

Estimación de la susceptibilidad ante fenómenos naturales con AHP y álgebra de mapas en SIG para una BDG destinada a un geovisor web: Caso Sevilla, Valle del Cauca

Juan Manuel Palomino Saa (202028475)

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Informe Final de la modalidad de Grado “Profundización Especializada”

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Topográfico

Cali, Colombia

11 de agosto de 2025

Tabla de contenido

1.	Resumen	1
2.	Introducción	2
3.	Objetivos.....	3
3.1.	Objetivo general	3
3.2.	Objetivos específicos.....	3
4.	Área de estudio	3
5.	Materiales y métodos	4
6.	Resultados	33
7.	Conclusiones	37
8.	Bibliografía	38
9.	Anexos.....	39

Listado de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio en el Valle del Cauca	3
Figura 2. Diagrama metodológico para la modelación de susceptibilidad a fenómenos naturales y el diseño de una BDG.....	4
Figura 3. Escala de importancia y valores para la construcción de la matriz de comparación por pares de decisión (Aceves-Quesada, López-Blanco, and del Pozzo 2006)	5
Figura 4. Variables y ponderaciones para estimación de susceptibilidad a remoción en masa (Servicio Geológico Colombiano - SGC 2017).....	6
Figura 5. Variables y ponderaciones para estimación de susceptibilidad a remoción en masa.....	7
Figura 6. Valor del RI según la cantidad de parámetros evaluados por la matriz (Vidal 2022)	11
Figura 7. Model Builder para la automatización del cálculo de los niveles de susceptibilidad a remoción en masa	18
Figura 8. Componente geológica de la susceptibilidad a remoción en masa	18
Figura 9. Componente geomorfológica de la susceptibilidad a remoción en masa	19
Figura 10. Componente de suelos edáficos de la susceptibilidad a remoción en masa ...	19
Figura 11. Componente de coberturas del suelo de la susceptibilidad a remoción en masa	19
Figura 12. Modelo Conceptual de la base de datos de fenómenos naturales en Sevilla ..	26
Figura 13. Modelo Lógico de la base de datos de fenómenos naturales en Sevilla usando PostgreSQL como DBMS	27
Figura 14. Modelo Físico de la base de datos de fenómenos naturales en Sevilla.....	28
Figura 15. Información general de la BDG	29
Figura 16. Ejemplo de información de los temas de la BDG	29
Figura 17. Ejemplo de información de los grupos de la BDG	29
Figura 18. Ejemplo de información de un objeto de la BDG	29
Figura 19. Estructura de la BDG	30
Figura 20. Creación de dominios para el reporte de eventos	30
Figura 21. Creación de dominios para la susceptibilidad de fenómenos	31
Figura 22. Creación de dominios para los centros médicos	31
Figura 23. Diferencia entre un trazado digitalizado y un trazado segmentado	32
Figura 24. Representación gráfica de las variables utilizadas para el uso del ruteo.....	33
Figura 25. Capas de susceptibilidad a fenómenos alojadas en Geoserver	33
Figura 26. Estructura final de la BDG.....	35
Figura 27. Trazado de ruta más corta entre los identificadores de un nodo (primer ejemplo)	36
Figura 28. Trazado de ruta más corta entre los identificadores de un nodo (segundo ejemplo).....	36

Listado de tablas

g

Tabla 1. Equivalencias numéricas y cualitativas para las clases de susceptibilidad	6
Tabla 2. Resistencia de las unidades geológicas presentes en Sevilla	7
Tabla 3. Textura o fábrica de las unidades geológicas presentes en Sevilla.....	8
Tabla 4. Variables y valores de la matriz para estimación de ponderación para susceptibilidad en remoción en masa	9
Tabla 5. Suma de las columnas de la Tabla 4	9
Tabla 6. Matriz normalizada y pesos ponderados obtenidos para susceptibilidad en remoción en masa	9
Tabla 7. Intervalos de clasificación de la pendiente para la susceptibilidad a remoción en masa.....	11
Tabla 8. Intervalos de clasificación de la rugosidad para la susceptibilidad a remoción en masa.....	12
Tabla 9. Intervalos de clasificación de la acuenca para la susceptibilidad a remoción en masa.....	12
Tabla 10. Intervalos de clasificación de la curvatura para la susceptibilidad a remoción en masa.....	12
Tabla 11. Clasificación de la morfogénesis.....	13
Tabla 12. Rangos de clasificación del índice de relieve relativo del terreno para la susceptibilidad a remoción en masa	13
Tabla 13. Rangos de clasificación de la inclinación de la pendiente para la susceptibilidad a remoción en masa	14
Tabla 14. Clasificación por tipos de textura en el suelo	15
Tabla 15. Clasificación por taxonomía de los suelos	15
Tabla 16. Clasificación de drenajes naturales de los suelos.....	15
Tabla 17. Clasificación de profundidad de los suelos	16
Tabla 18. Clasificación de grupos de tipo de arcilla.....	16
Tabla 19. Clasificación de coberturas del suelo.....	17
Tabla 20. Variables y valores de la matriz para estimación de ponderación para susceptibilidad en inundación y suma de columnas.....	20
Tabla 21. Matriz normalizada y pesos ponderados obtenidos para susceptibilidad en inundación y suma de columnas.....	20
Tabla 22. Intervalos de clasificación de la pendiente para la susceptibilidad a inundación	21
Tabla 23. Intervalos de clasificación de la forma de la cuenca para la susceptibilidad a inundación	22
Tabla 24. Intervalos de clasificación de la densidad hidrográfica para la susceptibilidad a inundación	22
Tabla 25. Intervalos de clasificación de distancias a cuerpos de agua para la susceptibilidad a inundación	22
Tabla 26. Clasificación para el paisaje	23
Tabla 27. Variables y valores de la matriz para estimación de ponderación para susceptibilidad morfométrica.....	23
Tabla 28. Variables y valores de la matriz para estimación de ponderación para susceptibilidad del suelo	24

Tabla 29. Variables y valores de la matriz para estimación de ponderación para susceptibilidad a avenidas torrenciales	24
Tabla 30. Clasificación para la pendiente en la susceptibilidad a avenidas torrenciales ...	24
Tabla 31. Clasificación a los cuerpos de agua de acuerdo con su jerarquía.....	25
Tabla 32. Clasificación a los usos de la tierra.....	25
Tabla 33. Entidades geográficas y no geográficas de la BDG	26
Tabla 34. Variables utilizadas y su tipo de dato para el uso del ruteo	33
Tabla 35. Áreas de las clases de susceptibilidad a remoción en masa	34
Tabla 36. Áreas de las clases de susceptibilidad a inundación	34
Tabla 37. Áreas de las clases de susceptibilidad a avenidas torrenciales	34

Listado de anexos

Anexo 1. Código Python para segmentar las vías por nodos	39
Anexo 2. Código SQL para configurar la capa de vías para soportar procesos de ruteo..	40
Anexo 3. Susceptibilidad por remoción en masa en Sevilla, Valle del Cauca	41
Anexo 4. Susceptibilidad por inundación en Sevilla, Valle del Cauca	42
Anexo 5. Susceptibilidad por avenida torrencial en Sevilla, Valle del Cauca	43

1. Resumen

Los fenómenos naturales se presentan en todo el mundo, dejando víctimas humanas y daños materiales. Por ello, es fundamental conocer las zonas donde son más propensos a ocurrir estimando su susceptibilidad. Se calculó este parámetro a fenómenos de inundación, remoción en masa y avenidas torrenciales usando el método AHP a través de álgebra de mapas, brindando ponderaciones a variables espaciales continuas, de manera que todas ellas tuviesen una importancia jerárquica respecto a sus pares de variables restantes. Esta información geográfica, junto con otras relacionadas de la misma temática, se consolidó en una Base de Datos Geográfica (BDG) normalizada y estandarizada, que posteriormente sirvió como base e insumo principal para la implementación de un geovisor web. Los resultados de los cálculos de susceptibilidad mostraron que remoción en masa y avenidas torrenciales destacaron por predominar en la de tipo Baja, con 61,31% y 67,91%, respectivamente, mientras que en la inundación la susceptibilidad más representativa fue la de tipo Media con un 55,64%. Solo para avenidas torrenciales se presentó una susceptibilidad de tipo Muy alta, con 2,4 km cuadrados, equivalentes al 0,48% de la zona de estudio, Sevilla.

Palabras clave: susceptibilidad, álgebra de mapas, AHP, BDG, Geovisor.

2. Introducción

A lo largo de los años, el ser humano, por obligación, ha tenido que aprender a coexistir permanentemente con la aparición de todo tipo de fenómenos naturales y los impactos negativos que estos tienen tanto para las personas como para los elementos de infraestructura. A nivel global, desde 1975 hasta 2022 se registraron 4713 inundaciones en 168 países. Estos eventos afectaron a 3200 millones de personas, con casi 220 mil muertes, siendo el fenómeno de mayor afectación en pérdidas de vidas humanas; en materia económica, las pérdidas superaron los 1,3 billones de dólares (Jonkman, Curran, and Bouwer 2024; Liu et al. 2024).

En lo que a remoción en masa y avenidas torrenciales se refiere, estos son menos comunes que una inundación: a nivel global, una de cada dos personas moría en medio de alguno de estos fenómenos, una de cada cinco eran rescatados y el porcentaje restante escapaban por sus propios medios. Las alturas de estos fenómenos oscilaban entre los 0,2 y 11,3 metros, con un promedio de 2,8 metros (Pollock and Wartman 2020). En Latinoamérica el escenario frente a estos fenómenos no se queda atrás: en nueve años, entre 2004 y 2013 se presentaron 611 deslizamientos fatales que causaron más de 11000 muertes. Colombia fue uno de los cinco países con mayor cantidad de fallecidos, junto con Haití, Brasil, República Dominicana y Ecuador (Sepúlveda and Petley 2015).

En Colombia, la remoción en masa es uno de los fenómenos naturales que mayor frecuencia de aparición tiene, afectando comunidades, viviendas, cultivos, vías y otro tipo de infraestructura. Por tal razón, la definición de medidas adecuadas para la prevención de efectos negativos y la reducción de pérdidas ocasionadas por este tipo de fenómenos requiere del conocimiento de las características de estos movimientos, estableciendo de forma anticipada las zonas donde podrían manifestarse e identificar la distribución espacial de la susceptibilidad en una región dada (Sarmiento 2017). De esta manera, la atención a personas heridas que requieran de atención de un centro médico se vería sumamente optimizada, agilizando, además del proceso de traslado, la priorización de casos críticos, la asignación de recursos médicos y farmacéuticos, y la respuesta necesaria en escenarios de alta demanda, como los generados por la aparición de los fenómenos naturales. Una red de rutas médicas eficiente contribuye directamente a reducir la tasa de mortalidad y a mejorar la recuperación de las personas afectadas (Aringhieri et al. 2022; Boutilier and Chan 2020; Poulton et al. 2019).

Para este proyecto se hizo uso de la metodología AHP aplicando enfoque heurístico y el análisis multicriterio para generar las zonas clasificadas de susceptibilidad a fenómenos como remoción en masa, avenidas torrenciales e inundaciones, usando variables cualitativas e información cuantitativa. La selección de variables que participan en cada fenómeno se realizó con base en la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC). Sin embargo, la metodología desarrollada en este proyecto no toma los valores propuestos por el SCG, sino que se estiman desde su base, relacionando la importancia entre los pares de variables a través de una matriz.

Paralelamente, las zonas clasificadas de susceptibilidad para los fenómenos mencionados reposaron en una BDG, que está diseñada, organizada y normalizada para servir como repositorio de datos de un geovisor web, relacionado con la temática de la aparición y susceptibilidad de los fenómenos naturales. Además, esta BDG está también diseñada para estimar la ruta más corta entre dos puntos datos, teniendo como base una red vial del Valle del Cauca. De esta manera, se tienen tanto las

susceptibilidades clasificadas como una BDG donde reposa esta información, así como el ruteo más corto entre dos puntos geográficos dados que serán de mucha utilidad para el geovisor web mencionado.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Cuantificar las zonas categorizadas de susceptibilidad a remoción en masa, inundación y avenidas torrenciales en el municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

3.2. Objetivos específicos

- Definir la importancia de las variables que inciden en la aparición de los fenómenos usando el método AHP para ponderar la importancia entre pares de variables.
- Diseñar un Model Builder que permita la automatización de geoprocesos espaciales y álgebra de mapas que participan en la construcción de las zonas de susceptibilidad de los fenómenos analizados.
- Componer una BDG estandarizada que permita el cálculo y visualización de la ruta más corta a un centro médico para la atención de un fenómeno natural.

4. Área de estudio

El municipio de Sevilla se encuentra ubicado al nororiente del Valle del Cauca, con una altitud promedio de 1612 msnm, con una extensión geográfica de 639 km². Su localización geográfica está a los 4°16' de latitud Norte y 75°55' de longitud Oeste. Su temperatura media es de 20°C. Su ubicación geográfica se evidencia en la Figura 1.

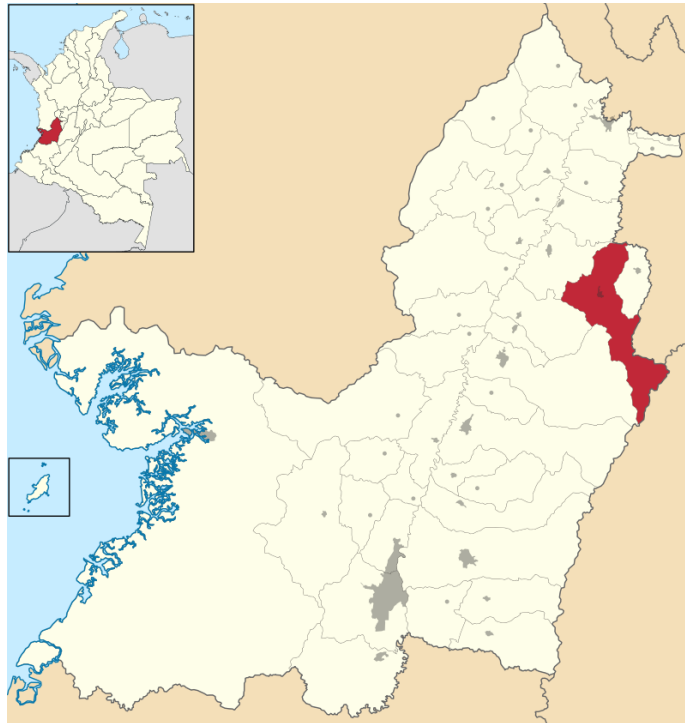


Figura 1. Ubicación del área de estudio en el Valle del Cauca

5. Materiales y métodos

El componente metodológico para la estimación de la susceptibilidad a fenómenos naturales de remoción en masa, inundaciones y avenidas torrenciales dispuso de varias actividades de diversa naturaleza. Además, una vez se finalizó todo lo relacionado con la estimación de la susceptibilidad para los fenómenos mencionados, se procedió con el diseño e implementación de la Base de Datos Geográfica (BDG), usando tanto información secundaria como diseñada de manera propia, de manera que la metodología estuvo dividida en dos temáticas. La Figura 2 muestra el diagrama metodológico empleado tanto para la obtención de la susceptibilidad de estos fenómenos como para la construcción e implementación de la BDG.

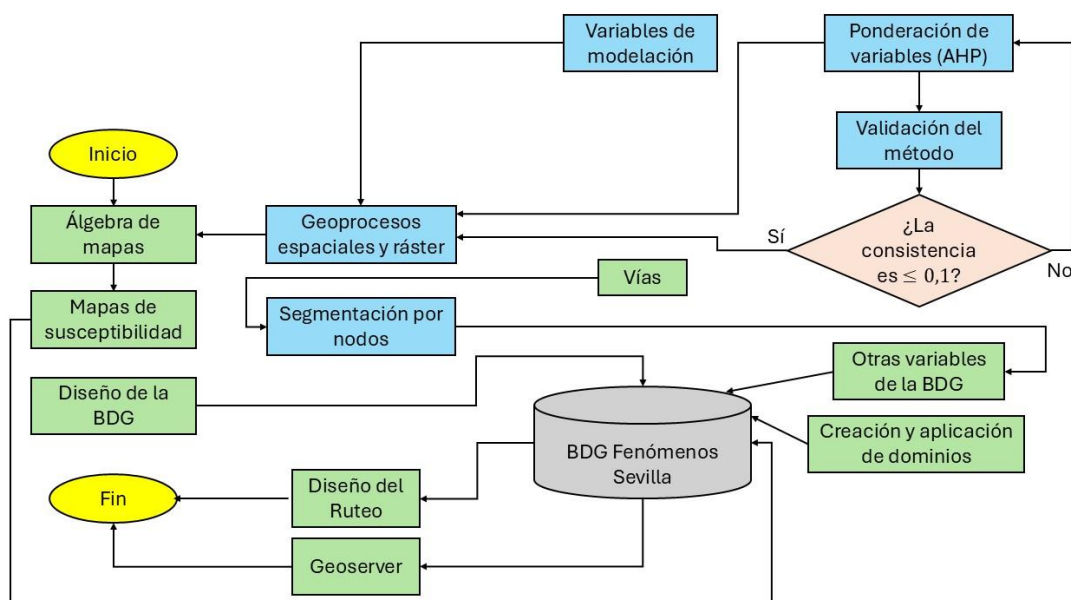


Figura 2. Diagrama metodológico para la modelación de susceptibilidad a fenómenos naturales y el diseño de una BDG

Como bien se aprecia todo inició con las variables de modelación de los fenómenos mencionados. Sin embargo, antes de dar inicio con la automatización de los procesos, se evaluó la ponderación de cada variable para utilizarse en el álgebra de mapas, así como los valores de la clasificación de las unidades de cada variable. Dicha ponderación no estuvo dada de manera subjetiva, sino que se utilizó un método analítico para determinar las ponderaciones porcentuales de cada variable frente a otras variables de cada fenómeno. El método empleado, que es uno de los más usados en el análisis espacial para la toma de decisiones multicriterio, fue el Proceso Jerárquico Analítico (AHP “*Analytic Herarchy Process*”), diseñado por Saaty (1977). Este método es ampliamente empleado para la resolución de problemas de enfoque multicriterio en donde todas las variables tienen una interacción entre sí (Feizizadeh, Jankowski, and Blaschke 2013). Por ello, al tratarse de un análisis multicriterio, las ponderaciones de cada uno de los factores es el reflejo de su importancia (Feizizadeh, Jankowski, and Blaschke 2013). Para este caso, se implementó una matriz de comparación de pares para obtener las ponderaciones de cada factor para cada fenómeno estudiado, en el

que el número de filas y columnas está dado por el número de variables a evaluar, comparándose simultáneamente (Aceves-Quesada, López-Blanco, and del Pozzo 2006). Cada fila y cada columna de la matriz se relaciona con el nombre de cada criterio (o variable), y, seguidamente, se completan las celdas comparando la importancia relativa del criterio de cada fila con relación al criterio de su columna correspondiente, avanzando de izquierda a derecha, columna por columna, fila por fila, hasta completar la matriz cuadrada en su totalidad. La comparación, por tanto, permite obtener jerarquías o pesos para las variables basados en una escala de niveles de importancia establecidos por el método (Aceves-Quesada, López-Blanco, and del Pozzo 2006).

En términos prácticos, el método AHP consiste en diseñar una matriz de las variables, donde, a partir de valores previamente establecidos entre sus pares y realizando operaciones de álgebra lineal, se obtienen las ponderaciones de cada variable implicada. La escala de valores para la asignación de estas ponderaciones es una escala numérica de 17 valores, que van desde 1/9 (menos importante) hasta 9 (más importante). Al ser una matriz cuadrada, su diagonal está conformada por unos (1), y de igual manera ocurre en los casos en los que dos factores distintos disponen del mismo valor de importancia (Aceves-Quesada, López-Blanco, and del Pozzo 2006). De este modo, la Figura 3 muestra la escala de valores que contempla el método AHP para su elaboración, que representan los valores de la matriz entre la relación de las variables analizadas.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17								
1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	9								
Extremadamente		Fuertemente		Moderadamente		Ligeramente		Igual		Ligeramente		Moderadamente		Fuertemente		Extremadamente								
MENOS IMPORTANTE																	MÁS IMPORTANTE							

Figura 3. Escala de importancia y valores para la construcción de la matriz de comparación por pares de decisión (Aceves-Quesada, López-Blanco, and del Pozzo 2006)

Cabe destacar que siempre que se relacionan dos variables, en uno de los espacios está ubicado alguno de los valores mostrados en la Figura 2, mientras que en el espacio restante entre dichas variables siempre debe estar ubicado el número inverso al asignado en primera instancia.

Dado que se pueden cometer errores en la ponderación de cada criterio, la Razón de Consistencia se calcula para asegurar la coherencia de cada factor (Feizizadeh, Jankowski, and Blaschke 2013). Si la Razón de Consistencia (RC) es menor a 0,1 (10%), la comparación de los pares tiene buena coherencia, los pesos son válidos y son aceptados para la evaluación multicriterio. Caso contrario, si la RC es mayor a 0,1, la comparación entre pares carece de consistencia, y, por tanto, la matriz necesita ser ajustada en la asignación de sus valores (Saaty 1977).

Antes de entrar en la determinación de los pesos ponderados para cada variable implicada en cada fenómeno a analizar, fue oportuno brindar los valores de susceptibilidad para los atributos (o unidades) de cada variable. Considere la Tabla 1, donde se evidencian los valores a utilizar y su significado cualitativo.

Tabla 1. Equivalencias numéricas y cualitativas para las clases de susceptibilidad

Valor de clasificación	Significado cualitativo
1	Susceptibilidad muy baja
2	Susceptibilidad baja
3	Susceptibilidad moderada
4	Susceptibilidad alta
5	Susceptibilidad muy alta

Es fundamental mencionar que los valores dados en la Tabla 1 y los mostrados en la Figura 3 son de distinto tipo: los de la Tabla son para asignar un valor a cada unidad geomorfológica, por ejemplo, o a un rango de valores para la pendiente según el fenómeno, mientras que los de la Figura son propios del método AHP, y se ubican únicamente en la matriz cuadrada.

La Figura 4 muestra las variables establecidas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) para la modelación en la susceptibilidad en remoción en masa, así como la ponderación de todas las variables.

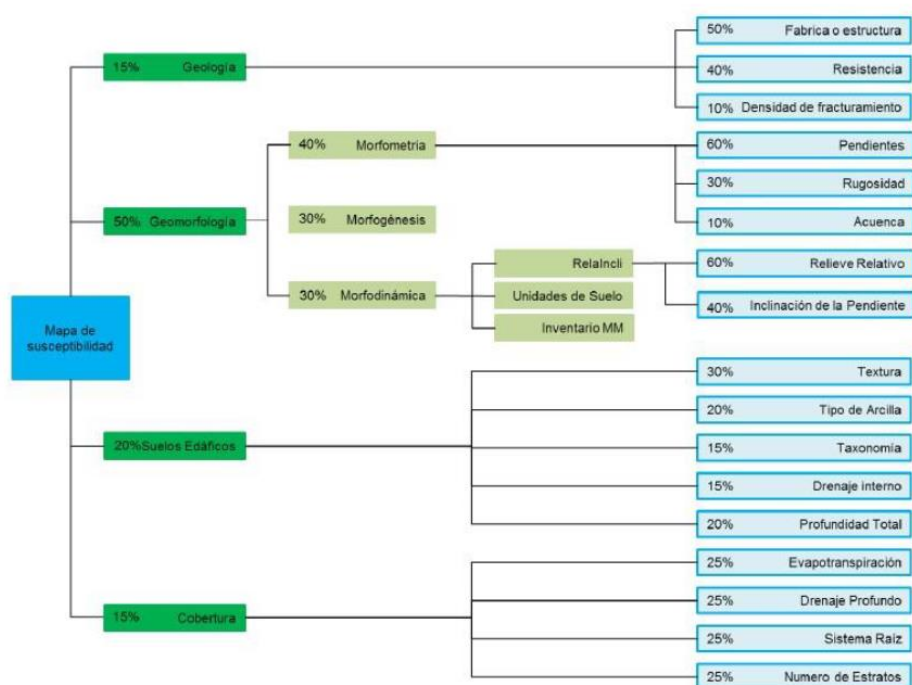


Figura 4. Variables y ponderaciones para estimación de susceptibilidad a remoción en masa (Servicio Geológico Colombiano - SGC 2017)

No obstante, algunas variables se descartaron. Otras se recalcularon en su ponderación a través del método AHP. De esta manera, se presenta la Figura 5 las variables y ponderaciones para el cálculo de susceptibilidad en remoción en masa para Sevilla.

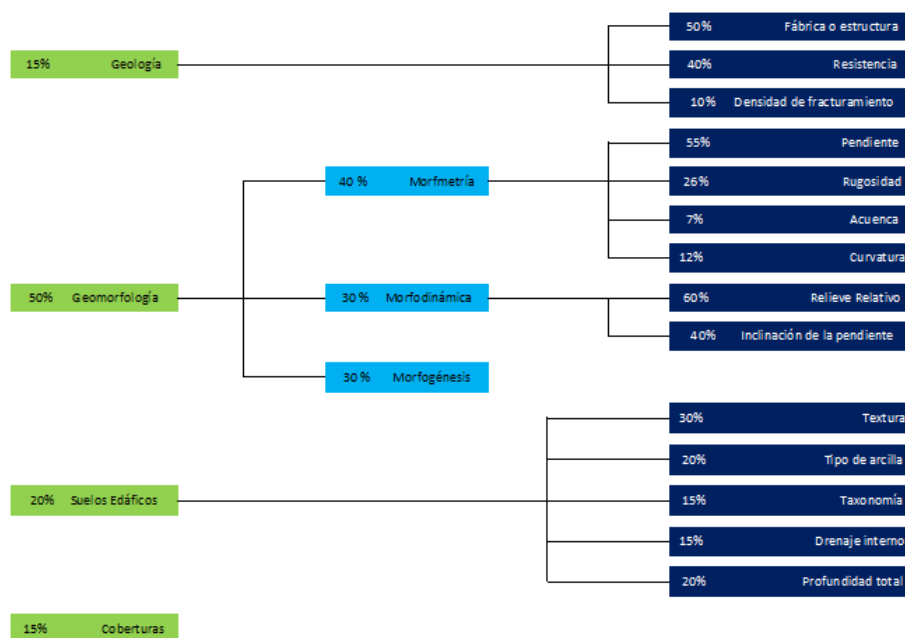


Figura 5. Variables y ponderaciones para estimación de susceptibilidad a remoción en masa

Respecto a la geología, en ella se deben considerar los elementos mínimos de las propiedades y características de los materiales rocosos. En consecuencia, para la ponderación de la calidad de las rocas, se consideraron tres (3) atributos: resistencia, densidad de fracturamiento y fractura. En lo que a la resistencia se refiere, en la Tabla 2 se enlistan las diversas unidades geológicas que afloran en el área de estudio, así como los valores de reclasificación.

Tabla 2. Resistencia de las unidades geológicas presentes en Sevilla

Unidad geológica	Resistencia	Clasificación
Anfibolitas del Rosario	Muy dura	1
Batolito de Ibagué	Dura	2
Complejo Cajamarca	Moderadamente dura	3
Complejo de Río Navarco	Moderadamente dura	3
Complejo Quebradagrande	Blanda	4
Complejo Quebradagrande Miembro Sedimentario	Dura	2
Conos aluviales	Moderadamente dura	3
Depósitos aluviales	Blanda	4
Eclogitas	Dura	2
Esquistos Básicos de Bugalagrande	Dura	2
Formación Amaime	Moderadamente dura	3
Formación Cinta de Piedra	Blanda	4
Formación La Paila	Muy blanda	5
Formación La Pobreza	Blanda	4
Terrazas aluviales	Blanda	4

Por su parte, la densidad de fracturamiento se analiza en las fallas, pliegues y lineamientos, a través del algoritmo **Line Density** de ArcGIS, expresado en m/km².

Dicho método estima la densidad de las líneas en la vecindad de cada píxel definida por un radio de búsqueda.

Finalmente, la fábrica se refiere al arreglo de partículas, grupo de partículas y espacios vacíos en el suelo. El término “estructura” integra los efectos combinados de la fábrica, composición y fuerza entre partículas. La fábrica tiene gran influencia en el comportamiento de los suelos y rocas, en especial a la dirección preferencial que genera debido a la orientación de las partículas. Por tanto, la clasificación de la fábrica establece diferencias de las rocas en cuanto a su resistencia y direccionalidad de las propiedades mecánicas. Las unidades geológicas se agruparon en su tipo de textura o fábrica, según se evidencia en la Tabla 3, además de los valores de clasificación.

Tabla 3. Textura o fábrica de las unidades geológicas presentes en Sevilla

Unidad geológica	Textura o Fábrica	Características	Clasificación
Batolito de Ibagué	Cristalina masiva	Rocas de cualquier origen cuyas partículas minerales están entrelazadas y con orientación aleatoria. Corresponde a las rocas más resistentes y menos deformables, salvo las rocas volcánicas cuya calidad es un poco dispersa según sean porosas o no lo sean.	1
Anfibolitas del Rosario Complejo Cajamarca Complejo de Río Navarco Complejo Quebradagrande Esquistos Básicos de Bugalagrande	Cristalina foliada y rocas de falla	En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, con una orientación preferencial a lo largo de la cual las rocas son menos resistentes. Su calidad se dispersa como consecuencia de su fábrica orientada, es decir, por los planos de esquistosidad y foliación.	5
Eclogitas	Cristalinas bandeadas	En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, conformando bandas composicionales con alguna influencia direccional.	2
Complejo Quebradagrande Miembro Sedimentario Formación Amaime Formación Cinta de Piedra Formación La Paila Formación La Pobreza	Clásticas cementadas	En rocas con partículas cementadas, con resistencia y deformación variable, dependiendo de la calidad del material cementante, la relación matriz-clastos y el grado de empaquetamiento general que posea.	3
Conos aluviales Depósitos aluviales Terrazas aluviales	Clásticas consolidadas	En estas rocas se presenta comportamiento variable esfuerzo-deformación, con direccionalidad de sus propiedades mecánicas. La resistencia se acrecienta con el grado de consolidación diagenética.	4

Se presentan las características geomorfológicas y su calificación frente a los procesos de remoción en masa de acuerdo con la propuesta del SGC con algunas unidades definidas en la metodología del IDEAM. Se incluye las variables de morfometría, morfogénesis y morfodinámica para la componente geomorfológica.

La morfometría trata de darle aspectos cuantitativos en relación con la pendiente, la rugosidad, acuenca y curvatura del terreno. Para generar dichas variables se empleó el MDE de la CVC, que tiene una resolución espacial de 2,5 metros. Con el fin de asignar las ponderaciones de estas variables, se usó la matriz de pares del método AHP para brindar los valores correctos y verificar la RC. Los valores iniciales de esta matriz se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Variables y valores de la matriz para estimación de ponderación para susceptibilidad en remoción en masa

Variables	Pendiente	Rugosidad	Acuenca	Curvatura
Pendiente	1	2	6	7
Rugosidad	$\frac{1}{2}$	1	3	3
Acuenca	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	1	3
Curvatura	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1

Para obtener las ponderaciones de cada variable, fue necesario llevar a cabo previamente ciertos cálculos de álgebra lineal. Primero, se estimó la suma de cada columna. Según los valores de la Tabla 4, se presentan los resultados en la Tabla 5.

Tabla 5. Suma de las columnas de la Tabla 4

Pendiente	Rugosidad	Acuenca	Curvatura
1,810	3,666	10,333	14,000

Luego, fue necesario normalizar la matriz mostrada en la Tabla 4. Por ejemplo, para el caso de la geología en su columna 1 y fila 1, fue necesario dividir su valor (1) entre el promedio (Tabla 5) para cada columna de la matriz. Por tanto, la matriz cuadrada adoptó la estructura mostrada en la Tabla 6, donde también se muestra el promedio de las filas.

Tabla 6. Matriz normalizada y pesos ponderados obtenidos para susceptibilidad en remoción en masa

Variables	Pendiente	Rugosidad	Acuenca	Curvatura	Promedio filas (pesos ponderados)
Pendiente	0,552	0,546	0,581	0,500	0,545
Rugosidad	0,276	0,273	0,290	0,214	0,263
Acuenca	0,092	0,091	0,097	0,214	0,124
Curvatura	0,079	0,091	0,032	0,071	0,068

Los valores promedio suman exactamente uno (1), o lo que es lo mismo, el 100%. Dichos valores fueron los que acompañaron a su respectiva variable (en formato ráster) en el álgebra de mapas. Sin embargo, tal como se comentó anteriormente, preciso es validar este método y los valores consignados en la matriz a través de la verificación de consistencia para dichos valores. Para ello, inicialmente se multiplicó cada fila del promedio de las filas (pesos ponderados) de la matriz normalizada (Tabla 6) por el vector columna (matriz transpuesta) de pesos (Tabla 5) y sumar los resultados de cada fila.

Realizando estas operaciones se obtuvo un nuevo vector columna, denominado A_w . Así se muestra a continuación.

$$A_w = \begin{bmatrix} 2,291 \\ 1,111 \\ 0,507 \\ 0,275 \end{bmatrix}$$

Posteriormente, fue necesario tomar cada elemento del vector A_w y dividir el peso de cada variable en la matriz normalizada. Los cocientes adoptaron las formas mostradas a continuación.

$$2,291 \div 0,545 = 4,204$$

$$1,111 \div 0,263 = 4,224$$

$$0,507 \div 0,124 = 4,089$$

$$0,275 \div 0,068 = 4,044$$

Estos resultados se promediaron, obteniendo el λ_{max} .

$$\lambda_{max} = \frac{4,204 + 4,224 + 4,089 + 4,044}{4} = 4,140$$

Con el λ_{max} calculado, se estimó el Índice de Consistencia (IC).

$$IC = \frac{4,140 - 4}{4 - 1} = \frac{0,140}{3} = 0,047$$

Finalmente, se calculó la Razón de Consistencia. La expresión que permitió calcular dicha variable depende de un índice “aleatorio” dado por la cantidad de variables (en este caso, cuatro) y que está definido por el método AHP, según se muestra en la Figura x (Saaty 1977).

Cantidad parámetros	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41

Figura 6. Valor del RI según la cantidad de parámetros evaluados por la matriz (Vidal 2022)

Por tanto, la expresión para obtener el RC adoptó la siguiente estructura.

$$RC = \frac{0,047}{0,9} \cong 0,052 = 5,2\%$$

Se concluye que los valores consignados en la matriz original brindan una buena explicación de la morfometría para la susceptibilidad en remoción en masa, pues su RC es del 5,2%, claramente inferior a 10%.

La pendiente, continuando con las variables de morfometría, se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0 a 90° y se relaciona con la remoción en masa de forma que a mayor grado de pendiente, mayor es la susceptibilidad de este tipo de movimientos. La Tabla 7 muestra los rangos de clasificación para la pendiente (Servicio Geológico Colombiano - SGC 2017).

Tabla 7. Intervalos de clasificación de la pendiente para la susceptibilidad a remoción en masa

Clasificación	Descripción	Grados (°)	Susceptibilidad
1	Plana a suavemente inclinada	0 – 7	Muy baja
2	Inclinada	7 – 11	Baja
3	Muy inclinada	11 – 19	Moderada
4	Abrupta	19 – 40	Alta
5	Escarpada	> 40	Muy alta

Por su parte, la rugosidad está definida como la variación entre la pendiente en un área y representa la desviación del vector normal a la superficie dada. Esta variable define bien las formas como los límites de los taludes y laderas tanto en los valles como en las crestas. Las laderas de rugosidad alta son más propensas a presentar movimientos de remoción en masa dado que los cambios sucesivos de pendientes favorecen a una mayor infiltración del agua en el terreno y, en consecuencia, aumenta la inestabilidad. La Tabla 8 muestra los rangos de clasificación para la rugosidad.

Tabla 8. Intervalos de clasificación de la rugosidad para la susceptibilidad a remoción en masa

Clasificación	Descripción	Grados (°)
1	Suave	0 – 3
2	Ligeramente rugosa	3 – 7,39
3	Moderadamente rugosa	7,39 – 13,85
4	Rugoso	13,85 – 25,17
5	Muy rugoso	25,17 – 68,16

La acuenca es la superficie de la cuenca aguas arriba de la celda cuya sumatoria de la superficie vierten a una celda determinada (cuenca acumulada). La variable se deriva del MDE y se expresa en m². El área de la cuenca se relaciona con la cantidad de agua que es capaz de recoger e infiltrar en un terreno: a mayor superficie, más agua infiltrada y más probable de desarrollar inestabilidad en el terreno. El flujo de las aguas a través de la superficie es siempre en la dirección de máxima pendiente. Una vez que la dirección de flujo es conocida, posible es determinar cuáles y cuántas celdas fluyen a una celda en específico; la sumatoria de estas se denomina flujos acumulados. Los valores de flujos acumulados multiplicados por el área del pixel crean la variable acuenca (área de la cuenca). La Tabla 9 muestra los rangos de clasificación para la acuenca.

Tabla 9. Intervalos de clasificación de la acuenca para la susceptibilidad a remoción en masa

Clasificación	Características	Cantidad de flujo
1	Divisoria de agua o lomos	0
2	Escorrentía lenta	0 – 3500
5	Flujo acumulado	> 3500

Finalmente, respecto a la curvatura, y para terminar con el aspecto morfométrico, esta variable contempla la convergencia o divergencia de una corriente. Para la remoción en masa, la convergencia presenta una mayor susceptibilidad para el fenómeno, de modo que superficie cóncavas tendrán valores negativos (convergencia) y superficies convexas (divergencia) valores positivos. La Tabla 10 muestra los rangos de clasificación para la curvatura.

Tabla 10. Intervalos de clasificación de la curvatura para la susceptibilidad a remoción en masa

Rangos	Tipo	Clasificación
-16,82 – (-10)	Superficie muy cóncava	5
-10 – (-5)	Superficie cóncava	4
-5 – 0	Superficie cóncava – plana	3
0 – 7	Superficie plana convexa	2
7 – 14,35	Superficie convexa	1

Pasando a la morfogénesis, esta corresponde al origen de las formas del terreno: causas y procesos que dieron nacimiento a la forma del paisaje. El origen del paisaje depende de los procesos endogenéticos y la modificación. La información morfogenética es representada a través de las unidades geomorfológicas. La Tabla 11

muestra las unidades geomorfológicas y sus valores de clasificación para la morfogénesis del terreno.

Tabla 11. Clasificación de la morfogénesis

Unidad geomorfológica	Clasificación	Descripción
Depósitos aluviales en lomerío	4	Materiales no consolidados y pendientes moderadas favorecen la inestabilidad. Alta susceptibilidad.
Depósitos coluvio-aluviales intramontanos	4	Muy susceptibles a deslizamientos superficiales.
Lomerío estructural-erosional	3	Pendientes suaves pero con posible degradación por meteorización. Riesgo moderado.
Montaña estructural-erosional	3	Pendientes empinadas con fracturamiento superficial. Riesgo moderado de movimientos en masa.
Montaña fluvio-glacial	4	Material muy suelto y heterogéneo, inestable bajo saturación. Alta susceptibilidad.
Montaña fluvio-gravitacional	4	Dominadas por procesos de remoción en masa activos. Alta inestabilidad de laderas.
Piedemonte aluvial	3	Pendientes medias con acumulación de materiales sueltos. Riesgo moderado.
Piedemonte diluvial	3	Materiales poco consolidados y escasa cohesión. Riesgo moderado a alto dependiendo de la pendiente.

Por su parte, la morfodinámica se realiza a través del agrupamiento mediante la representación cartográfica de los suelos transportados vistos como geoforma. Para el caso, por baja calidad en el tipo de información, únicamente se realizó la clasificación a partir de las variables geométricas generadas a partir del MDE. Se contempló el índice de relieve relativo y la inclinación de la pendiente.

El índice representa la diferencia de altitud de la geoforma, con independencia de su altura absoluta (nivel del mar). Se mide por la diferencia de alturas entre la parte más baja y alta de cualquier geoforma. Se define como la diferencia entre la mayor y menor elevación por unidad de área y se expresa como la máxima diferencia de altura del terreno por km². La Tabla 12 muestra los rangos de clasificación para el índice de relieve relativo del terreno.

Tabla 12. Rangos de clasificación del índice de relieve relativo del terreno para la susceptibilidad a remoción en masa

Intervalo de altura	Descripción del relieve	Resistencia relativa del material	Calificación
< 50 m	Muy bajo	Materiales muy blandos y erosionables	1
50 – 200 m	Bajo	Blando erosionable	1
200 – 400 m	Moderado	Moderadamente blando y erosión alta	2
400 – 1000 m	Alto	Resistente y erosión moderada	3
1000 – 2500 m	Muy alto	Muy resistente y erosión baja	3
> 2500 m	Extremadamente alto	Extremadamente resistente y erosión muy baja	3

La inclinación de la pendiente (o ladera) está relacionada, generalmente, con el tipo de material que conforma la unidad geomorfológica y con la susceptibilidad de dicha unidad a la formación de la remoción en masa. La clasificación se realiza con base en que el proceso de degradación a la que se ve sometida una cuenca hidrográfica se ve

influenciado por la configuración topográfica ya que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo con los grados de la pendiente. Para hacer uso de esta variable, se utilizó el ráster generado para la pendiente, pero se definió la reclasificación con las observaciones dadas en la Tabla 13.

Tabla 13. Rangos de clasificación de la inclinación de la pendiente para la susceptibilidad a remoción en masa

Inclinación (°)	Descripción	Material y comportamiento	Calificación
< 5	Plana a suavemente inclinada	Muy blanda y baja a susceptibilidad a remoción en masa	1
5 – 10	Inclinada	Blanda y baja susceptibilidad a remoción en masa	1
10 – 15	Muy inclinada	Moderadamente blanda y moderada susceptibilidad a remoción en masa	2
15 – 20	Abrupta	Moderadamente blanda y moderada susceptibilidad a remoción en masa	2
20 – 30	Muy abrupta	Resistente y alta susceptibilidad a remoción en masa	3
30 – 45	Escarpada	Muy resistente y alta susceptibilidad a remoción en masa	3
>45	Muy escarpada	Extremadamente resistente y alta susceptibilidad	3

Continuando con las variables y sus respectivas clasificaciones, nos encontramos con los suelos edáficos. La génesis de los suelos parte de un estado litológico y su evolución los lleva a un momento en el tiempo en el que tendrán una capacidad y respuesta ante la dinámica de las coberturas vegetales, la incidencia del clima y la intervención humana. Para inferir esa capacidad y respuesta orientada a la posibilidad de deterioro y movimientos del suelo y estimar qué tan susceptible esté a remoción en masa, evaluando características a partir de algunas variables propias de la condición natural de los suelos y otras que se pueden deducir.

La metodología define variables de textura, taxonomía, drenaje natural, profundidad del drenaje y tipo de arcilla como criterios de evaluación relacionada a la susceptibilidad de la remoción en masa.

En lo que a textura se refiere, comprende la cantidad relativa de las diferentes partículas de suelo de tamaño menor a 2mm de diámetro (arenas, limos y arcillas). Está relacionada con la retención de la humedad, aireación o difusión de gases, permeabilidad, intemperismo, volumen explorado por las raíces, manejo de los suelos, fertilidad, nutrición mineral, entre otras. En suelos arcillosos el movimiento vertical del agua y la conductividad hidráulica es menor, siendo estos los suelos menos permeables, lo que los hacen más susceptibles a remoción en masa. Los suelos de textura gruesa son menos susceptibles, pues el agua se desplaza a mayor velocidad en el perfil del suelo y tienen mayor velocidad de infiltración, haciéndolos más permeables y con mayor conductividad hidráulica. Por su parte, los suelos con mayor contenido de materia orgánica se saturan, se vuelven más fluidos, menos consistentes y a mayor pendiente donde se ubiquen, mayor es la susceptibilidad a moverse. La clasificación por tipo de textura se evidencia en la Tabla 14.

Tabla 14. Clasificación por tipos de textura en el suelo

A = Arena; L = Limo; Ar = Arcilla; F = Franco; Gr = Grava; P = Piedra; Org = Orgánico

Clase de textura	Calificación
G, A, FAGrP, AGr, AFP	1
AF, FAGr, FArAGr, FarGr, FGr, FGrP	2
ArA, ArGr, FA, FArLGr, ArLGr, FLGr, ArAGr	3
F, F-Org, Far, FarA, FarL, FL, FLOrg	4
Ar, ArL	5

Respecto a la taxonomía, hace referencia al sistema básico de clasificación para interpretar los levantamientos de suelos. Los suelos más evolucionados y en condiciones ideales son menos susceptibles a remoción en masa, mientras que los más jóvenes son más susceptibles a remoción en masa. La Tabla 15 muestra los tipos de taxonomía en Sevilla, así como los valores de clasificación.

Tabla 15. Clasificación por taxonomía de los suelos

Taxonomía de suelos	Calificación
Alfisol	2
Molisol, andisol	3
Inceptisol, entisol	5

Pasando con el drenaje natural, su importancia recae en reconocer la frecuencia y la duración de los periodos húmedos bajo condiciones naturales en las cuales se han desarrollado los suelos. Esta variable contribuye en la estabilización de masas de tierra, ya que permite controlar el flujo de agua subterránea, al mismo tiempo que reduce las presiones de poros y se aumenta, por tanto, la resistencia al corte del material. La Tabla 16 evidencia los tipos de drenajes naturales en Sevilla, así como la mención de sus características y los valores de clasificación dados.

Tabla 16. Clasificación de drenajes naturales de los suelos

Drenaje Natural	Características	Clasificación
Bueno	Suelos óptimos para el abastecimiento de agua y aire a los cultivos. Nivel freático siempre por debajo de 80 cm.	2
Moderado	El agua es removida lentamente hasta el nivel freático (40-80 cm. en época de lluvias). Requiere drenaje para cultivos permanentes	3
Imperfecto	Suelo con capas impermeables que impiden percolación en época de lluvias	4
Pobre	Agua removida lentamente y los perfiles están mojados en la época de lluvias. Se requiere drenaje	4

La profundidad define hasta dónde se encuentra el contacto con el material parental o litológico, y puede tenerse como referencia la profundidad efectiva, hasta dónde pueden penetrar las raíces de las plantas. Con este parámetro, además de determinar hasta dónde pueden penetrar estas raíces, también se puede evaluar hasta dónde puede moverse el agua y la profundidad en la que se encuentran las limitantes o impedimentos

tanto de tipo físico como químico. Igualmente, permite establecer características o aspectos importantes en los procesos de formación del suelo o relevancias en cuanto a acontecimientos naturales que se han presentado a lo largo de la línea temporal. Por otra parte, también permite determinar tanto empírica como de forma estimada los volúmenes de suelos que se pueden llegar a mover. Los rangos de profundidad, la categoría y los valores de clasificación es muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Clasificación de profundidad de los suelos

Profundidad (cm)	Categoría	Clasificación
0 – 25	Muy baja o muy superficial	1
25 – 50	Baja o superficial	2
50 – 100	Media o moderadamente profunda	3
100 – 150	Alta o profunda	4
Mayor a 150	Muy alta o muy profunda	5

Finalmente, la arcilla es una componente fundamental que cuantifica la mayoría de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; con un tamaño menor de 2μ , incluyendo minerales primarios de actividad muy reducida o casi nula. Las propiedades físicas de la arcilla se relacionan con su naturaleza coloidal y se refieren a una superficie específica alta y características como plasticidad, adherencia y contracción. Dichas propiedades influyen directamente sobre el comportamiento del suelo. De las propiedades de la arcilla, la capacidad de intercambio catiónico generalmente controla su comportamiento frente al agua y su inestabilidad. A mayor capacidad de intercambio catiónico, la arcilla es más inestable. La importancia del tipo de arcilla para remoción en masa consta del grado de estabilidad que esta presenta cuando entra en contacto con el agua, ya sea que se contraiga, se expanda o forme grietas. La Tabla 18 muestra los diversos grupos de tipo de arcilla junto con sus respectivos valores de clasificación.

Tabla 18. Clasificación de grupos de tipo de arcilla

Grupos de tipo de arcilla	Clasificación
Caolinita	1
Caolinita, Biotita	
Halloisita	2
Caolinita, Montmorillonita, Vermiculita Caolinita, Muscovita, Montmorillonita	3
Montmorillonita, Clorita, Caolinita Montmorillonita, Vermiculita, Caolinita	4
Alófana, Gipsita Montmorillonita, Vermiculita Muscovita, Illita, Vermiculita, Montmorillonita Muscovita, Montmorillonita, Vermiculita Talco, Muscovita, Vermiculita, Montmorillonita	5

Para acabar, también se usó la variable de cobertura y uso del suelo, que presentan un efecto directo sobre los procesos erosivos, disminuyen la escorrentía superficial porque reducen la cantidad y la velocidad del movimiento del agua en zonas de alta pendiente. También, su sistema radicular presenta un entretejido que actúa como amarre a los

horizontes superficiales del suelo y que tanto árboles como arbustos de raíz profunda facilitan el drenaje profundo, reduciendo la probabilidad de remoción en masa (Sarmiento 2017).

La cobertura del suelo forma un factor que interviene en gran parte la formación de los movimientos en masa. El enfoque de clasificación utilizado (Sarmiento 2017) se orienta hacia la caracterización y cartografía de las unidades de cobertura del suelo como factor de resistencia o favorecimiento de los procesos erosivos y remoción en masa. La vegetación es clasificada desde un punto de vista estructural (tamaño y tipo) y de densidad. Los valores de clasificación de este criterio se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Clasificación de coberturas del suelo

Unidad de cobertura	Clasificación
Bosques y arbustos	1
Arbustos y pastos	2
Pastos y cultivos	2
Rastrojos	3
Afloramientos rocosos	3
Suelos desnudos	3
Suelos desnudos removidos	5

Para el caso, la clasificación de coberturas de la tierra fue realizada bajo el criterio de la metodología Corine Land Cover, y fue utilizado el nivel 3 como insumo para dar la calificación correspondiente a este criterio.

Como bien se puede notar, múltiples son las variables y los procesos que deben llevarse a cabo para satisfacer la estimación de la susceptibilidad a remoción en masa. Por ello, se diseñó un Model Builder que automatizó todos estos procedimientos de una manera más limpia, rápida, estructurada y automatizada, garantizando así como resultado final un shape de susceptibilidad a remoción en masa. Oportuno es mencionar que el Model Builder se construyó para todos los fenómenos analizados. A grandes rasgos, la Figura 7 muestra todas las salidas, entradas y procesos para estimar la susceptibilidad a remoción en masa.

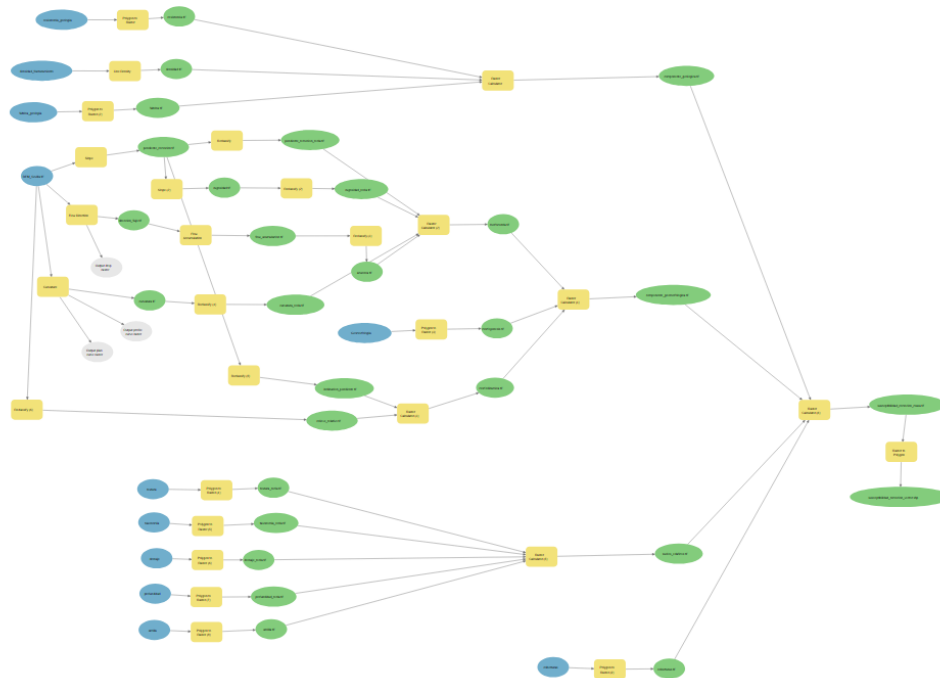


Figura 7. Model Builder para la automatización del cálculo de los niveles de susceptibilidad a remoción en masa

Finalmente, las Figuras 8, 9, 10 y 11 muestran a nivel puntual cada componente para esta modelación.



Figura 8. Componente geológica de la susceptibilidad a remoción en masa

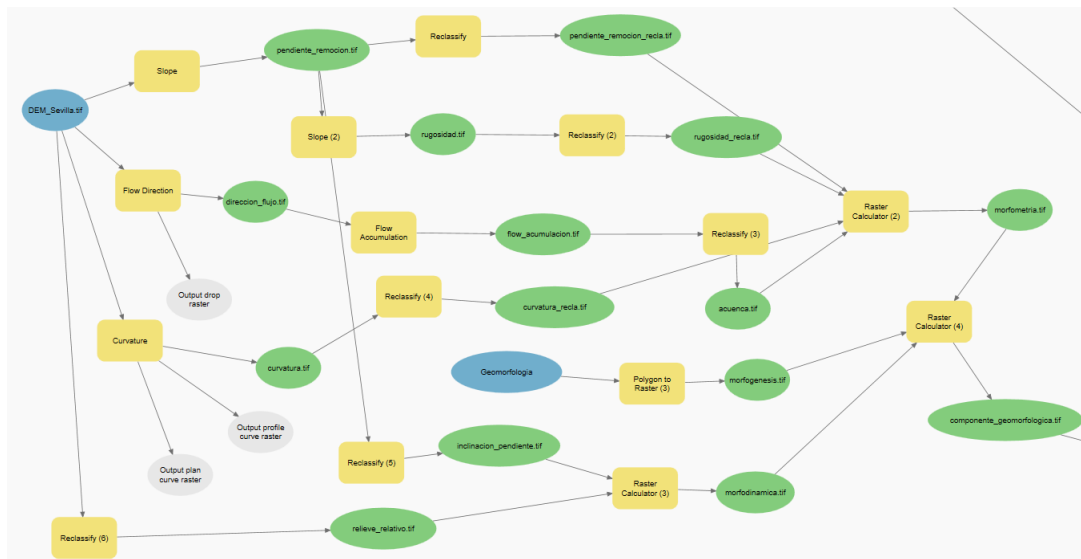


Figura 9. Componente geomorfológica de la susceptibilidad a remoción en masa

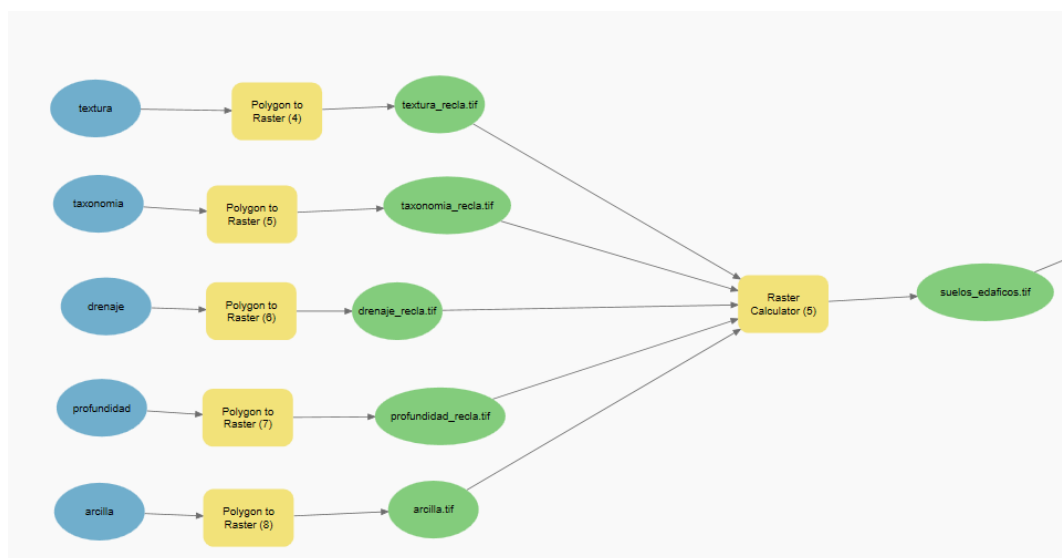


Figura 10. Componente de suelos edáficos de la susceptibilidad a remoción en masa

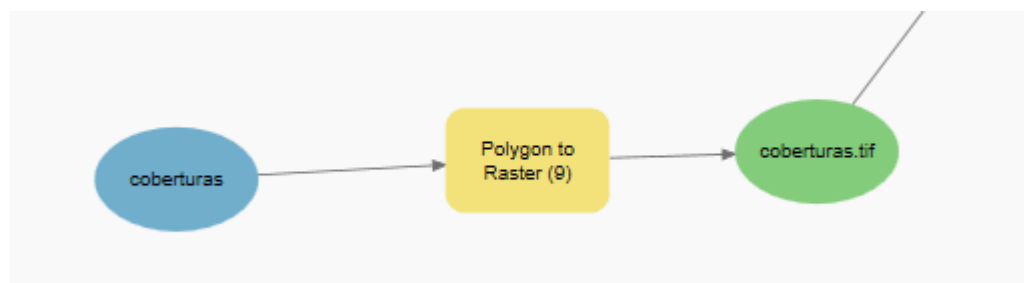


Figura 11. Componente de coberturas del suelo de la susceptibilidad a remoción en masa

Continuando con el fenómeno de inundación, las variables consideradas para dicho fenómeno fueron cobertura del suelo, geología, pendiente, distancia a drenajes, forma de la cuenca, densidad de red hidrográfica y tipo de paisaje. En la Tabla 20 se muestran las variables utilizadas para modelar este fenómeno, los valores asignados y la suma por columna de ellos.

Tabla 20. Variables y valores de la matriz para estimación de ponderación para susceptibilidad en inundación y suma de columnas

Variables	Pendiente	Distancia drenajes	Geología	Tipo de paisaje	Cobertura suelo	Densidad hidrografía	Forma cuenca
Pendiente	1	3	5	3	5	5	7
Distancia drenajes	$\frac{1}{3}$	1	3	5	3	5	5
Geología	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	1	3	3	5	5
Tipo de paisaje	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	1	3	5	5
Cobertura del suelo	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	3	3
Densidad de hidrografía	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	1	1
Forma de la cuenca	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	1	1
Suma por columna	2,41	5,27	10,07	12,73	15,67	25,000	27,000

Se estimó la matriz normalizada, según la Tabla 21.

Tabla 21. Matriz normalizada y pesos ponderados obtenidos para susceptibilidad en inundación y suma de columnas

Variables	P	DD	G	TP	CS	DH	FC	Promedio filas (pesos ponderados)
Pendiente	0,43	0,57	0,50	0,24	0,32	0,20	0,26	0,36
Distancia drenajes	0,14	0,19	0,30	0,39	0,19	0,20	0,19	0,23
Geología	0,08	0,06	0,10	0,24	0,19	0,20	0,19	0,15
Tipo de paisaje	0,14	0,04	0,03	0,08	0,19	0,20	0,19	0,12
Cobertura del suelo	0,08	0,06	0,03	0,03	0,06	0,12	0,12	0,07
Densidad hidrografía	0,08	0,04	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04
Forma de la cuenca	0,06	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03

Luego, se obtuvo el vector A_w .

$$A_w = \begin{bmatrix} 2,94 \\ 1,98 \\ 1,23 \\ 0,90 \\ 0,52 \\ 0,27 \\ 0,24 \end{bmatrix}$$

Así, se estimó el λ_{max} a partir del promedio de la suma de los cocientes entre A_w y las ponderaciones estimadas.

$$\lambda_{max} = \frac{8,24 + 8,68 + 8,14 + 7,29 + 7,25 + 7,28 + 7,41}{7} = 7,76$$

Con el λ_{max} calculado, se obtuvo el IC y por último la RC.

$$IC = \frac{7,76 - 7}{7 - 1} = \frac{0,76}{6} = 0,126$$

$$RC = \frac{0,126}{1,32} \cong 0,095$$

Las clasificaciones de las coberturas del suelo y los ítems internos de geología se mantuvieron igual para inundación que para remoción en masa. En lo que a la pendiente se refiere, las clasificaciones empleadas para la susceptibilidad a inundación, se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Intervalos de clasificación de la pendiente para la susceptibilidad a inundación

Clasificación	Descripción	Grados (°)	Susceptibilidad
1	Totalmente plana	0 – 3	Muy baja
2	Suavemente inclinada	3 – 7	Baja
3	Inclinada	7 – 12	Moderada
4	Abrupta	12 – 50	Alta
5	Escarpada	> 50	Muy alta

De manera general, la delimitación político-administrativa de Sevilla no coincide de muy buena manera con las cuencas hidrográficas. Por tanto, se consideró solo las porciones de las cuencas hidrográficas presentes en el municipio, que son cuatro: Bugalagrande, La Paila, Las Canas y La Vieja. Para la forma de la cuenca, se aplicó la siguiente ecuación, correspondiente al índice de compacidad de Gravelius (Camino et al. 2018). Ha de mencionarse que las variables se hicieron con base en las regiones de las cuencas que coincidían con la zona de estudio.

$$Kc = \frac{\text{Perímetro de la cuenca}}{2\pi \left(\frac{\text{Área de la cuenca}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

Los valores resultantes se clasifican de acuerdo con la Tabla 23.

Tabla 23. Intervalos de clasificación de la forma de la cuenca para la susceptibilidad a inundación

Clasificación	Forma	KC
1	Rectangular	>1,75
2	Oval oblonga a rectangular oblonga	1,5 – 1,75
3	Oval redonda a oval oblonga	1,25 – 1,5
4	Casi redonda a oval redonda	1 – 1,25

La densidad de la red hidrográfica fue calculada para cada cuenca con la siguiente ecuación, introducida por Horton en 1945 (González 2004).

$$D = \frac{\sum L}{S}$$

Donde $\sum L$ hace referencia a la sumatoria de todas las longitudes de los cauces de cada cuenca, y S es el área total de la cuenca. La densidad resultante se clasificó de acuerdo con la Tabla 24.

Tabla 24. Intervalos de clasificación de la densidad hidrográfica para la susceptibilidad a inundación

Clasificación	Rango de densidad (km/km ²)	Descripción
2	0 – 0,33	Baja densidad de cuerpos de agua
3	0,33 – 0,66	Media densidad de cuerpos de agua
4	0,66 – 1	Alta densidad de cuerpos de agua

Los rangos de distancias a cuerpos de agua fueron establecidos por el manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales establece que aquellas zonas que se encuentran a más de 800 m poseen menos susceptibilidad a inundarse, siendo mucho menor aquella de las zonas localizadas a más de 2 km de los ríos. Así se evidencia en la Tabla 25.

Tabla 25. Intervalos de clasificación de distancias a cuerpos de agua para la susceptibilidad a inundación

Clasificación	Rango de distancia (m)
2	0 – 800
3	800 – 2000
4	>2000

Existen cuatro (4) tipos de paisajes en Sevilla. Estos corresponden a lomerío, piedemonte, valle y montaña. Los lomeríos son elevaciones naturales de menor desnivel que una montaña (menos de 300 m), cuyas laderas presentan una inclinación promedio entre 7 y 12%. El piedemonte es una planicie con topografía de glacís, pendientes regulares entre 2 y 15% y que ha sido formado por la sedimentación de materiales transportados por corrientes de agua. Los valles son geoformas agradacionales que corresponden a zonas amplias y planas a ligeramente planas, cuyas pendientes son menores de 3%. Las montañas son elevaciones naturales de más de 300 metros de desnivel, con topografía abrupta, vertientes largas de pendientes fuertes de hasta 75% de inclinación. Para esta variable, la Tabla 26 presenta los valores de clasificación.

Tabla 26. Clasificación para el paisaje

Clasificación	Paisaje
1	Montaña
3	Lomerío
4	Piedemonte
5	Valle

Finalmente, se estimaron las ponderaciones de las variables para avenidas torrenciales. Las variables contempladas fueron geología, geomorfología, pendiente, jerarquía de los drenajes, usos de la tierra, cobertura vegetal y tipo de suelos. Se dividió la ponderación de las variables en tres grupos: morfometría (pendientes y drenajes), suelos (uso, cobertura y tipo) y avenida torrencial (geomorfología, geología, susceptibilidad morfométrica y susceptibilidad del suelo). En la Tabla 27 se presenta la matriz con las variables para estimar la susceptibilidad por morfometría, junto con sus valores.

Tabla 27. Variables y valores de la matriz para estimación de ponderación para susceptibilidad morfométrica

Variables	P	DN	Ponderación
Pendiente (P)	1	3	0,75
Jerarquía Drenaje (JD)	$\frac{1}{3}$	1	0,25
RC	0%		1

Para el caso de la susceptibilidad por suelos, la Tabla 28 muestra la matriz con las variables utilizadas, junto con sus valores.

Tabla 28. Variables y valores de la matriz para estimación de ponderación para susceptibilidad del suelo

Variables	CV	TS	UT	Ponderación
Cobertura vegetal (CV)	1	5	3	0,637
Tipo de suelo (TS)	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{3}$	0,105
Uso de la tierra (UT)	$\frac{1}{3}$	3	1	0,258
RC	3,3%			1

Al estimar ambos tipos de susceptibilidad, tanto para morfometría como suelos, fue posible estimar las ponderaciones de las variables que determinan la susceptibilidad a avenidas torrenciales. Así se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29. Variables y valores de la matriz para estimación de ponderación para susceptibilidad a avenidas torrenciales

Variables	GM	G	SM	SS	Ponderación
Geomorfología (GM)	1	5	1	3	0,399
Geología (G)	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0,083
Susceptibilidad morfométrica (SM)	1	3	1	3	0,357
Susceptibilidad del suelo (SS)	$\frac{1}{3}$	3	$\frac{1}{3}$	1	0,161
RC	4,3%				1

La Tabla 30 muestra los rangos de clasificación para las pendientes, en el caso del cálculo a la susceptibilidad de avenidas torrenciales.

Tabla 30. Clasificación para la pendiente en la susceptibilidad a avenidas torrenciales

Clasificación	Descripción	Grados (°)	Susceptibilidad
5	Plana a suavemente inclinada	< 5	Muy alta
4	Inclinada a muy inclinada	5 – 15	Alta
3	Abrupta	15 – 30	Moderada
2	Escarpada	30 – 45	Baja
1	Totalmente escarpada	> 100	Muy baja

Las clasificaciones dadas para las componentes geológicas, las unidades geomorfológicas, la cobertura y el tipo (taxonomía) del suelo para avenidas torrenciales fueron las mismas que se emplearon para remoción en masa e inundación.

La jerarquía de drenaje da una idea del orden o cantidad de caudal que transporta el afluente hídrico. La Tabla 31 muestra la clasificación dada a los cuerpos de agua en función de su jerarquía.

Tabla 31. Clasificación a los cuerpos de agua de acuerdo con su jerarquía

Clasificación	Descripción	Susceptibilidad
5	Ríos de cuarto orden	Muy alta
3	Ríos de tercer orden	Moderada
2	Ríos de primer y segundo orden	Baja

Para los usos de la tierra, esta variable integra condiciones del medio físico natural con situaciones relativas a la utilización real a que ha sido sometido el territorio. La Tabla 32 muestra los usos de la tierra en Sevilla, así como su respectiva clasificación.

Tabla 32. Clasificación a los usos de la tierra

Clasificación	Descripción	Susceptibilidad
5	Bosques moderadamente intervenidos. Suelos que impiden el crecimiento de la vegetación, incluyendo la infraestructura urbana.	Muy alta
4	Ganadería extensiva y pastizales. Área utilizadas para pastoreo siendo susceptibles a procesos erosivos.	Alta
3	Cultivos permanentes y semipermanentes. En síntesis, áreas agrícolas con alto grado de intervención y sin técnicas de conservación de suelos.	Moderada
2	Herbazales. En general, se presentan en zonas de taludes, vertientes y colinas.	Baja
1	Plantaciones forestales y bosque sin ninguna clase de intervención. Involucra el bosque denso	Muy baja

Obtenidos los resultados de la modelación de todos los fenómenos, estos formaron parte de la BDG. No obstante, antes de implementarla, fue necesario modelarla para evitar errores, redundancias y otros elementos que pudieran afectar su funcionamiento. Considerando la temática mencionada, se diseñó para que pudiese recibir tanto información geográfica como no geográfica. Como en toda BDG, la modelación y el diseño tuvo origen en el Modelo Conceptual. En él contempló la cardinalidad entre los objetos, independientemente de su tipo (geográfico o no geográfico). Además, se establecieron los atributos de cada entidad. La Tabla 33 muestra las entidades que formaron parte de la BDG, así como su rol. Por su parte, la Figura 12 muestra el Modelo Conceptual diseñado para la BDG.

Tabla 33. Entidades geográficas y no geográficas de la BDG

Entidad	Tipo	Origen	Rol en la BDG
Susceptibilidad Remoción en Masa	Geográfica	Propia	Susceptibilidad categorizada por Remoción en Masa. Se incluye como base vectorial.
Susceptibilidad Inundación	Geográfica	Propia	Susceptibilidad categorizada por Inundación. Se incluye como base vectorial.
Susceptibilidad Avenida Torrencial	Geográfica	Propia	Susceptibilidad categorizada por Avenida Torrencial. Se incluye como base vectorial.
Persona	No geográfica	N/A	Encargados de reportar los fenómenos.
Administradores	No geográfica	Propia	Encargados de gestionar elementos de la BD, como la edición o eliminación de los eventos reportados por las personas.
Reportes eventos	Geográfica	Propia	Tabla que se encarga de almacenar toda la información relacionada con el reporte de los fenómenos.
Municipio	Geográfica	CVC	Límites político-administrativos del Valle del Cauca. Se incluyen como base vectorial.
Vías	Geográfica	Propia	Elementos viales para la estimación de las rutas de atención médicas más cortas
Centros médicos	Geográfica	Secretaría de Infraestructura Departamental	Elementos de atención en salud, claves para atender eventos de mediano-alto impacto

Modelo Conceptual para la susceptibilidad de fenómenos naturales

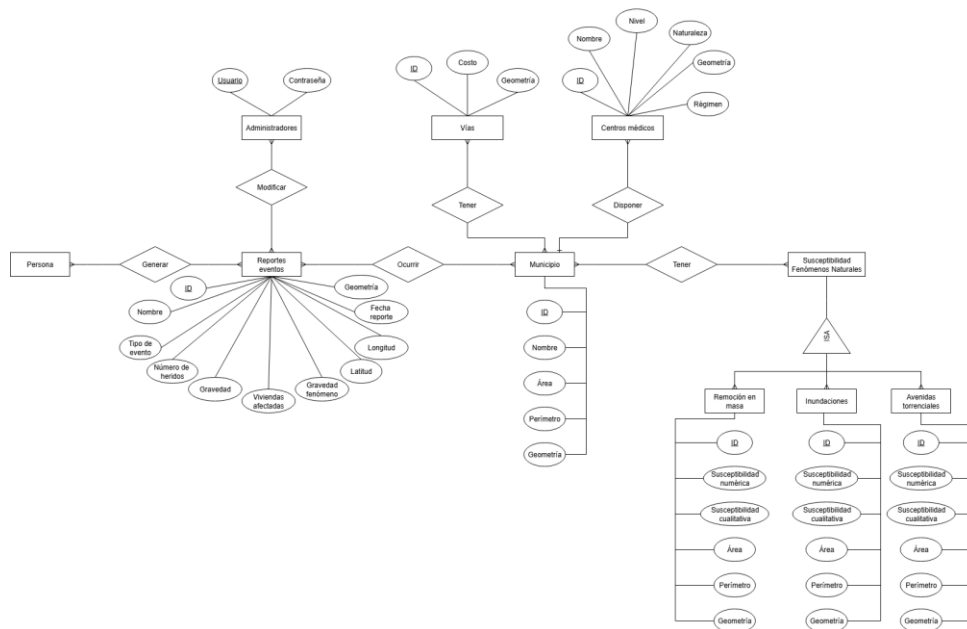


Figura 12. Modelo Conceptual de la base de datos de fenómenos naturales en Sevilla

la 1FN se cumple totalmente. Pasando con la Segunda Forma Normal (2FN), se dice que se cumple cuando, además de cumplirse la 1FN, para cada atributo no clave se necesita la clave primaria completa, lo cual también sucede, pues cada clave primaria de cada elemento es distintiva, y a partir de ella se puede extraer cualquier información del registro, así que la 2FN también se cumple. Por último, se dice que se cumple la 3FN si, además de cumplirse la 1FN y la 2FN, ninguno de los atributos de ninguna tabla dependen transitivamente de la clave primaria, lo cual también se cumple, pues la clave primaria únicamente funciona como identificador único para cada registro, y no tiene incidencia alguna para los atributos restantes.

Continuando con el modelamiento de la BDG, se creó el Modelo Físico, que contempla únicamente las entidades con geográficas que forman parte de la BDG. En este modelo la información se agrupa por **Temas**, **Grupos** y, finalmente, **Objetos** (que son las entidades geográficas ya mostradas). También se definen las topologías de estas entidades. Es decir, su representación espacial: punto, línea o polígono. La Figura 14 muestra el Modelo Físico construido, dividido entre dos (2) **Temas**, cuatro (4) **Grupos** y siete (7) **Objetos**.

Modelo Físico para la susceptibilidad de fenómenos naturales

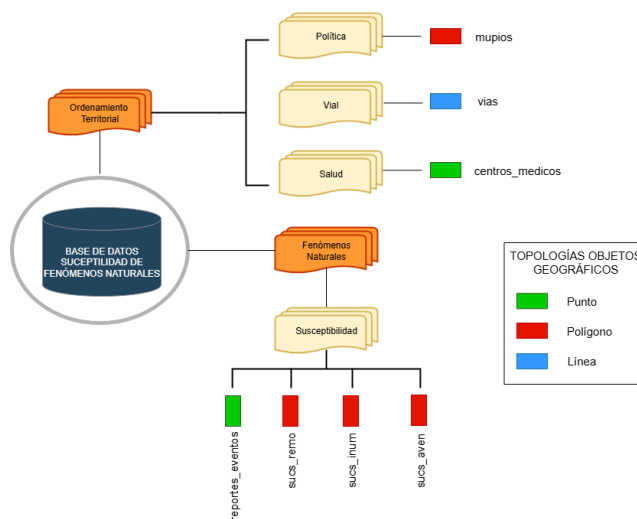


Figura 14. Modelo Físico de la base de datos de fenómenos naturales en Sevilla

Para darle sentido a lo planteado en el Modelo Lógico y conectar esta información con lo propuesto en el Modelo Físico, por último, en lo que a modelación de la BDG se refiere, se creó el Catálogo de Objetos Geográficos (COG). En él COG se establecieron los atributos de cada entidad y los dominios de aquellos atributos que disponían de esta característica en lenguaje natural, según la estructura del Modelo Físico. Las Figuras 15, 16, 17 y 19 muestran la información general de la BDG, el **Tema** de Fenómenos Naturales, el **Grupo** de Susceptibilidad, y el **Objeto** de Susceptibilidad en remoción en masa, respectivamente.

1. Formato para la Documentación del Catálogo de Objetos						
ELEMENTO	DEFINICIÓN				M	F T
1.1. NOMBRE	Base de datos para el seguimiento de la susceptibilidad y la ocurrencia de diversos fenómenos naturales en Sevilla, Valle del Cauca				R	U T
1.2. ALCANCE	Infraestructura, Población, Fenómenos Naturales, Suelo				R	U T
1.3. CAMPO DE APLICACIÓN	Temática de seguimiento a la susceptibilidad de los fenómenos, sus apariciones y afectaciones de infraestructura y población en Sevilla, Valle del Cauca.				R	N T
1.4. NÚMERO DE LA VERSIÓN	Primera				R	N T
1.5. FECHA DE LA VERSIÓN	11 de julio de 2025				R	U F
1.6. REFERENCIA	Duque, J., Lozano, L., Palomino, J. (2025). Base de Datos para el seguimiento de la susceptibilidad y la ocurrencia de diversos fenómenos naturales en Sevilla, Valle del Cauca, Primera Edición. Cali, Colombia (4 de agosto de 2025)				O	U T
1.7. CATEGORÍA DEL CATÁLOGO	Fenómenos naturales, Municipios, Vías, Centros médicos, Susceptibilidad a fenómenos				O	N T
1.8. PRODUCTOR	Universidad del Valle, Calle 13 #100-00, Colombia, (602) 3212100, https://www.univalle.edu.co/				R	U T
1.9. LENGUAJE FUNCIONAL	PostgreSQL				C	U T

M	Mandatoriedad	R = requerido
		O = opcional
		C = condicional
F	Frecuencia Máxima	U = único
		N = muchos
T	Tipo de dato	T = texto
		F = fecha

Figura 15. Información general de la BDG

2. Formato para la documentación de Temas						
ELEMENTO	DEFINICIÓN				M	F T
2.1. NOMBRE	Fenómenos Naturales				R	U T
2.2. DEFINICIÓN	Evento o proceso que ocurre en la naturaleza, sin intervención humana, resultado de las dinámicas propias del planeta o del universo.				R	U T
2.3. CÓDIGO	01				R	U T
2.4. GRUPOS	Susceptibilidad				R	N T

Figura 16. Ejemplo de información de los temas de la BDG

3. Formato para la documentación de Temas						
ELEMENTO	DEFINICIÓN				M	F T
3.1. NOMBRE	Susceptibilidad				R	U T
3.2. DEFINICIÓN	Condición de aparición de un fenómeno en un determinado lugar, en función de las diversas condiciones ambientales que tiene dicho lugar.				R	U T
3.3. CÓDIGO	0101				R	U T
3.4. OBJETOS	Reportes eventos, Susceptibilidad remoción en masa, Susceptibilidad inundaciones, Susceptibilidad avenidas torrenciales				R	N T

Figura 17. Ejemplo de información de los grupos de la BDG

4. Formato para la documentación de Objetos					
4.1. NOMBRE	susc_remo	4.3. CÓDIGO		010102	
4.2. DEFINICIÓN	Susceptibilidad de un área al fenómeno natural de remoción en masa				
4.4. ALIAS	Susceptibilidad remoción en masa				
4.8. SUBTIPO					
5. ATRIBUTOS					
5.1. NOMBRE	5.2. DEFINICIÓN	5.3. ALIAS	5.4. CÓDIGO DEL	5.5. TIPO DE DATO	5.6. UNIDAD DE MEDIDA
id	Valor único para cada una de las zonas con susceptibilidad al fenómeno	ID	01010201	Entero	Ninguna
susc_num	Valor numérico para cada una de las zonas con susceptibilidad al fenómeno	Susceptibilidad numérica	01010202	Entero	Ninguna
susc_cuali	Valor cualitativo para cada una de las zonas con susceptibilidad al fenómeno	Susceptibilidad cualitativa	01010203	Texto	Ninguna
area	Superficie comprendida dentro de un perímetro para las zonas susceptibles al fenómeno	Área	01010204	Decimal	Kilómetros cuadrados
perimetro	Medida de la longitud de la línea que rodea la superficie para las zonas susceptibles al fenómeno	Perímetro	01010205	Decimal	Kilómetros
geometria	Posición geográfica de cada zona susceptible al fenómeno	Geometría	01010206	Geométrico	Ninguna
6. DOMINIOS					
ATRIBUTO	6.1. ETIQUETA	6.2. CÓDIGO	6.3. DEFINICIÓN		
susc_num	1	0101020201	Indica que el fenómeno es muy poco susceptible		
susc_num	2	0101020202	Indica que el fenómeno es poco susceptible		

Figura 18. Ejemplo de información de un objeto de la BDG

Una vez que la BDG fue modelada y tanto la información secundaria de la CVC como la de Secretaría de Infraestructura Departamental disponía de la estructura diseñada en, se creó la BDG en PostgreSQL. Las tablas cargadas a la BDG se presentan en la Figura 19.

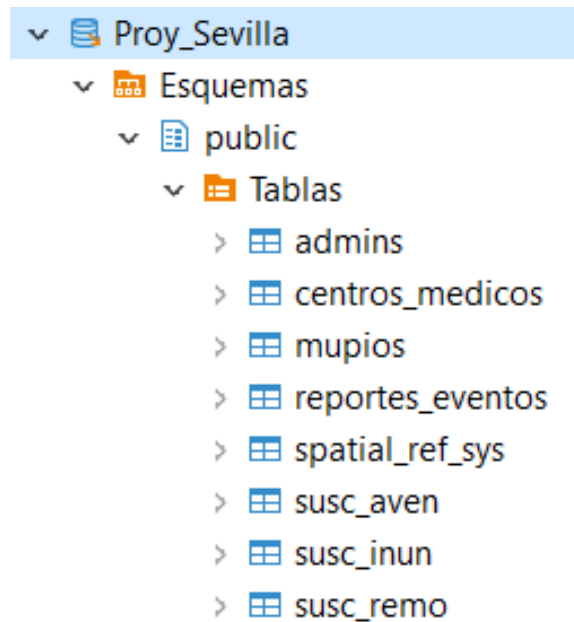


Figura 19. Estructura de la BDG

Una vez que las capas estaban al interior de la BDG, se crearon los dominios establecidos en el Modelo Lógico y en el Catálogo de Objetos Geográficos. La estructura de la creación de los dominios consistió en crear el dominio, seguido de sus valores, y luego alterar la tabla, de manera que los dominios fuesen recibidos satisfactoriamente. La Figura 20 muestra los dominios relacionados con los reportes de los eventos, mientras que la Figura 21 muestra aquellos que están implicados con la susceptibilidad, y la Figura 22 evidencia los dominios relacionados con los centros médicos.

```
CREATE TYPE tipo_evento_enum AS ENUM ('Inundación', 'Remoción en masa', 'Avenida torrencial');
CREATE TYPE gravedad_enum AS ENUM ('No tan grave', 'Grave', 'Muy grave');
CREATE TYPE gravedad_fenomeno_enum AS ENUM ('Leve', 'Moderado', 'Grave');

ALTER TABLE reportes_eventos
  ALTER COLUMN tipo_evento TYPE tipo_evento_enum USING tipo_evento::tipo_evento_enum,
  ALTER COLUMN gravedad TYPE gravedad_enum USING gravedad::gravedad_enum,
  ALTER COLUMN gravedad_fenomeno TYPE gravedad_fenomeno_enum USING gravedad_fenomeno::gravedad_fenomeno_enum;
```

Figura 20. Creación de dominios para el reporte de eventos

```

CREATE DOMAIN susceptibilidad_cuantitativa AS INTEGER
CHECK (VALUE IN (1, 2, 3, 4, 5));

ALTER TABLE susc_aven
ALTER COLUMN susc_num TYPE susceptibilidad_cuantitativa;

ALTER TABLE susc_inun
ALTER COLUMN susc_num TYPE susceptibilidad_cuantitativa;

ALTER TABLE susc_remo
ALTER COLUMN susc_num TYPE susceptibilidad_cuantitativa;

CREATE TYPE susceptibilidad_cualitativa AS ENUM ('Muy baja', 'Baja', 'Media', 'Alta', 'Muy alta');

ALTER TABLE susc_aven
ALTER COLUMN susc_cuali TYPE susceptibilidad_cualitativa
USING susc_cuali::susceptibilidad_cualitativa;

ALTER TABLE susc_inun
ALTER COLUMN susc_cuali TYPE susceptibilidad_cualitativa
USING susc_cuali::susceptibilidad_cualitativa;

ALTER TABLE susc_remo
ALTER COLUMN susc_cuali TYPE susceptibilidad_cualitativa
USING susc_cuali::susceptibilidad_cualitativa;

```

Figura 21. Creación de dominios para la susceptibilidad de fenómenos

```

CREATE TYPE naturaleza_centro_medico AS ENUM ('Privada', 'Pública', 'Pública o Mixta');

ALTER TABLE centros_medicos
ALTER COLUMN naturaleza TYPE naturaleza_centro_medico
USING naturaleza::naturaleza_centro_medico;

CREATE TYPE regimen_centro_medico AS ENUM ('Contributivo', 'Subsidiado', 'Subsidiado y Contributivo');

ALTER TABLE centros_medicos
ALTER COLUMN regimen TYPE regimen_centro_medico
USING regimen::regimen_centro_medico;

CREATE DOMAIN nivel_centro_medico AS INTEGER
CHECK (VALUE IN (1, 2, 3));

ALTER TABLE centros_medicos
ALTER COLUMN nivel TYPE nivel_centro_medico;

```

Figura 22. Creación de dominios para los centros médicos

Note de la Figura 19 que las vías no están en la BDG. Esto debido a que esta capa fue elaborada en su totalidad, e inicialmente no era válida para realizar un proceso de ruteo correcto. Cuando se traza una capa de tipo línea como lo es una vía, siempre se tienen trazos dibujados, pero nunca la segmentación de cada tramo de vía. Ambos casos se muestran en la Figura 23.

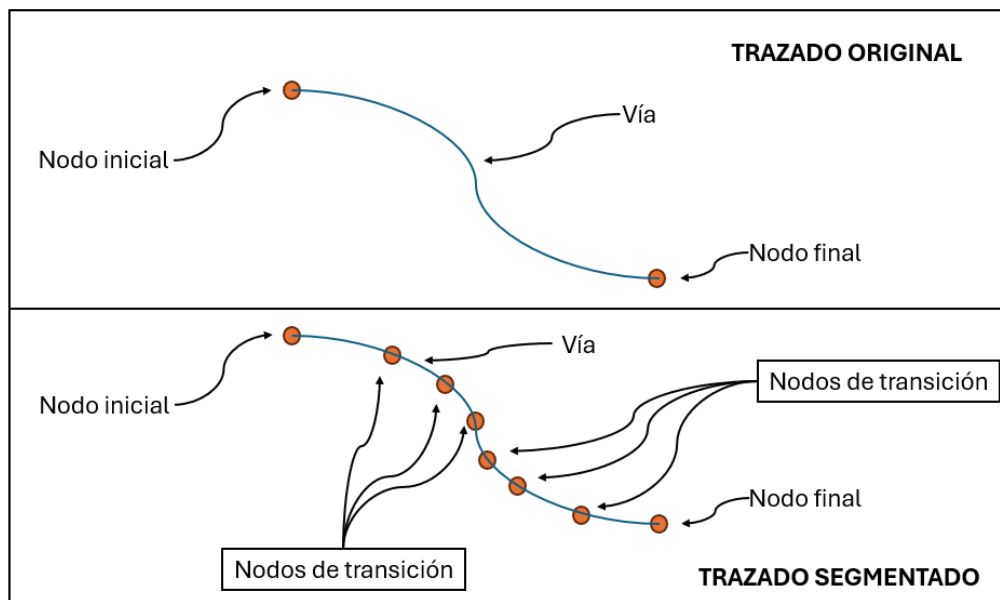


Figura 23. Diferencia entre un trazado digitalizado y un trazado segmentado

Para el ruteo, los nodos de transición son fundamentales. Un nodo es la representación espacial del sitio donde la línea realizó un cambio de dirección, marcado en el espacio. Como se aprecia, en el trazado original, la línea siempre va a disponer únicamente de dos nodos: el inicial y el final. Este escenario para el diseño y estructuración del ruteo imposibilita una correcta estructuración. En cambio, los trazos segmentados que usan nodos de transición sí permiten una implementación de ruteo limpia, pues se estima el camino más corto nodo a nodo, segmento de línea a segmento de línea. Esta configuración es la primera que se debe hacer en una capa que represente un eje vial. También es la configuración más importante para obtener un ruteo correcto.

Para pasar del trazado original (que era la configuración que tenía la capa en un principio) al trazado segmentado por nodos de transición se utilizó un código en Python. Este código se desarrolló en Google Colaboratory, que es un entorno de trabajo basado en Python que Google dispone para desarrollar código. En el Anexo 1 se encuentra dicho código.

De esta manera, el código diseñado aumentó el número de registros de 134 líneas trazadas a 5475 líneas segmentadas por sus nodos de transición. Ahora bien, este nuevo archivo generado fue cargado a la BDG, pero aún sigue sin estar listo para ser una capa adecuada que soporte el proceso de ruteo. La Tabla 35 muestra las variables que se crearon al interior de la BDG para esta capa, así como su tipo de dato.

Tabla 34. Variables utilizadas y su tipo de dato para el uso del ruteo

Variable	Tipo de dato
x1	Doble precisión
y1	Doble precisión
x2	Doble precisión
y2	Doble precisión
source	Entero
target	Entero
costo	Doble precisión

Las variables **x1** y **y1** hacen referencia a las coordenadas del primer nodo, mientras que **x2** y **y2** son del segundo nodo. **Source** es el identificador del nodo de inicio, mientras que **target** es el identificador del nodo de fin. El **costo** es la distancia entre ambos nodos, de acuerdo con la Figura 24.

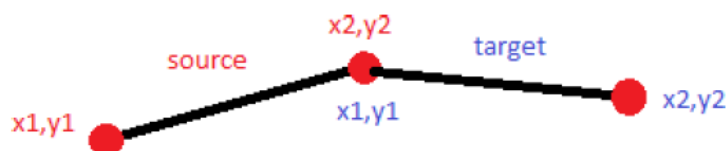


Figura 24. Representación gráfica de las variables utilizadas para el uso del ruteo

Los comandos de código ejecutados en PostgreSQL se presentan en el Anexo 2. Dichos comandos permitieron que la capa de vías fuese funcional para realizar procesos de ruteo. Con el diseño y la implementación del ruteo en la BDG se dio por finalizada la componente metodológica.

Para culminar con la metodología, las capas de susceptibilidad, al ser tan densa en información, se cargaron a Geoserver. La Figura 25 muestra las capas, su ubicación y los estilos definidos.

Capas					
+ Agregar capa... + Agregar grupo de capas... + Agregar grupo de estilo...					
Orden de dibujo	Tipo	Capa	Estilo por defecto	Estilo	Eliminar
1 ↓	Layer	proyecto_final:susc_remo	☐	simbologia_remocion	⊖
2 ↑ ↓	Layer	proyecto_final:susc_inun	☐	simbologia_inundacion	⊖
3 ↑	Layer	proyecto_final:susc_aven	☐	simbologia_avenidas	⊖

Figura 25. Capas de susceptibilidad a fenómenos alojadas en Geoserver

6. Resultados

En lo que a modelación de fenómenos se refiere, en el Anexo 3, 4 y 5 se muestran las salidas gráficas de la susceptibilidad para remoción en masa, inundación y avenidas torrenciales, respectivamente. No obstante, la cuantificación de las regiones categorizadas brindó resultados bastante llamativos. Empezando por la remoción en masa, la susceptibilidad media predominó, abarcando poco más del 61% del municipio,

mientras que la susceptibilidad muy baja fue la menos representativa, con alrededor del 1%. Este fenómeno no presentó susceptibilidad muy alta. La Tabla 35 muestra el comportamiento numérico y porcentual de las zonas de susceptibilidad a remoción en masa.

Tabla 35. Áreas de las clases de susceptibilidad a remoción en masa

Susceptibilidad	Área (km²)	Representación porcentual
Muy baja	5,729	1,09
Baja	323,575	61,31
Media	102,224	19,37
Alta	96,212	18,23
TOTAL	527,74	100

Al igual que para la remoción en masa, la categoría de susceptibilidad muy alta brilló por su ausencia en la inundación. Para este fenómeno, la susceptibilidad baja también fue la más dominante, con un área de aproximadamente 293 km², mientras que la susceptibilidad alta también fue la menos representativa, con un área cercana a los 8,5 km². Las áreas y su equivalente porcentual se evidencian en la Tabla 36.

Tabla 36. Áreas de las clases de susceptibilidad a inundación

Susceptibilidad	Área (km²)	Representación porcentual
Muy baja	72,748	13,78
Baja	152,916	28,97
Media	293,666	55,64
Alta	8,474	1,61
TOTAL	527,74	100

Contrario a los fenómenos anteriores, las avenidas torrenciales sí disponen de zonas con susceptibilidad muy alta, aunque solo presentó un área de casi 2,5 km². En el otro lado de la balanza, la susceptibilidad baja abarcó casi 360 km². Las áreas y su equivalente porcentual para las clases de susceptibilidad a avenidas torrenciales se presentan en la Tabla 37.

Tabla 37. Áreas de las clases de susceptibilidad a avenidas torrenciales

Susceptibilidad	Área (km²)	Representación porcentual
Muy baja	8,119	1,55
Baja	358,066	67,91
Media	149,271	28,30
Alta	9,203	1,76
Muy alta	2,405	0,48
TOTAL	527,74	100

Por su parte, en lo que a la BDG se refiere, la Figura 26 muestra la configuración final de la BDG.

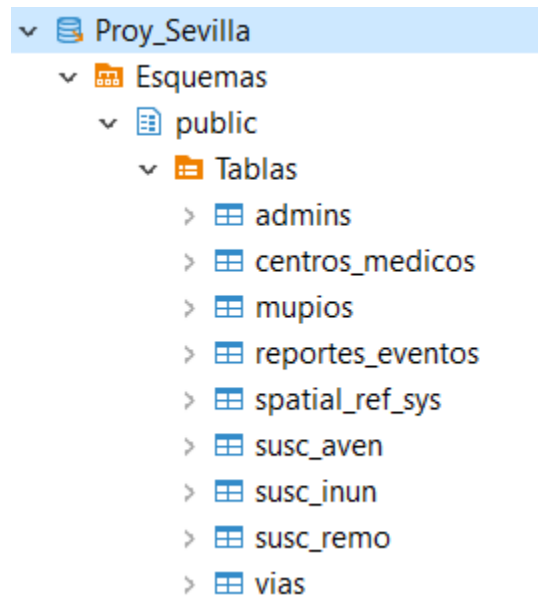


Figura 26. Estructura final de la BDG

Por otra parte, para probar la validez de las vías para soportar procesos de ruteo, se diseñó la siguiente estructura de código SQL, que toma los identificadores de cada nodo, de manera que se estima la ruta más corta entre ellos.

```
create or replace view ruteo as select seq, node, edge, cost, b.geom
from pgr_dijkstra (
    'select id, source, target, costo as cost, costo as reverse_cost
    from vias', 250, 1433) as a
left join vias as b on (a.edge=b.id)
```

Visualizado desde un software GIS al efectuar la conexión con la BDG, la ruta se muestra en la Figura 27.

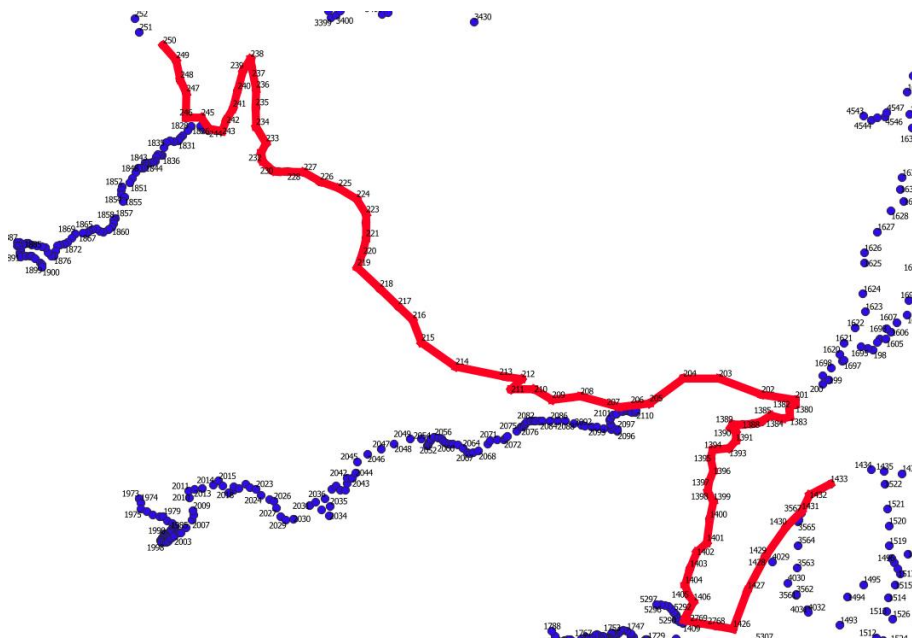


Figura 27. Trazado de ruta más corta entre los identificadores de un nodo (primer ejemplo)

De igual manera, si se cambia el valor del identificador de uno de los nodos (1788 en lugar de 1433), la vista ruteo modifica la ruta más corta entre estos nodos, según se muestra en la Figura 28.

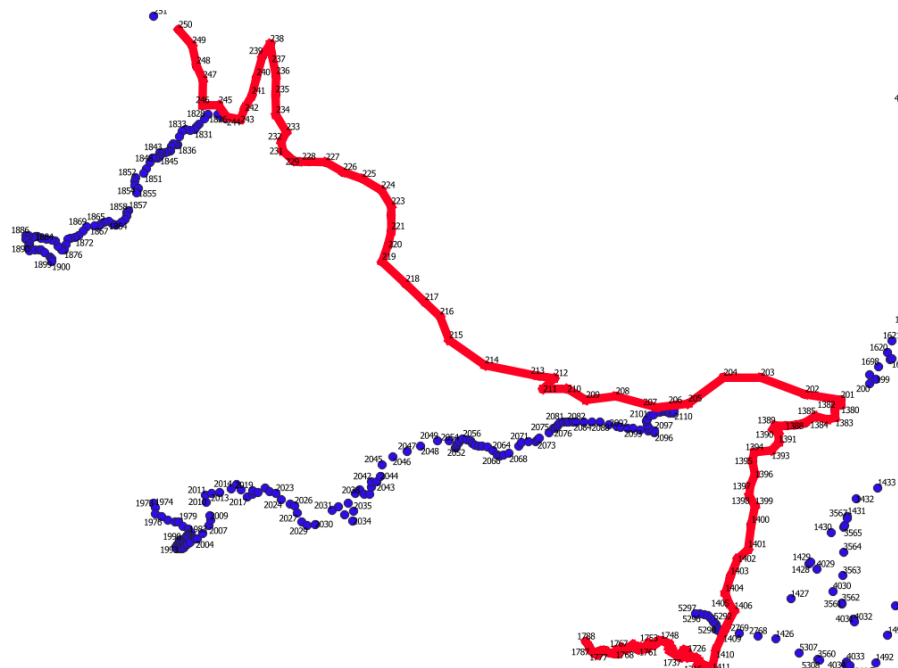


Figura 28. Trazado de ruta más corta entre los identificadores de un nodo (segundo ejemplo)

7. Conclusiones

En este estudio, la información disponible permitió analizar la importancia de diversos factores para estimar la susceptibilidad de los fenómenos analizados en el municipio de Sevilla, Valle del Cauca.

Con la metodología de AHP se jerarquizaron los diversos factores y se obtuvo el factor más importante para cada fenómeno. Por ejemplo, para la remoción en masa, la componente geomorfológica tuvo mayor impacto, con un 50%, mientras que la componente geomorfológica y las coberturas terrestres tan solo contaron con un impacto del 15%, cada una. En lo que a inundación se refiere, la pendiente dominó con un 36%; es decir, poco más de un tercio, mientras que la forma de la cuenca fue el factor menos relevante, con un 3%. Finalmente, para las avenidas torrenciales, la morfogénesis obtuvo casi un 40% de ponderación, mientras que la componente geológica solo dispuso de un 8%. Los factores mencionados, junto con los demás, fueron jerarquizados bajo algunos “subconjuntos”, que también fueron jerarquizados con el mismo método.

Los mapas de susceptibilidad presentaron, en dos de los tres casos, solo cuatro de las cinco categorías, siendo siempre la susceptibilidad baja y media la más predominante para los tres casos. Las susceptibilidades altas y muy bajas siempre representaron las categorías con menor impacto, salvo para el caso de la remoción en masa.

En términos generales, este análisis confirma la ausencia de información de calidad en estudios para la gestión del riesgo. Además, la información utilizada, en su inmensa mayoría, siempre fue a escala 1:100,000, lo que generaliza en demasía la cuantificación y categorización de los resultados. Así como es el caso de Sevilla, que solo ha centrado sus esfuerzos en la zona urbana, hay muchos más municipios que carecen de los documentos y estudios pertinentes para el análisis y la cuantificación de la susceptibilidad a los fenómenos.

8. Bibliografía

- Aceves-Quesada, Fernando, Jorge López-Blanco, and Ana Lillian Martin del Pozzo. 2006. "Determinación de Peligros Volcánicos Aplicando Técnicas de Evaluación Multicriterio y SIG En El Área Del Nevado de Toluca, Centro de México." *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 23(2): 113–24.
- Aringhieri, Roberto, Sara Bigharaz, Davide Duma, and Alberto Guastalla. 2022. "Fairness in Ambulance Routing for Post Disaster Management." *Central European Journal of Operations Research* 30(1): 189–211. <https://doi.org/10.1007/s10100-021-00785-y>.
- Boutilier, Justin J., and Timothy C.Y. Chan. 2020. "Ambulance Emergency Response Optimization in Developing Countries." *Operations Research* 68(5): 1315–34.
- Camino, Mariana et al. 2018. "Estudio Morfométrico de Las Cuencas de Drenaje de La Vertiente Sur Del Sudeste de La Provincia de Buenos Aires." *Revista Universitaria de Geografía* 27(1): 1–19. <https://www.redalyc.org/journal/3832/383257036005/383257036005.pdf>.
- Feizizadeh, Bakhtiar, Piotr Jankowski, and Thomas Blaschke. 2013. "A Spatially Explicit Approach for Sensitivity and Uncertainty Analysis of GIS-Multicriteria Landslide Susceptibility Mapping." *anko* (2013): 157–64.
- González, Askoa. 2004. "Análisis Morfométrico de La Cuenca y de La Red de Drenaje Del Río Zadorra y Sus Afluentes Aplicado a La Peligrosidad de Crecidas." *Boletín de la A.G.E.N.* 38: 311–29.
- Jonkman, S. N., A. Curran, and L. M. Bouwer. 2024. "Floods Have Become Less Deadly: An Analysis of Global Flood Fatalities 1975–2022." *Natural Hazards* 120(7): 6327–42. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06444-0>.
- Liu, Qiao et al. 2024. "Global, Regional and National Trends and Impacts of Natural Flood 1990–2022." *Bulletin of the World Health Organization* 102(6): 410–20.
- Pollock, William, and Joseph Wartman. 2020. "Human Vulnerability to Landslides." *GeoHealth* 4(10): 1–17.
- Poulton, Marcus, Anastasios Noulas, David Weston, and George Roussos. 2019. "Modeling Metropolitan-Area Ambulance Mobility under Blue Light Conditions." *IEEE Access* 7(October): 1390–1403.
- Saaty, Thomas L. 1977. "A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures." *Journal of Mathematical Psychology* 15(3): 234–81.
- Sarmiento, Paula. 2017. "Desarrollo y Análisis de Zonificación de Amenaza Por Fenómenos de Remoción En Masa."
- Sepúlveda, S. A., and D. N. Petley. 2015. "Regional Trends and Controlling Factors of Fatal Landslides in Latin America and the Caribbean." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15(8): 1821–33.
- Servicio Geologico Colombiano - SGC. 2017. *Guía Metodologica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo Por Movimientos En Masa Escala 1:25000*.
- Vidal, Paola. 2022. "Delimitación de Zonas Susceptibles a Inundación Para El Ordenamiento Territorial Del Municipio de Valencia, Departamento de Córdoba."

9. Anexos

```

#Instalación de librerías como geopandas (para leer y escribir archivos geográficos como shp) y shapely (para manejar geometrías de las capas)
!pip install geopandas shapely
#Importación de Google Drive para leer el archivo shape
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')
import geopandas as gpd
#Importación de LineString de Shapely, que permite crear líneas a partir de coordenadas
from shapely.geometry import LineString
#Definición de la ruta de la capa de vías a procesar
ruta_vias = "/content/drive/MyDrive/Proyecto_Sevilla/vias.shp"
#Lectura de la capa usando geopandas
vias = gpd.read_file(ruta_vias)
#Creación de una lista vacía para almacenar los segmentos generados
segmentos = []
#Iteración por cada línea del dataframe de la capa de vías
for idx, row in vias.iterrows():
    geom = row.geometry #Obtención de la geometría de las líneas
    #Se verifica que la geometría no sea nula
    if geom is None:
        continue
#Si la geometría es MultiLineString (varias líneas unidas), se descomponen en líneas individuales
    if geom.geom_type == 'MultiLineString':
        lines = list(geom) #Se convierte a lista de líneas individuales
    else:
        lines = [geom] #Si es solo una línea, se agrega a la lista
#Iteración por cada línea individual
    for line in lines:
        coords = list(line.coords) #Obtención de la lista de coordenadas de la línea
        #Iteración entre pares de coordenadas consecutivas para formar segmentos
        for i in range(len(coords) - 1):
            #Creación de nuevo segmento como línea entre dos puntos consecutivos
            segmento = LineString([coords[i], coords[i + 1]])
            #Se copian los atributos originales de la línea
            nueva_filas = row.copy()
            #Reemplazo de la geometría con el nuevo segmento
            nueva_filas.geometry = segmento
            #Se añade el nuevo segmento a la lista
            segmentos.append(nueva_filas)
#Creación de un nuevo GeoDataFrame con los nuevos segmentos
gdf_segmentos = gpd.GeoDataFrame(segmentos, crs=vias.crs)
#Exportación a un nuevo archivo shapefile de los segmentos creados
salida = "/content/drive/MyDrive/Proyecto_Sevilla/vias_segmentadas.shp"
gdf_segmentos.to_file(salida)

```

Anexo 1. Código Python para segmentar las vías por nodos

Nuevas columnas para las coordenadas de los nodos.

```
ALTER TABLE vias ADD COLUMN x1 double precision;  
ALTER TABLE vias ADD COLUMN y1 double precision;  
ALTER TABLE vias ADD COLUMN x2 double precision;  
ALTER TABLE vias ADD COLUMN y2 double precision;
```

Cálculo de coordenadas iniciales de los segmentos.

```
UPDATE vias SET x1 = ST_x(ST_PointN(st_lineMerge(geom), 1));  
UPDATE vias SET y1 = ST_y(ST_PointN(st_lineMerge(geom), 1));
```

Cálculo de coordenadas finales de los segmentos.

```
UPDATE vias SET x2 = ST_x(ST_PointN(st_lineMerge(the_geom),  
ST_NumPoints(st_lineMerge(geom))));  
UPDATE vias SET y2 = ST_y(ST_PointN(st_lineMerge(the_geom),  
ST_NumPoints(st_lineMerge(geom))));
```

Creación de topología de red.

```
SELECT pgr_createTopology('vias',0.00001, 'geom', 'id');
```

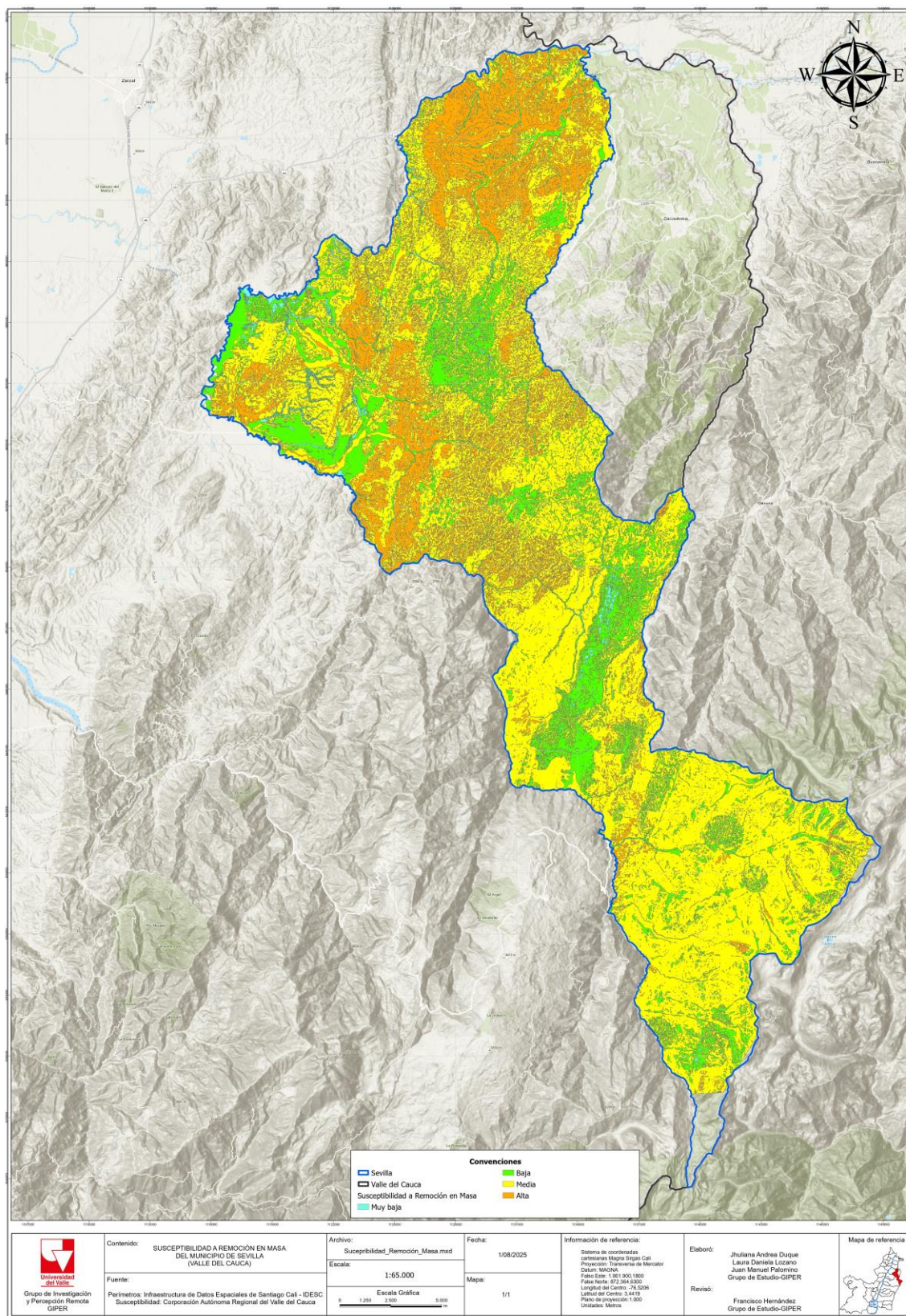
Creación de índices para los campos *source* y *target*.

```
CREATE INDEX ways_source_idx ON vias("source");  
CREATE INDEX ways_target_idx ON vias ("target");
```

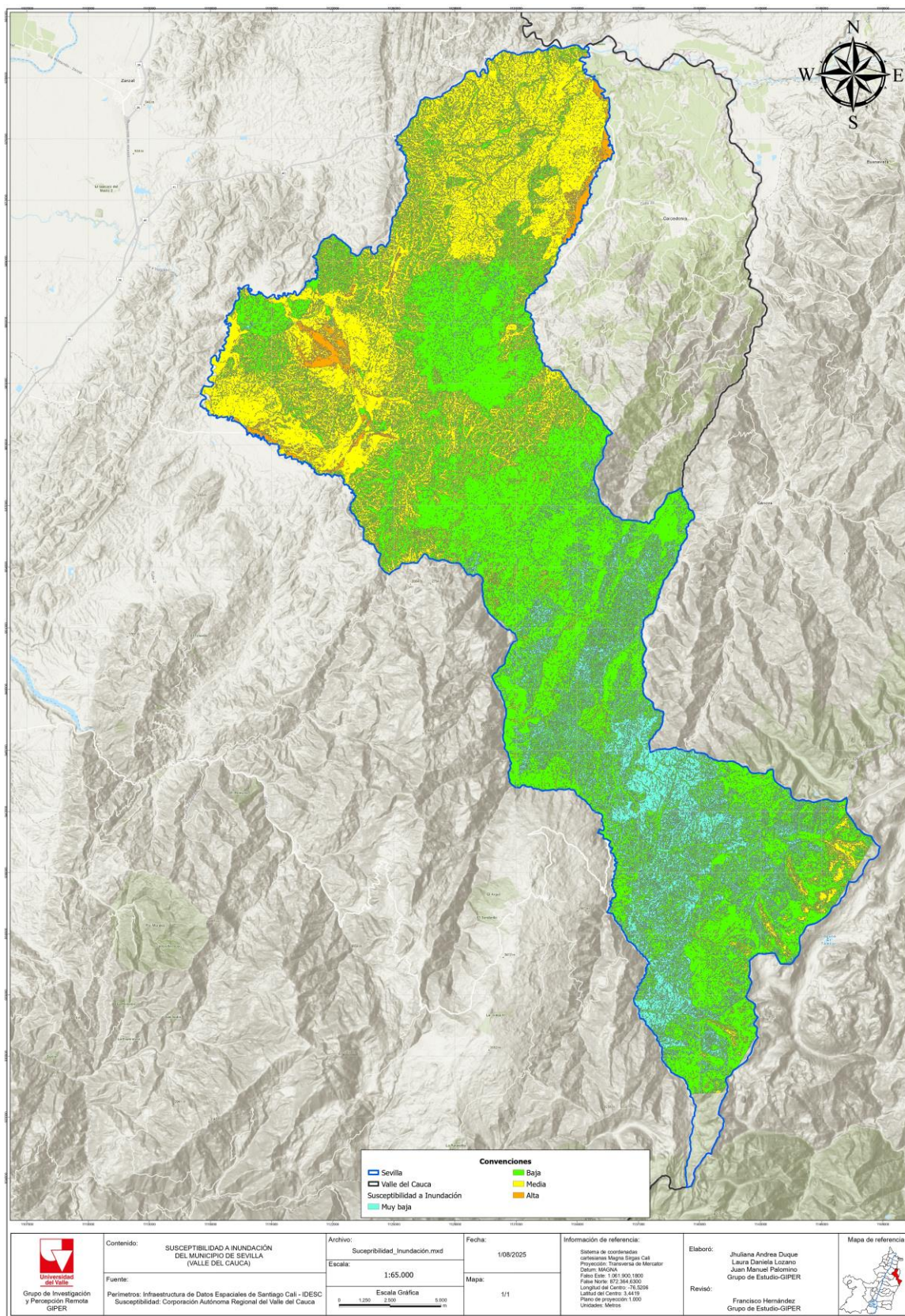
Asignación de costo (distancia entre nodos).

```
UPDATE vias SET costo = st_length(st_transform(geom,3115));
```

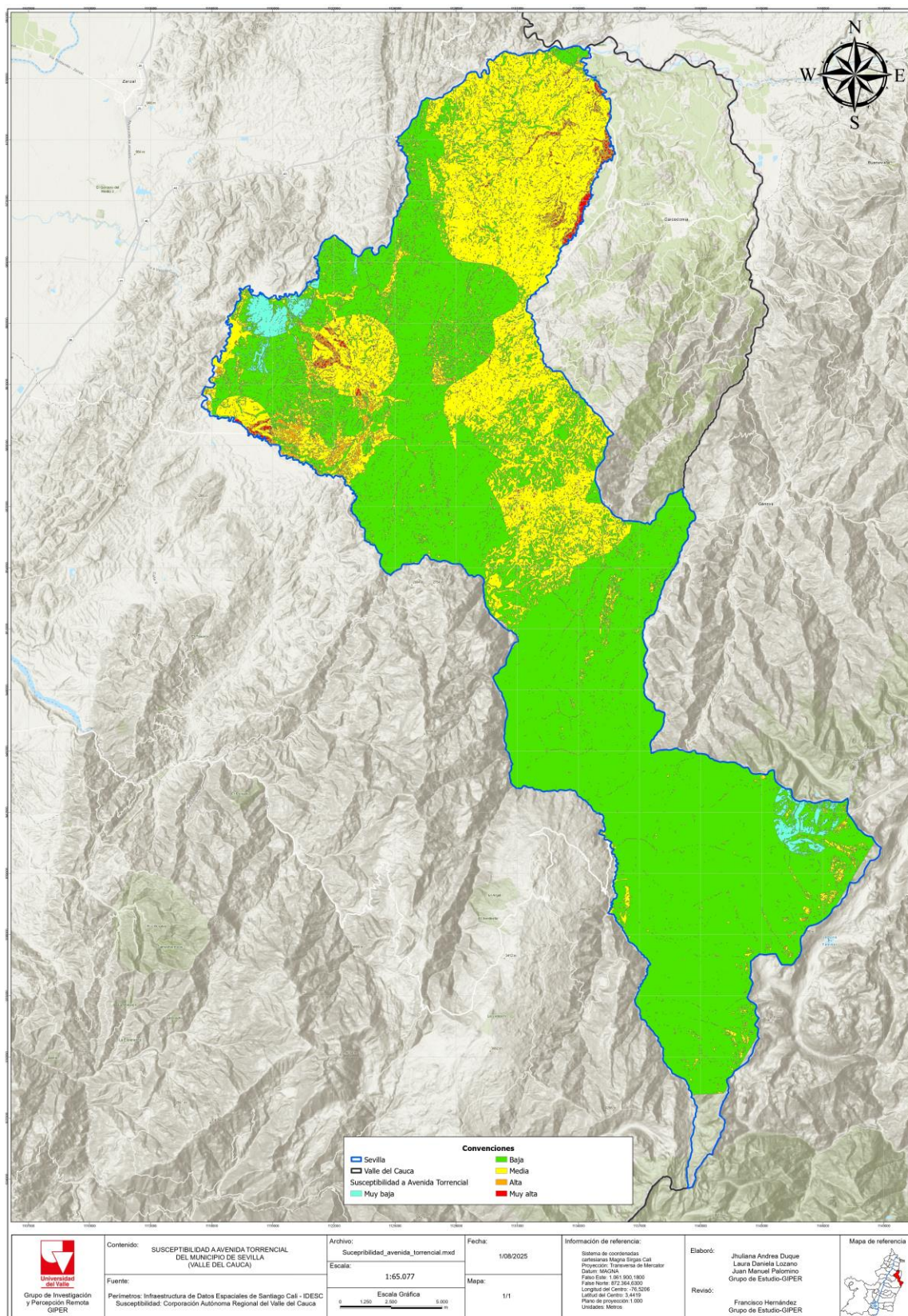
Anexo 2. Código SQL para configurar la capa de vías para soportar procesos de ruteo



Anexo 3. Susceptibilidad por remoción en masa en Sevilla, Valle del Cauca



Anexo 4. Susceptibilidad por inundación en Sevilla, Valle del Cauca



Anexo 5. Susceptibilidad por avenida torrencial en Sevilla, Valle del Cauca