sus factores clave es la erosividad de la lluvia, que refleja la influencia de las precipitaciones en el proceso de erosión. Sin embargo, en la mayoría de los casos, se ha intentado simplificar en exceso este factor, modelándolo únicamente a partir de la precipitación media anual.

El enfoque empleado puede resultar insuficiente y poco preciso, ya que ignora la variabilidad de las precipitaciones a lo largo del año. La lluvia no solo difiere en cantidad, sino también en intensidad y frecuencia. Esto plantea un problema de relevancia, debido a que se puede llegar a subestimar o sobrestimar la erosión del suelo, lo que puede tener consecuencias en la planificación de la conservación del suelo y la gestión de cuencas.

Es relevante comprender el fenómeno de la erosividad de la lluvia de una manera más precisa, teniendo en cuenta aspectos como la distribución espacial y temporal sobre el área de influencia de la cuenca del Río Mendarco, este se encuentra entre los municipios de Chaparral y Rioblanco en el departamento del Tolima.

Con el fin de abordar la problemática planteada, se utilizará el modelo matemático de erosividad de la lluvia mensual desarrollado por Wischmeier y Smith en 1958, que considera la relación entre las precipitaciones mensuales y las precipitaciones anuales. Se realiza esta consideración debido a la falta de datos pluviográficos en el área analizada por parte del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), lo que obliga a trabajar con los datos de precipitaciones diarias.

2.1. Zona de estudio

La zona de interés está localizada en el área de influencia del río Mendarco, la cual se encuentra geográficamente al sur del departamento del Tolima, exactamente en la jurisdicción de los municipios de Chaparral y Rioblanco (Figura 1). La cuenca limita al norte con la cuenca del Río Amoya, al sur con la cuenca mayor del río Saldaña, al oriente con la cuenca del río Guanábano y al oeste con la cuenca del río Anamichú.

Las precipitaciones varían entre 2500 y 3900 mm anuales en promedio, con temperaturas que oscilan desde muy húmedas y frías en las zonas altas y medias de la cuenca, hasta cálidas y secas en las zonas bajas.

Además de estas variaciones climáticas, la región presenta una diversidad topográfica notable. Hacia el oeste, se encuentra la imponente Cordillera Central, que influye significativamente en los patrones climáticos locales. Por otro lado, al este, se extiende la Cuenca del Río Magdalena, desempeñando un papel crucial en la distribución de las precipitaciones.

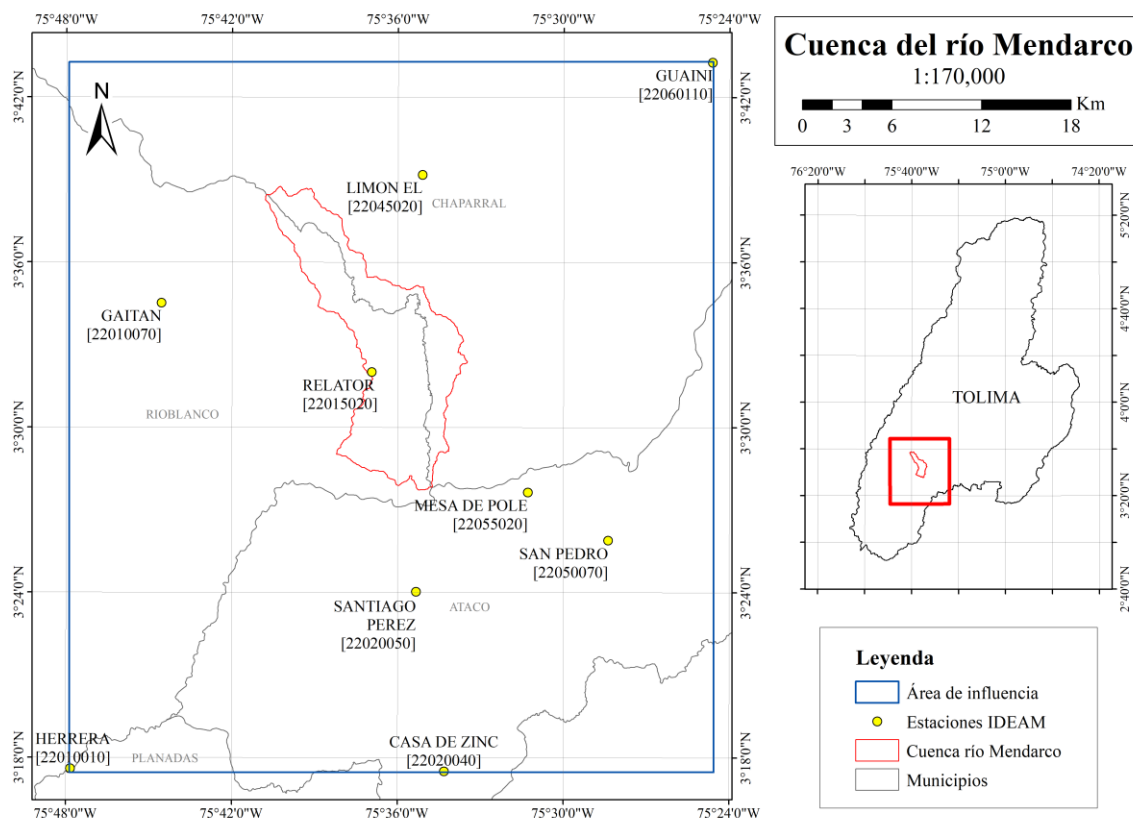


Figura 1. Zona de estudio. Fuente propia.

3. Objetivos

3.1. General

Propiciar un análisis de la distribución espacial de la erosividad de la lluvia en función de periodos de invierno y verano.

3.2. Específicos

- Comprender la topografía de la zona de estudio.
- Identificar patrones de distribución de las precipitaciones anuales.
- Establecer periodos de invierno y verano, para generar una mejor correlación entre los datos de precipitación.
- Entender la relación entre la capacidad erosiva de la lluvia en función de los periodos de invierno y verano.

4. Marco teórico

4.1. Erosión del suelo y sus implicaciones

La erosión de los suelos se define como la pérdida físico-mecánica del suelo, con afectación en sus funciones y servicios ecosistémicos, que produce, entre otras, la reducción de la capacidad productiva de los mismos (Lal, 2001). Sus orígenes, tanto naturales como antropogénicos, abarcan desde fenómenos climáticos extremos hasta actividades humanas irresponsables, como la explotación agrícola insostenible o la deforestación descontrolada. Estos desencadenantes alteran la estabilidad de los suelos, exponiéndolos a procesos erosivos y afectando su estructura y composición.

Las consecuencias de la erosión del suelo son profundamente impactantes, tanto a nivel ambiental como socioeconómico. Es un proceso de degradación que disminuye la productividad agrícola, degrada las funciones de los ecosistemas, amplifica el riesgo hidrológico, como los deslizamientos de tierra o las inundaciones, causa pérdidas significativas de biodiversidad, daña la infraestructura urbana y, en casos graves, conduce al desplazamiento de las poblaciones humanas (FAO, 2015).

El proceso erosivo, al ser multifacético en sus causas y consecuencias, representa un desafío fundamental para la sostenibilidad ambiental y la estabilidad socioeconómica. En este contexto, la comprensión y gestión adecuada de la erosividad de la lluvia, adquiere una relevancia crucial para abordar los impactos de la erosión del suelo de manera más precisa y efectiva.

4.2. Erosividad de la lluvia

La erosividad de la lluvia es una capacidad potencial de erosión del suelo, refleja la influencia de las características de la lluvia en la erosión del suelo. Está principalmente relacionada con la cantidad de lluvia, la duración de la lluvia, la intensidad de la lluvia y la energía cinética de la lluvia (Wu, Liu & Ma, 2016).

La cantidad de lluvia, uno de los elementos fundamentales de la erosividad pluvial, se refiere a la medida volumétrica del agua precipitada en un intervalo de tiempo específico. La duración de la lluvia, correlacionada estrechamente con la cantidad, se focaliza en el periodo temporal durante el cual se manifiesta la precipitación. La intensidad pluvial, otro elemento crítico, indica la velocidad a la cual se precipita el agua por unidad de tiempo y área, siendo un factor determinante en la generación de impacto erosivo.

Además, la energía cinética inherente a la lluvia es un aspecto crucial en la erosividad pluvial. Esta energía, resultado de la combinación entre la gravedad y la velocidad de las gotas de lluvia, incide directamente en su capacidad para desplazar partículas del suelo, siendo un componente esencial en la evaluación de su poder erosivo.

La interacción entre estos elementos determina la complejidad de la erosividad de la lluvia y su influencia en la erosión del suelo. La variabilidad en estas características pluviométricas no solo afecta la magnitud del impacto erosivo, sino que también modela la distribución espacial y

temporal de la erosión, convirtiéndose en un componente esencial para entender los procesos de degradación del suelo en diferentes contextos geográficos y climáticos.

4.3. Modelos y herramientas existentes

4.3.1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)

Constituye un pilar fundamental en la evaluación de la erosión del suelo, al proveer un marco integral para comprender y predecir la pérdida de suelo en distintos escenarios ambientales. Esta herramienta, desarrollada como una evolución de la Ecuación de Pérdida de Suelo por sus siglas en inglés USLE, integra múltiples variables que interactúan en el proceso erosivo.

La importancia de la RUSLE (Renard, et al. 1987), radica en su capacidad para considerar diversos factores que influyen en la erosión del suelo, lo que la convierte en una herramienta de gran utilidad para evaluar los riesgos erosivos y diseñar estrategias de conservación. Su formulación incorpora parámetros relacionados con la erosividad de la lluvia, los atributos climáticos y las características del suelo, permitiendo estimar la erosión en función de la interacción entre estos elementos.

Este modelo, en particular, destaca por su capacidad para incorporar la erosividad de la lluvia como uno de sus componentes fundamentales. La influencia de la lluvia en el proceso erosivo se representa a través del factor "R" en la ecuación, el cual refleja la capacidad erosiva de las precipitaciones sobre el suelo. La ecuación se expresa como:

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

Donde:

A = tasa de erosión por unidad de área. ($Ton * Ha^{-1}$)

R = erosividad de la lluvia. ($MJ * mm * Hour^{-1} * Ha^{-1} * Year^{-1}$)

K = erodabilidad del suelo. ($Mg * Ha * Hour * Ha^{-1} * MJ^{-1} * mm^{-1} * Year^{-1}$)

LS = pendiente y longitud de la vertiente.

C = cobertura de suelo.

P = prácticas de conservación.

La erodabilidad de la lluvia no es una variable constante a lo largo del año, ya que depende del régimen pluviométrico anual promedio para una zona específica. Originalmente, el factor R se basó en la suma de la erosividad de tormentas individuales mayores a 12.5 mm, o tormentas mayores a 6 mm que tengan una duración mayor a 15 minutos.

Este factor se integra considerando la cantidad, la intensidad, la duración y la energía cinética de la lluvia, aspectos cruciales que determinan su poder erosivo. Se expresa como:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^m (E)(I_{30})_k \right]$$

Donde:

E = energía cinética total de la tormenta. ($MJ * Ha^{-1}$)

I_{30} = intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos. ($mm * h^{-1}$)

j = contador para cada año utilizado para realizar el promedio.

k = contador del número de tormentas del año.

m = número de tormentas en cada año.

n = número de años utilizados para obtener el factor R promedio.

Sin embargo, a pesar de su utilidad, la RUSLE presenta limitaciones que deben considerarse al aplicarla. La precisión de los resultados obtenidos puede variar debido a la complejidad y dinámica inherente de los procesos erosivos de cada región, así como a la necesidad de datos detallados y precisos sobre las variables climáticas y del suelo. Además, la modelización espacial y temporal precisa de la erosión a través de la RUSLE puede ser desafiante en áreas donde la disponibilidad de datos es limitada o donde existen cambios rápidos en el uso del suelo.

4.4. Dificultades en la medición de la erosividad de la lluvia

La medición precisa de la erosividad de la lluvia se enfrenta a desafíos significativos que dificultan su evaluación detallada y precisa. Uno de los principales obstáculos radica en la carencia de datos precisos de precipitación en intervalos cortos, particularmente aquellos menores a 30 minutos. La falta de registros detallados en estos intervalos temporales limita la capacidad de comprender la variabilidad de la intensidad de la lluvia, un factor crucial en la determinación de su capacidad erosiva. Esta limitación obstaculiza la representación fiel de la erosividad pluvial en modelos como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), que requiere información detallada y precisa para ofrecer evaluaciones acertadas de la erosión del suelo (Villamizar et al., 2018).

5. Metodología

5.1. Insumos

Para este trabajo, se utilizaron datos de precipitaciones diarias con temporalidad de 20 años, específicamente entre los años del 2000 al 2019. Los cuales fueron obtenidos gracias al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en su portal de [información hidrometeorológica](#) en el apartado específico de “Precipitación Nacional Diaria”.

Se utilizaron estaciones que cumplieran el requisito de los 20 años, sin embargo, no se logró cubrir la densidad espacial adecuada por limitaciones de los datos. Las estaciones utilizadas se pueden visualizar en la Figura 2.

Nombre	Código	Altitud	Latitud	Longitud	X	Y	Departamento	Municipio
CASA DE ZINC [22020040]	22020040	1737	3.286	-75.588	855856.565	833900.871	Tolima	Ataco
GAITAN [22010070]	22010070	1568	3.577	-75.743	887277.347	814981.653	Tolima	Rioblanco
GUAINI [22060110]	22060110	746	3.718	-75.424	903367.399	851934.759	Tolima	Chaparral
HERRERA [22010010]	22010010	1620	3.288	-75.815	856079.621	808830.037	Tolima	Rioblanco
LIMON EL [22045020]	22045020	130	3.652	-75.584	895849.864	832492.695	Tolima	Chaparral
MESA DE POLE [22055020]	22055020	699	3.456	-75.536	874553.510	839526.149	Tolima	Ataco
RELATOR [22015020]	22015020	1160	3.529	-75.631	882623.232	829070.037	Tolima	Rioblanco
SAN PEDRO [22050070]	22050070	1679	3.426	-75.487	871320.732	844906.982	Tolima	Ataco
SANTIAGO PEREZ [22020050]	22020050	732	3.395	-75.605	867892.399	832030.871	Tolima	Ataco

Figura 2. Estaciones utilizadas. Elaboración propia.

Todos los datos se pueden visualizar en GitHub, en el repositorio “[Cartografía Digital](#)”. Los datos suministrados por el IDEAM se compilaron en el Excel “[Datos Estaciones](#)”, lo cual fue la información fundamental para realizar este estudio.

5.2. Reconocimiento de las fórmulas del factor R

El factor R es función de las propiedades físicas de las precipitaciones y refleja la capacidad potencial de que el suelo sea erosionado por la lluvia. La gran mayoría de países carece de los datos de intensidad de lluvia con la temporalidad requerida, pues es necesario un muestreo de datos entre los 2 y 30 minutos para lograr generar el factor R de acuerdo con la definición original.

Múltiples autores han intentado estimar el factor de erosividad de la lluvia con los datos disponibles en su región, llegando así a utilizar una simplificación incoherente de la precipitación media anual, lo que enmascara el componente de intensidad, el cual es un elemento fundamental al momento de comprender la relación entre la precipitación y las partículas de suelo. Es importante entender, que la afectación que se produce por un evento de precipitaciones con poca intensidad y mucha duración será diferente de uno con mucha intensidad y poca duración. Sin embargo, existen otros algoritmos que permiten relacionar la precipitación media anual con precipitaciones mensuales promedios, semestrales promedios, entre otros; lo que podría considerarse como una aproximación más adecuada al tipo de fenómeno estudiado, permitiendo realizar acercamientos previos a realización de campañas de campo.

En particular, se utilizará el modelo matemático realizado por Wischmeier en 1959, que permite determinar la erosividad anual de la lluvia como una relación entre la precipitación media mensual y la precipitación anual, como se muestra a continuación.

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 * 10^{\left[1.5 * \log \left(\frac{\left(\frac{P_i}{25.4} \right)^2}{Pa} \right) - 0.8188 \right]} * 17.02 * 10000$$

En donde:

R = erosividad anual de la lluvia. ($100ft * Ton * in * acre^{-1} * Hour^{-1} * Year^{-1}$)

P_i = precipitación media mensual, va desde enero hasta diciembre. (mm)

Pa = precipitación media anual. (mm)

En este caso, es posible determinar la erosividad de la lluvia tanto anual como mensual, lo cual es relevante para comprender como varía este factor mes a mes.

5.3. Procedimiento para productos finales

De los datos obtenidos del IDEAM ([Datos Estaciones](#)) se realizó un preprocesamiento de datos haciendo uso de programación en [Python](#), y [GitHub](#) para almacenar la información relevante. Primeramente, se realizan filtros para seleccionar la información de interés de la base de datos, como lo son la selección de los años del 2000 al 2019 y las estaciones de interés estipuladas en [Estaciones Utilizadas](#).

Luego, para conocer un poco más sobre la información estudiada, se generó una gráfica de las precipitaciones mensuales promedio de los 12 meses del año, a partir de un ajuste polinómico de los promedios y desviaciones estándar de los datos de cada estación, como se aprecia en la Figura 3.

Este análisis temporal permite visualizar cómo se comportan las precipitaciones promedio mensuales, logrando percibir tendencias continuas a lo largo de los meses, coincidiendo tanto en forma como en valores de precipitaciones. En general, se pueden distinguir 3 etapas a lo largo del año, dos de invierno y una de verano. Las etapas de invierno regularmente presentan precipitaciones superiores a los 200 mm y la etapa de verano conserva una gráfica más plana y con precipitaciones inferiores a los 200 mm.

La primera etapa de invierno se presenta comenzando el año, entre los meses de enero y mayo, en donde se logra apreciar mayor cantidad de lluvia para los meses de marzo y abril. Luego, se presenta un periodo de verano entre los meses de junio a septiembre, lo que denota que las gráficas son casi idénticas en términos de forma y no se evidencia un cambio drástico, sin embargo, para el mes de septiembre, se presenta un aumento leve en el nivel de precipitaciones, siendo este un mes transitorio a la segunda etapa de invierno. Durante la segunda etapa de invierno, que abarca de octubre a diciembre, se registran ligeramente más precipitaciones en comparación con los meses más lluviosos de la primera etapa.

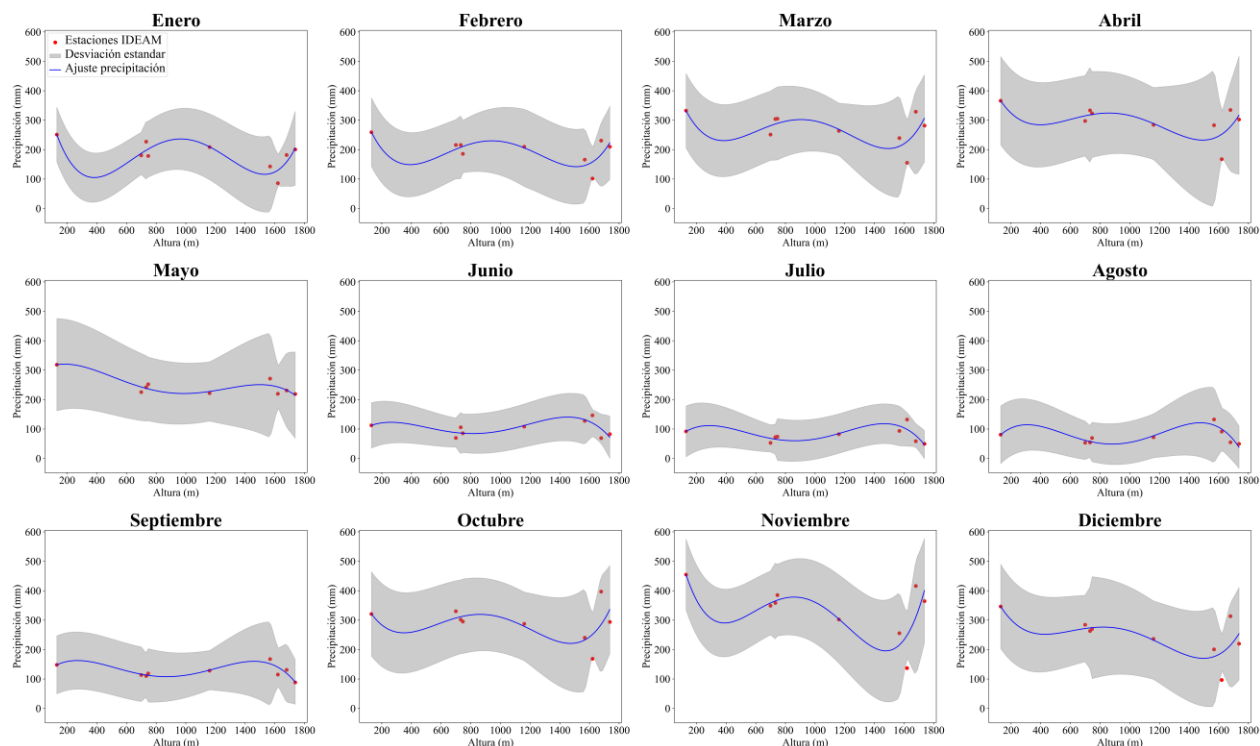


Figura 3. Ajuste polinómico de las precipitaciones promedio con desviación estándar. Elaboración propia.

Las desviaciones estándar, muestran una variabilidad significativa en los datos de precipitaciones mensuales promedio a lo largo de los meses, lo que refleja la naturaleza transitoria y dinámica de este fenómeno. Esta variabilidad es completamente esperada, al considerar la influencia de factores climáticos cambiantes a lo largo del periodo de tiempo estudiado, enmarcando la complejidad intrínseca de las precipitaciones, pues cada mes presenta características únicas para este fenómeno climático.

El análisis de los datos en función de la estacionalidad climática permitirá agrupar los datos que se correlacionen de mejor manera entre sí, proporcionando una base sólida para la identificación de patrones y la comprensión de los datos que se estimarán para el factor de erosividad de la lluvia.

Posteriormente, se realizan interpolaciones para los datos tanto mensuales como anuales de cada estación, para esto se utilizó el método Kriging con modelo esférico del [Arc GIS](#) utilizando código realizado en Python. Previamente se había intentado generar las interpolaciones en [GRASS GIS](#), primero utilizando el método [IDW](#) mediante código batch de Windows, el cual ejecutó correctamente, pero los mapas resultantes no generaron una distribución adecuada y coherente para el fenómeno de precipitación. Luego, se emplea el método Kriging a partir de 2 Addons específicos (V.krige y V.kriling), sin embargo, para el sistema operativo Windows no funcionan de manera apropiada.

Las interpolaciones realizadas en Arc GIS fueron consistentes y permitieron generar múltiples mapas, a partir de una distribución espacial continua en la zona de estudio. Permitiendo que el factor R se pueda estudiar de manera espacial.

A partir de las interpolaciones de las precipitaciones anuales, las variaciones espaciales se representan en la Figura 4. Se realizaron tres clasificaciones distintas. En la primera, se incluyeron los mapas con las precipitaciones más altas, que oscilan entre 1577 mm y 4668 mm, con una tendencia general de NW-SE. Específicamente, se destacan los años 2000, 2005, 2006, 2007 y 2008. En la segunda clasificación, se encuentran los mapas de las interpolaciones de los años 2010, 2011 y 2017, los cuales muestran una tendencia NE-SE, concentrándose principalmente en el Valle del Río Magdalena, con precipitaciones que varían entre 1485 mm y 3963 mm. La tercera clasificación es más amplia e incluye los años considerados más secos en comparación con las otras categorías: 2001, 2002, 2003, 2004, 2009, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2018 y 2019. En esta clasificación, las precipitaciones van desde 815 mm hasta 3130 mm, y se observa una tendencia preferencial de las precipitaciones sobre el Valle del Río Magdalena.

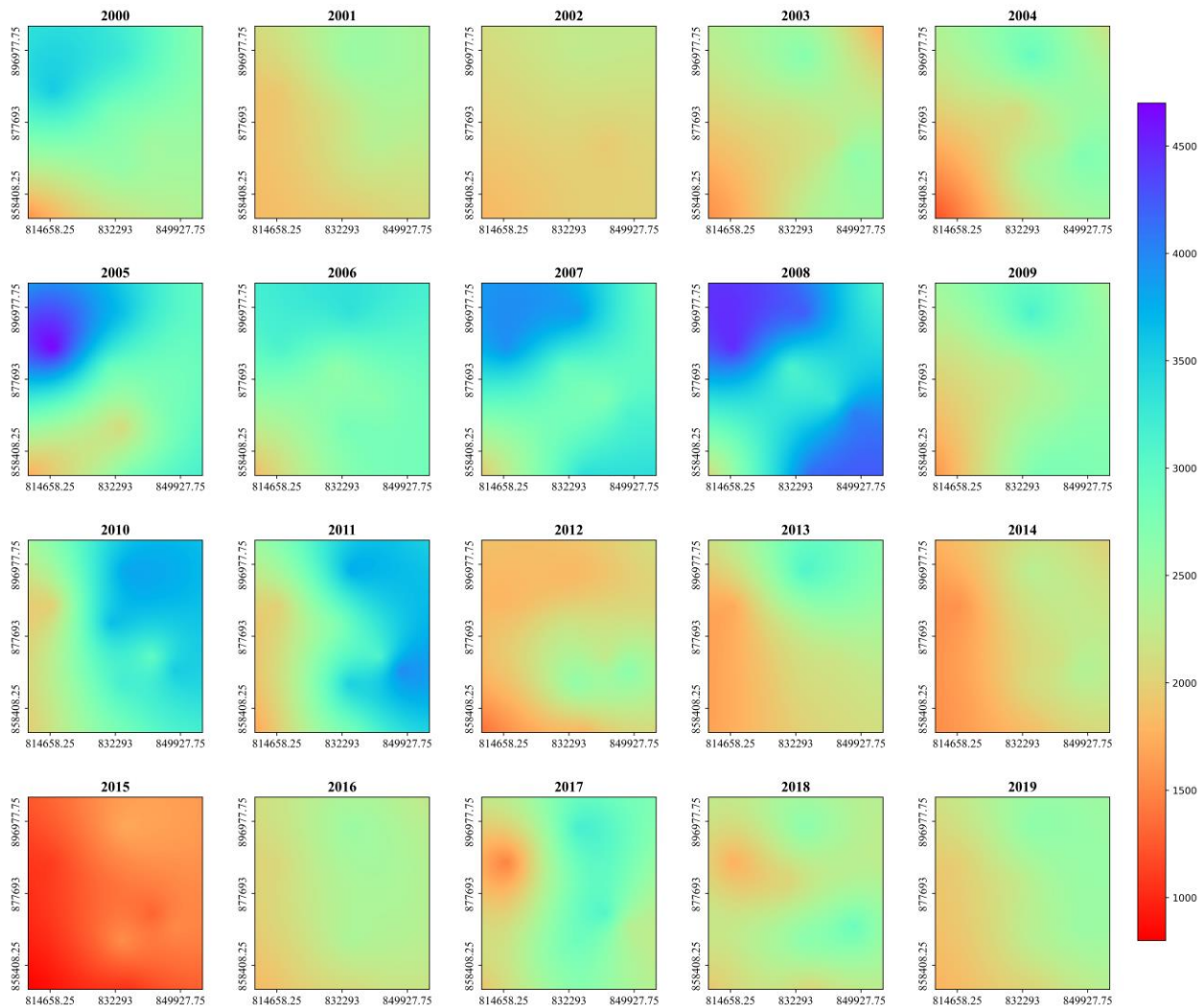


Figura 4. Interpolaciones de las precipitaciones anuales. Elaboración propia.

Luego, se calculó la erosividad de la lluvia de acuerdo con la ecuación de Wischmeier, que se mencionó anteriormente, en este caso los valores necesarios como la precipitación media mensual y la precipitación media anual no se introdujeron a la ecuación como valores puntuales de las

estaciones hidrometeorológicas, pues con las interpolaciones realizadas previamente se puede tener una distribución continua en el espacio, lo que es ideal al tratar fenómenos tan complejos y regionales. Estos datos de erosividad de la lluvia, se generaron de acuerdo con los cruces de las categorías estipuladas anteriormente.

Las previas clasificaciones, tanto para los meses del año como para los 20 años estudiados, sientan las bases fundamentales para la siguiente fase del análisis de resultados. La creación de categorías específicas permitirá centrar el enfoque en lapsos de tiempo más homogéneos, facilitando así una evaluación detallada de las características particulares de las precipitaciones durante estos periodos. Aunque parámetros clave como la intensidad, duración y frecuencia de las lluvias son esenciales para estudios de este tipo, lamentablemente, para esta zona, no se dispone de información detallada al respecto. No obstante, el objetivo es identificar patrones que, incluso en ausencia de datos extremadamente detallados, posibiliten la generación de valores de erosividad de la lluvia con una correlación más robusta.

Para asegurar un análisis riguroso, resulta crucial comparar las características de las precipitaciones de las categorías con los datos resultantes de la erosividad de la lluvia. Esta comparación proporcionará valiosos aportes sobre la relación entre las condiciones climáticas específicas y la erosión del suelo en la zona de estudio. De esta manera, se busca compensar la falta de información detallada mediante la identificación de patrones significativos para contribuir al conocimiento de la erosividad de la lluvia en la región.

6. Resultados

Gracias a las previas clasificaciones realizadas para los meses del año, se determinaron categorías necesarias para centrar el foco de estudio a los lapsos de tiempos más parecidos y poder generar valores de erosividad de la lluvia con mayor correlación.

6.1. Características de las lluvias divididas en periodos.

La Figura 5 es el resultado de los procesamientos previos, revela 9 clasificaciones distintas, producto de los cruces entre las 3 categorías de precipitaciones anuales y las 3 estaciones establecidas. De manera general, se observa una tendencia de disminución en los valores de precipitación, siendo la categoría 1 la de mayor precipitación y la categoría 3 la de menor. Sin embargo, resulta importante destacar que los valores de los inviernos 2 en las categorías 1 y 2 se mantienen constantes, oscilando entre 414 mm y 197 mm, y 418 mm y 179 mm, respectivamente. Se percibe únicamente un leve cambio en el valor mínimo, con una diferencia de casi 20 mm. Esta consistencia se mantiene de acuerdo con las estaciones, ya que el invierno 1 muestra ser relativamente menos lluvioso que el invierno 2. Estas observaciones detalladas proporcionan una comprensión más completa de la variabilidad en las precipitaciones a lo largo de las distintas categorías y estaciones establecidas.

Espacialmente, las precipitaciones de todos los inviernos están concentradas sobre el Valle del Río Magdalena, lo cual contrasta con la distribución de las precipitaciones en los veranos, donde se observa que, las lluvias se centran principalmente sobre el flanco este de la Cordillera Central, dejando al Valle con relativamente pocas precipitaciones. Esta variación espacial podría deberse a

una combinación de factores principalmente topográficos, patrones climáticos regionales y posibles influencias geográficas específicas en la zona de estudio. La topografía local, es relevante pues la presencia de una gran barrera como lo es la Cordillera Central y la depresión de la cuenca del Río Magdalena desempeñan un papel crucial de la distribución de las precipitaciones. Es importante señalar que, además de los factores locales, pueden intervenir patrones atmosféricos de escala mundial que generan perturbaciones y pueden alterar el régimen de precipitaciones a nivel local.

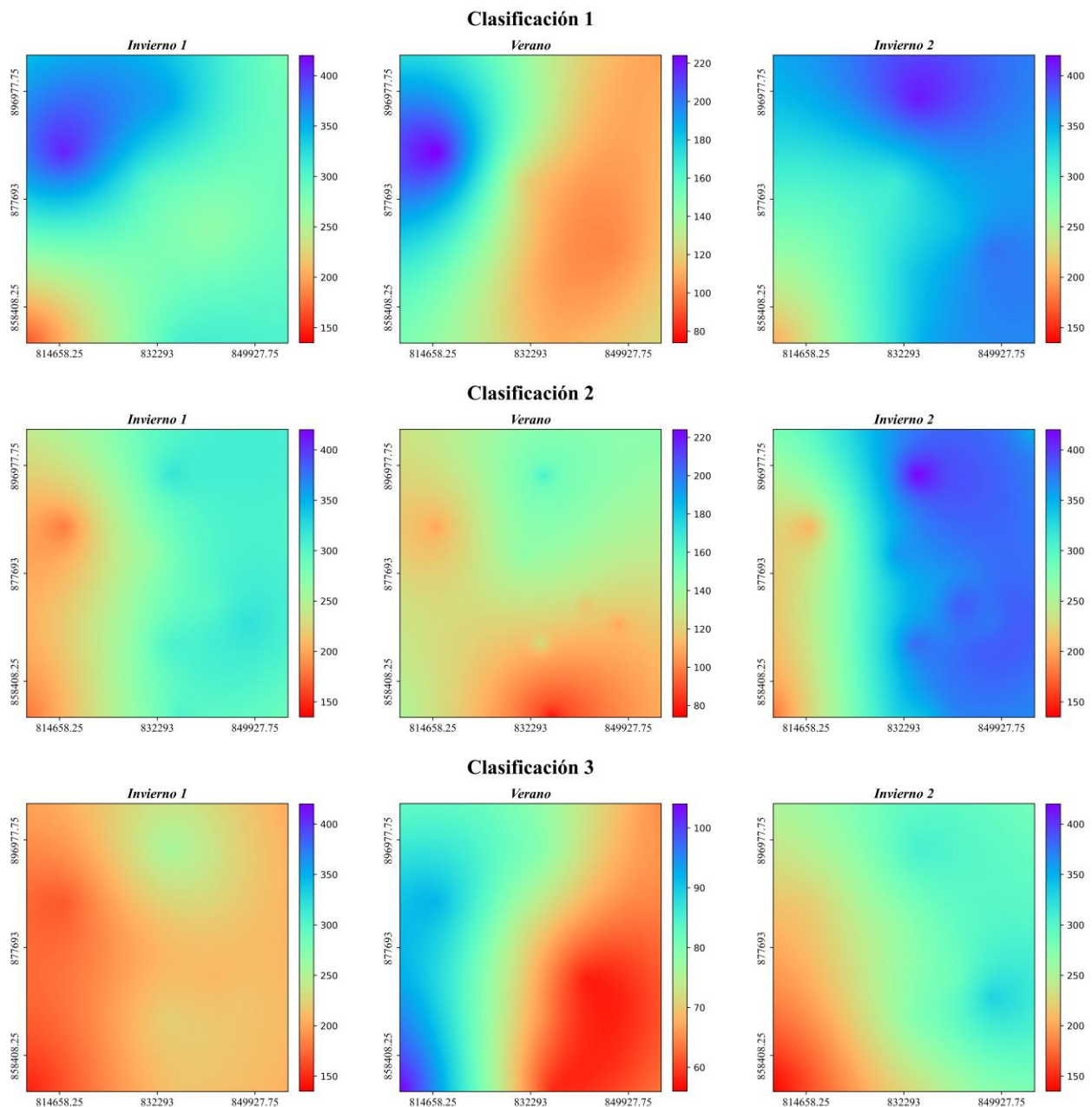


Figura 5. Precipitaciones por categorías, a partir de interpolaciones. Fuente propia.

6.2. Características del factor R dividido en periodos.

Los datos relativos a la erosividad de la lluvia, comúnmente conocidos como factor R, han sido recopilados con los estándares establecidos. La Figura 6 facilita la visualización inmediata de cambios en los nueve periodos seleccionados. En todos los inviernos analizados, se observa una erosión caracterizada por valores elevados.

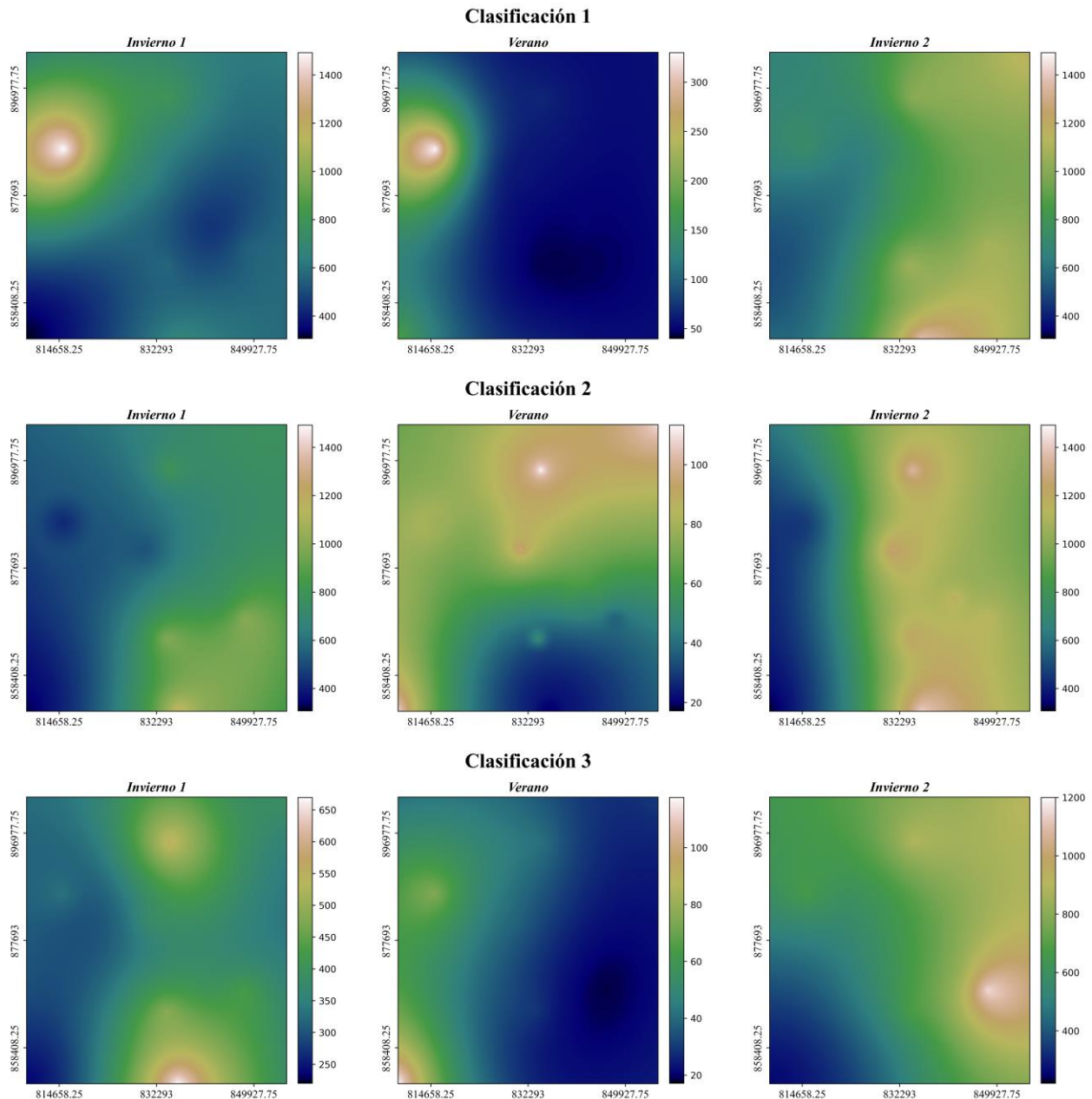


Figura 6. Factor R por categorías, a partir de interpolaciones. Fuente propia.

Los inviernos 2 exhiben una tendencia de erosividad preferencial en la zona derecha, específicamente en la parte baja correspondiente al Valle del Río Magdalena, con valores oscilantes entre $1377 \text{ y } 238 \text{ MJ} * \text{mm} * \text{hora}^{-1} * \text{Ha}^{-1} * \text{año}^{-1}$. Esta observación se alinea coherentemente

con la gráfica de precipitaciones. No obstante, se aprecian variaciones en la ubicación de los picos de mayor valor, posiblemente se atribuyen a variaciones topográficas locales de menor escala.

En contraste, los inviernos 1 muestran diferencias notables en forma y magnitud. Las clasificaciones 1 y 2 presentan valores entre 1492 y 307 $MJ * mm * hora^{-1} * Ha^{-1} * año^{-1}$, pero las zonas preferenciales de erodabilidad de la lluvia son distintas. La clasificación 1 la presenta en la zona NW, correspondiente al flanco este de la Cordillera Central, mientras que la clasificación 2 la ubica en la parte SE del Valle del Río Magdalena. Por otro lado, la clasificación 3 del invierno 1 muestra una particularidad al presentar valores de precipitación entre 669 y 220 $MJ * mm * hora^{-1} * Ha^{-1} * año^{-1}$, lo cual resulta inusual para un periodo invernal. Además, se observa una tendencia preferencial en dirección N-S.

Los veranos conservan cambios en magnitud de erosión de la lluvia, siendo la categoría 1 la que más presenta, con valores fluctuantes entre 328 y 48 $MJ * mm * hora^{-1} * Ha^{-1} * año^{-1}$, que se concentra principalmente en la zona NW, siendo un valor continuo con el invierno 1 de su misma categoría. En cambio, para las categorías 2 y 3 los valores están localizados entre 117 y 17 $MJ * mm * hora^{-1} * Ha^{-1} * año^{-1}$, pero con diferentes tendencias, pues la categoría 2 esta dispersa principalmente en toda la zona norte, tanto en parte alta como baja y la categoría 3 se encuentra preferencialmente sobre la zona del flanco este de la cordillera central.

Durante los veranos, se observan variaciones significativas en la magnitud de la erosión causada por la lluvia, la categoría 1 destaca como la más afectada, ya que los valores de erosividad fluctúan entre 328 y 48 $MJ * mm * hora^{-1} * Ha^{-1} * año^{-1}$, concentrándose principalmente en la zona NW. Esta tendencia es continua con el invierno 1, que comparte la misma categoría, lo que permite identificar una zona preferencial de erosión en el espacio para dicho periodo de tiempo. En cambio, las categorías 2 y 3 exhiben valores en un rango de 117 a 17 $MJ * mm * hora^{-1} * Ha^{-1} * año^{-1}$, pero con tendencias diferentes. La categoría 2 se dispersa principalmente en toda la zona norte, abarcando tanto la parte alta como la baja. Por otro lado, la categoría 3 se encuentra preferentemente sobre la zona del flanco este de la cordillera central.

7. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se puede determinar que la estimación de la erosividad de la lluvia puede ser abordada de manera efectiva mediante la relación entre la cantidad de lluvia mensual y la precipitación anual. La subdivisión de los datos en 9 categorías ha permitido comprender variaciones significativas en relación con la estacionalidad climática identificada en la zona de estudio.

El análisis espacial mediante el uso de interpolación en función de la ecuación de Wischmeier revela patrones distintivos durante las épocas de invierno. Se observa una clara tendencia de erosividad preferencial hacia el Valle del Río Magdalena, siendo la segunda época de invierno la que presenta los valores más elevados. Esta relación directa entre la cantidad de lluvia y la erosividad resalta la importancia de comprender cómo las variaciones estacionales influyen en los patrones de erosión.

En el caso de los meses de verano, el análisis espacial adquiere mayor relevancia. Se identifica que las mayores precipitaciones se concentran principalmente en el flanco este de la Cordillera Central. Este hallazgo subraya puntos específicos que generan una considerable erosión, aunque a una escala inferior en comparación con los meses de invierno.

La topografía presenta una relación intrínseca con la concentración de precipitaciones para determinadas temporadas climáticas, incidiendo ampliamente con la erosión aluvial de la zona. Esto permite resaltar que los periodos secos y húmedos se ven afectados por la topografía.

Aún más significativo es reconocer que la erosividad de la lluvia no se manifiesta de manera uniforme a lo largo de estos periodos, sino que su impacto erosivo es más pronunciado tras un periodo de sequía. Esta dinámica se atribuye a la creación de condiciones propicias que favorecen los procesos erosivos. Durante una época seca, el suelo tiende a volverse más compacto y menos permeable, aumentando su vulnerabilidad ante la erosión cuando las lluvias finalmente llegan. Esta transición de condiciones secas a húmedas intensifica la capacidad erosiva de la lluvia, subrayando la importancia de considerar la historia climática reciente al evaluar y gestionar los riesgos de erosión en la zona de estudio.

8. Recomendaciones

El uso de fórmulas que correlacionan el factor R a partir de la relación de las precipitaciones promedios mensuales sobre la precipitación anual, son un acercamiento relativamente óptimo, no obstante, se omite la esencia de la lluvia en cuanto a intensidad más no en cantidad. Por lo tanto, se debería mejorar el acercamiento del componente intensidad, ya sea promoviendo la mejora de tomas de datos a nivel nacional, o a partir de la utilización de pluviógrafos para la caracterización de intensidad y establecer una fórmula coherente para las precipitaciones en las diversas regiones de Colombia.

De igual forma, las interpolaciones permiten generar nuevos valores a partir de los puntos conocidos de las estaciones del IDEAM, pero omite el detalle topográfico, lo cual es relevante para zonas con alta influencia de este elemento. La presencia de estaciones pluviométricas en zonas con altos cambios topográficos, permitirían tener mejores estimaciones espaciales de las precipitaciones. Por lo tanto, se debería pensar en maneras de mejorar los datos obtenidos por interpolaciones según la topografía local.

La zona de influencia es relativamente pequeña para comprender las variaciones que pueden presentar las precipitaciones y su capacidad de erodar el suelo. Por ende, se debería generar una aproximación a una escala más macroscópica, quizás a nivel América del Sur, para poder comprender los fenómenos. Lo que permitiría una mayor comprensión de eventos que podrían parecer locales, pero en realidad van más allá de un análisis regional detallado.

Referencias

Barfield, B.J., Warner, R.C., & Haan, C.T. (1983). *Applied Hydrology and Sedimentology for Disturbed Areas*. Stillwater, Oklahoma: Oklahoma Technical Press.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2019, 15 de mayo). Simposio Mundial sobre la Erosión del Suelo. Recuperado de <https://www.fao.org/about/meetings/soil-erosion-symposium/key-messages/es/>

Fernandez, C., Wu, J., McCool, D., and Stockle, C. (2003). Estimating Water Erosion and Sediment Yield with GIS, RUSLE, and SEDD. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58(3), pp 128-136.

Geleta, H. I. (2011). *Watershed Sediment Yield Modelling for Data Scarce Areas*. PhD Dissertation, University of Stuttgart. Available at <http://elib.unistuttgart.de/opus/volltexte/2011/6152/>.

Huang, C., Bradford, J.M., & Cushman, J.H. (1983). A Numerical Study of Raindrop Impact Phenomena: The Elastic Deformation Case. *Soil Science Society of America Journal*, 47, pp.855–861. DOI: 10.2136/sssaj1983.03615995004700050003x.

Lal, R. (2001). *Erosión y conservación del suelo*. Instituto Internacional de Ciencias del Suelo (ISSS). <https://www.calameo.com/read/00654309956d8bba87894>

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).

Villamizar, A., Rodríguez, E., Villareal, E. (2018). Desarrollo de una calculadora de curvas IDF generalizada para Colombia. XXIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología.

Wang WZ, Jiao JY, Hao XP, Zhang XK, Lu XQ, Chen FY, Wu SY (1996). Distribution of rainfall erosivity R value in China (II). J Soil Eros Soil Conserv 01:29–39.

Wischmeier WH, Smith DD (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. Trans Am Geophys Union, 39(2), 285–291.

Wischmeier WH (1959). A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. Soil Sci Soc Am Proc Madison, 23(3), 246–249.

Wischmeier WH (1964). Storm and Soil conservation. J. Soil and Water Conserv. 17:55-59.

Wischmeier WH, Smith DD (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington, D.C, United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook, No. 537.

Wu, L., Liu, X., & Ma, X. (2016). Spatiotemporal distribution of rainfall erosivity in the Yanhe River watershed of hilly and gully region, Chinese Loess Plateau. Environmental Earth Sciences, 75(9), 315. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5136-6>