





# APLICACIONES SIG PARA LA INGENIERÍA

## **COORDINADORES:**

Diego Fernando Gualdrón Alfonso  
José Julián Villate Corredor

## **AUTORES:**

Diego Fernando Gualdrón Alfonso  
José Julián Villate Corredor  
Pedro Santiago Reyes Medina  
Andrés Leonardo Silva Balaguera  
Jorge Luis Rodríguez González  
Omar Javier Daza Leguizamón  
Enrique Vera López



Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia  
Tunja  
2020

Aplicaciones SIG para la ingeniería/ GIS applications for engineering/ Gualdrón Alfonso, Diego Fernando; Villate Corredor, José Julián (Coordinadores). Tunja: Editorial UPTC, 2021. 162 pp.

ISBN 978-958-660-468-0

ISBN Digital 978-958-660-480-2

1. Sistemas de Información Geográfica. 2. Análisis multicriterio. 3. Sistema de gestión de pavimentos. 4. Microzonificación. 5. Geosimulación.

(Dewey 624 /21) (Thema TN TN - Ingeniería civil, topografía y construcción)



**Uptc**<sup>®</sup>  
Universidad Pedagógica y  
Tecnológica de Colombia



### Primera Edición, 2020

200 ejemplares (impresos)

Aplicaciones SIG para la ingeniería  
GIS applications for engineering

ISBN 978-958-660-468-0

ISBN Digital 978-958-660-480-2

### Colección de Investigación UPTC No. 175

Proceso de arbitraje doble ciego

Recepción: noviembre de 2019

Aprobación: septiembre de 2020

© Diego Fernando Gualdrón Alfonso, 2020

© José Julián Villate Corredor, 2020

© Pedro Santiago Reyes Medina, 2020

© Andrés Leonardo Silva Balaguera, 2020

© Jorge Luis Rodríguez González, 2020

© Omar Javier Daza Leguizamón, 2020

© Enrique Vera López, 2020

© Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2020

Editorial UPTC

Edificio Administrativo – Piso 4

Avenida Central del Norte No. 39-115, Tunja,

Boyacá

comite.editorial@uptc.edu.co

www.uptc.edu.co

### Rector, UPTC

Oscar Hernán Ramírez

### Comité Editorial

Manuel Humberto Restrepo Domínguez, Ph. D.

Enrique Vera López, Ph. D.

Yolima Bolívar Suárez, Mg.

Sandra Gabriela Numpaque Piracoca, Mg.

Olga Yaneth Acuña Rodríguez, Ph. D.

María Eugenia Morales Puentes, Ph. D.

Edgar Nelson López López, Mg.

Zaida Zarely Ojeda Pérez, Ph. D.

Carlos Mauricio Moreno Téllez, Ph. D.

### Editora en Jefe

Lida Esperanza Riscanevo Espitia

### Coordinadora Editorial

Andrea María Numpaque Acosta, Mg.

### Corrección de Estilo

Liliana Muñoz Gómez

### Imprenta

Búhos Editores Ltda.

Tunja - Boyacá

Libro financiado por la Dirección de Investigaciones de la UPTC. Se permite la reproducción parcial o total, con la autorización expresa de los titulares del derecho de autor. Este libro es registrado en Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 del 16 de marzo de 1995, el Decreto 2150 de 1995 y el Decreto 358 de 2000.

Libro resultado de investigación con SGI 2447 “Aplicación de sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la determinación de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja (Colombia)”

Citar este libro / Cite this book: Gualdrón Alfonso, Diego Fernando; Villate Corredor, José Julián (Coordinadores) (2020). *Aplicaciones SIG para la ingeniería*. Tunja: Editorial UPTC.

doi: <https://doi.org/10.19053/9789586604680>

## Resumen

En los últimos años la preocupación por la conservación y optimización de los recursos naturales y del medio ambiente, así como los demás problemas territoriales existentes, hacen necesario la recopilación, tratamiento y análisis de la información para el desarrollo de una investigación, que puede resultar laboriosa, compleja y costosa, es por esto que los sistemas de información geográfica (SIG) han tomado gran relevancia al momento de analizar problemas relacionados con información espacial, ya que permiten la automatización, visualización y manipulación de datos geográficos, convirtiéndose en una herramienta fundamental para la toma de decisiones.

Los SIG además de efectuar operaciones de manera confiable, proveen al usuario la información relacionada con fenómenos espaciales, la cual es de gran importancia en el ámbito investigativo, teniendo en cuenta que gran parte de la información sobre recursos naturales y ambientales que se maneja está vinculada con la información geográfica o espacial.

El presente libro es una compilación de resultados de investigaciones desarrolladas durante los años 2018 – 2019, enfocadas a las aplicaciones de los SIG en diversas áreas de la ingeniería civil.

**Palabras clave:** Análisis multicriterio, Geosimulación, Información geoespacial, Sistema de Gestión de Pavimentos, Sistemas de Información Geográfica, Microzonificación.

## Abstract

In recent years the concern for the conservation and optimization of natural resources and the environment, as well as existing territorial problems, make it necessary to collect, process and analyze information for the development of research, which can be laborious, complex and expensive, that is why Geographic Information Systems (GIS) have acquired significant relevance when analyzing problems related to spatial information, since they allow the automation, visualization and manipulation of geographic data, becoming a fundamental tool for the decision making.

GIS, besides to performing operations reliably, provide the user with information related to spatial phenomena, which has great importance in the research field, considering that a large part of the information on natural and environmental resources that is handled is linked with geographic or spatial information.

This book is a compilation of research results developed during the years 2018 - 2019, focused on the applications of GIS in various areas of civil engineering.

**Keywords:** Geographic Information Systems, Geosimulation, Geospatial information Management system, Microzoning, Multi-criteria analysis. Pavement.

# CONTENIDO

1. APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y EVALUACIÓN MULTICRITERIO EN LA DETERMINACIÓN DE ZONAS POTENCIALMENTE URBANIZABLES EN LA CIUDAD DE TUNJA.....	15
1.1 Introducción.....	15
1.2 Aspectos conceptuales preliminares .....	17
1.2.1 Los SIG y la gestión del territorio.....	17
1.2.2 Parámetros de análisis.....	20
1.2.2.1 Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	20
1.2.2.2 Idoneidad .....	21
1.2.2.3 Restricciones.....	21
1.3 Metodología .....	21
1.3.1 Fase I.....	22
1.3.2 Fase II.....	22
1.3.2.1 Modelo de restricciones.....	23
1.3.2.2 Criterios de idoneidad para urbanizar .....	23
1.3.2.3 Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	29
1.3.2.4 Superposición de mapa restricciones y mapa de idoneidad.....	33
1.4 Resultados.....	34
1.4.1 Mapa de restricciones .....	34
1.4.2 Mapa de idoneidad .....	35
1.4.3 Mapa de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja.....	36
1.4.4 Modelo de zonas potencialmente urbanizables en ARCGIS .....	37
1.5 Conclusiones .....	39
1.6 Recomendaciones .....	40
2. GESTIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES BASADO EN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA RED VIAL DE BOYACÁ, COLOMBIA .....	41
2.1 Introducción.....	41
2.1.1 Gestión de pavimentos .....	43
2.1.2 Prácticas existentes .....	45
2.1.3 Evaluación técnica de los pavimentos .....	45
2.1.3.1 Daños en el pavimento .....	46
2.1.3.2 Regularidad en el pavimento.....	47
2.1.3.3 Fricción o rozamiento transversal .....	47
2.1.3.4 Deflexión del pavimento (estructural).....	48
2.1.3.5 Evaluación geotécnica (Estructural).....	49
2.1.4 Aplicación espacial de la evaluación de pavimentos.....	49

2.2	Desarrollo .....	50
2.2.1	Metodología SIG para SGP propuesta .....	50
2.2.1.1	Priorización Vial .....	51
2.2.1.2	Propuesta Gestión De Pavimentos Basada En SIG .....	53
2.2.1.3	Estructura de la Geodatabase .....	56
2.2.2	Implementación de la metodología propuesta .....	58
2.2.2.1	Priorización de las vías departamentales de la provincia de Valderrama.....	60
2.2.2.2	Evaluación técnica del pavimento.....	62
2.2.2.2.1	Sectorización de tramos .....	63
2.2.2.2.2	Puntos críticos o valores extremos.....	65
2.2.2.2.3	Sectorización de tramos por parámetro para la Ruta 64 .....	68
2.2.2.2.4	Umbrales de evaluación para cada parámetro .....	70
2.2.2.2.5	Análisis espacial de los datos .....	74
2.2.2.2.6	Intervenciones propuestas .....	79
2.3	Discusión .....	86
2.4	Conclusiones y recomendaciones .....	88
3.	APLICACIONES SIG EN ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA PARA CIUDADES INTERMEDIAS. CASO TUNJA, BOYACÁ .....	91
3.1	Introducción.....	91
3.2	Antecedentes .....	92
3.3	Estado del arte .....	94
3.3.1	Experiencias internacionales.....	97
3.3.2	Experiencias regionales.....	100
3.4	Metodología .....	101
3.5	Definición del área de estudio .....	104
3.6	Procesamiento de datos.....	105
3.6.1	Modelo Digital de elevación (MDE) .....	105
3.6.2	Mapa de pendientes.....	105
3.6.3	Interpolación espacial de parámetros geotécnicos.....	106
3.7	Modelo geoespacial para la microzonificación .....	111
3.8	Discusión .....	117
3.9	Conclusiones .....	119
3.10	Recomendaciones .....	121
4.	IDENTIFICACIÓN DE TRAMOS DE TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE LÍQUIDOS PELIGROSOS CON POSIBLE AFECTACIÓN A ÁREAS SENSIBLES.....	123
4.1	Introducción.....	123
4.1.1	Sistemas de Gestión de Integridad de Tuberías - SGIT .....	123
4.1.2	Consecuencias espaciales como componente de estimación del riesgo.....	124

4.1.3	Análisis espacial.....	127
4.1.4	Análisis espacial y áreas de alta consecuencia.....	128
4.2	Metodología para la identificación de tramos.....	130
4.2.1	Áreas de alta consecuencia y fuentes de información.....	131
4.2.2	Identificación de tramos con afectación directa a AAC.....	133
4.2.3	Identificación de tramos con afectación después de transporte a AAC.....	134
4.2.4	Representación del área afectada por un derrame.....	135
4.3	Aplicación de la metodología.....	137
4.4	Conclusiones y comentarios.....	142
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	145



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Metodología para la determinación de las zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja (Colombia).....	22
Figura 1-2 Jerarquización de criterios para el proceso analítico jerárquico (AHP) .....	29
Figura 1-3 Matriz de comparación de criterios-hoja de cálculo matriz resumen para el AHP del BPMS .....	32
Figura 1-4 Mapa de restricciones.....	35
Figura 1-5 Mapa de idoneidad .....	36
Figura 1-6 Mapa zonas potencialmente urbanizables Tunja .....	37
Figura 1-7 Modelo para determinar zonas potencialmente urbanizables Tunja..	38
Figura 2-1 Proceso del diseño de la rehabilitación del pavimento .....	44
Figura 2-2 Modelo cuarto de carro. Muestra la estructura del equipo .....	47
Figura 2-3 Deformaciones producidas por las cargas del tránsito. ....	49
Figura 2-4 Metodología propuesta para la priorización de vías .....	52
Figura 2-5 Intervenciones a realizar según PCI (Los Ángeles-California).....	54
Figura 2-6 Esquema propuesto para la gestión de pavimentos basada en sistemas de información geográfica pavimento flexible.....	56
Figura 2-7 Base de datos estructurada en ArcGIS.....	57
Figura 2-8 Eje estratégico y vías a cargo de la provincia de Valderrama. ....	59
Figura 2-9 Mapa priorización de vías departamentales en la provincia de Valderrama. ....	62
Figura 2-10 Unidades homogéneas índice superficial Ruta 64 .....	63
Figura 2-11 PR31+000– Daño puntual debido a inestabilidad (Muro de contención).....	66
Figura 2-12 PR32+900 – Altas deformaciones en el pavimento.....	67
Figura 2-13 Abscisa PR40+100 – Estado del tramo bueno, no presenta daños relevantes .....	67
Figura 2-14 Escala de un pavimento según el IRI .....	72
Figura 2-15 Mapa sectorización de tramos - Deflexión.....	75
Figura 2-16 Mapa sectorización de tramos - CBR.....	76

Figura 2-17 Mapa sectorización de tramos - Índice Superficial.....	77
Figura 2-18 Mapa sectorización de tramos total .....	78
Figura 2-19. Modelación 1 estructura de pavimento 1. ....	83
Figura 2-20. Rehabilitación propuesta PR25+000 hasta PR31+000 .....	84
Figura 3-1 Actividades modelo inicial de microzonificación sísmica - Tunja...103	
Figura 3-2 Panorámica sinclinal de Tunja. ....	104
Figura 3-3 Modelo Digital de Elevación y pendientes de Tunja – Zona Urbana. ....	106
Figura 3-4 Resultado clasificación supervisada, sector sur este – Tunja 1960..108	
Figura 3-5 Cárcavas y rellenos en Tunja. ....	109
Figura 3-6 Geología y Tipo perfil de suelo en Tunja. ....	110
Figura 3-7 Diagrama de flujo mapa Características Geotécnicas.....	113
Figura 3-8 Diagrama de flujo mapa Respuesta comportamiento Local.....	113
Figura 3-9 Mapa resultado superposición de intervalos de profundidad. ....	115
Figura 3-10 Mapa final de susceptibilidad del suelo por evento sísmico. ....	116
Figura 4-1 Metodología para identificar la afectación de derrames.....	131
Figura 4-2 Metodología para identificar la afectación inmediata de derrames..133	
Figura 4-3 Proceso de análisis espacial para representar líneas de flujo superficial. ....	135
Figura 4-4 Distribución del derrame en una vecindad de 3x3 pixeles.....	137
Figura 4-5 Ejemplo afectación directa a una zona poblada.....	138
Figura 4-6 Tabla con tramos de afectación a bosque seco.....	139
Figura 4-7 Ejemplo afectación indirecta a una zona poblada.....	140
Figura 4-8 Ejemplo de simulación del área afectada por un derrame.....	141

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Reclasificación de valores subcriterio pendiente.....	24
Tabla 1-2 Reclasificación de valores subcriterio geología.....	25
Tabla 1-3 Reclasificación de valores subcriterio cobertura .....	25
Tabla 1-4 Reclasificación de valores subcriterio cercanía a parques, centros de salud y colegios .....	28
Tabla 1-5 Reclasificación de valores subcriterio cercanía a vías urbanas y rurales .....	28
Tabla 1-6 Reclasificación de valores subcriterio cercanía a zonas ya urbanizadas.....	29
Tabla 1-7 Escala de comparación de Thomas Saaty .....	30
Tabla 1-8 Índice aleatorio RI.....	31
Tabla 1-9 Pesos encontrados para criterios y subcriterios según el AHP.....	33
Tabla 2-1 Daños comunes en el pavimento flexible .....	46
Tabla 2-2 SIG mediante la aplicación de los diferentes parámetros .....	50
Tabla 2-3 Criterios e indicadores de priorización de vías departamentales .....	60
Tabla 2-4 Continuación Criterios e indicadores de priorización de vías departamentales.....	61
Tabla 2-5 Tramos seleccionados índice superficial Ruta 64.....	64
Tabla 2-6 Nivel de confianza y coeficiente de confiabilidad .....	64
Tabla 2-7 Tramos seleccionados índice superficial Ruta 64.....	65
Tabla 2-8 Puntos extremos para el tramo evaluado Is Ruta 64 .....	66
Tabla 2-9 Tramos seleccionados CBR.....	68
Tabla 2-10 Puntos extremos para el tramo evaluado Deflexión Ruta 64.....	68
Tabla 2-11 Tramos seleccionados Deflexión.....	69
Tabla 2-12 Puntos extremos para el tramo evaluado Deflexión Ruta 64.....	70
Tabla 2-13 Umbral índice de deterioro superficial VIZIR.....	70
Tabla 2-14 Niveles de IRI para evaluar la lisura de pavimentos asfálticos de carreteras en servicio.....	71
Tabla 2-15 Umbral de deslizamiento para pavimento nuevo flexible.....	73
Tabla 2-16 Lugares y niveles encontrados para Reino Unido .....	74

Tabla 2-17 Tramos finales de intervención, de acuerdo a análisis espacial. ....	78
Tabla 2-18. Costo probable según la intervención del pavimento.....	79
Tabla 2-19 Matriz de decisión para el mantenimiento de pavimento flexible ....	80
Tabla 2-20 Tramos para rehabilitación. ....	81
Tabla 2-21 Tramos CBR muestra inalterada. ....	82
Tabla 2-22. Resultados modelación 1. ....	83
Tabla 2-23. Modelación 2 estructura de pavimento 1. ....	83
Tabla 2-24. Resultados modelación 2. ....	84
Tabla 2-25. Resultados Rehabilitación. ....	85
Tabla 2-26. Modelación 2 estructura de pavimento 1. ....	85
Tabla 2-27. Resultados modelación 2. ....	85
Tabla 2-28. Rehabilitación propuesta PR37+800 hasta PR40+300 .....	86
Tabla 2-29. Resultados modelación 1. ....	86
Tabla 3-1 Suelo de fundación.....	107

# 1. APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y EVALUACIÓN MULTICRITERIO EN LA DETERMINACIÓN DE ZONAS POTENCIALMENTE URBANIZABLES EN LA CIUDAD DE TUNJA

Diego Fernando Gualdrón Alfonso  
Pedro Santiago Reyes Medina  
José Julián Villate Corredor

## 1.1 Introducción

El crecimiento urbano y su expansión en superficie es uno de los temas más importantes en la agenda urbana a nivel mundial. “La ciudad es considerada como un ecosistema complejo socio – económico – natural, el cual es dominado por las actividades humanas” (Wenrui, Feng, Rusong, & Dan, 2011).

El desarrollo residencial o urbano usualmente invade tierras agrícolas, rondas de ríos, zonas rurales que por sus condiciones no son aptas para realizar asentamientos urbanos, causando conflictos del uso de la tierra. Los efectos secundarios derivados del crecimiento urbano tales como: la expansión descontrolada, pérdida del paisaje, afectación de zonas protegidas, pérdida de espacio abierto, entre otros, son una amenaza para el equilibrio ambiental, social y económico de una región.

Desde el punto de vista ambiental, las ciudades se ven limitadas por las condiciones que el territorio brinda, las cuales pueden favorecer o no el asentamiento de la población y el desarrollo de sus actividades. A pesar de ello, el progreso tecnológico y la falta de una política de asentamiento coherente, han favorecido el avance sobre espacios poco aptos (Da Silva & Cardozo, 2011).

La ciudad de Tunja se ubicada en el departamento de Boyacá, a 130 kilómetros al noroeste de Bogotá, sobre la cordillera oriental de los Andes. Tiene una altitud de 2782 m.s.n.m., con una temperatura media de 13 °C y una extensión total de 121.4920 Km<sup>2</sup> de los cuales 19.7661 Km<sup>2</sup> son urbanos y 101.7258 Km<sup>2</sup> pertenecen al área rural. Según el DANE para el 2017, la capital boyacense

cuenta con una población estimada de 195.496 habitantes, de los cuales 187.689 pertenecen a la zona urbana y 7.807 pertenecen al territorio rural.

El crecimiento urbano de la ciudad ha sido considerable en los últimos años, lo que ha acarreado problemáticas en la planeación de las zonas dispuestas para el crecimiento de la misma, tales como, la sobre posición de las zonas de protección y las zonas de expansión urbana definidas en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), efecto que conlleva a la afectación de las zonas de protección, pérdida del espacio abierto y representa una amenaza para el equilibrio ambiental y el desarrollo sostenible de la ciudad (Moreno Mojica, R. A., Rodríguez Forero, R. H., & López Díez, J. C., 2018).

Las zonas destinadas para el uso residencial, deben poseer ciertas características de habitabilidad, y estar siempre relacionadas con la salud y seguridad de la población, además de la necesidad de satisfacer ciertas demandas en cuestión de equipamiento; estas garantizarán a las personas, el disfrutar de una buena calidad de vida que posibilite a los habitantes acceso a cultura, educación, esparcimiento, salud y trabajo.

La determinación de la aptitud del territorio se basa en limitantes relativas ligadas a percepciones subjetivas, que pueden ser probables más no exactas. Idealmente un área o una zona específica con potencial para urbanizar y residir, debería ser el resultado del análisis de un conjunto de variables cuantitativas, que disminuyan la incertidumbre en la toma de decisiones.

Es por esto, que se requiere del uso de herramientas y metodologías que permitan realizar un análisis detallado de cada una de las variables que intervienen en la determinación de las zonas de expansión urbana. Es allí donde los sistemas de información geográfica (SIG), y la evaluación multicriterio (EMC), son una solución ideal para realizar este tipo de análisis dada su practicidad y facilidad en el desarrollo de procesos, análisis individuales y la interacción de relaciones espaciales entre múltiples conjuntos de datos de cada una de las variables que se tengan en cuenta para este tipo de estudios.

La combinación de los SIG con la EMC, para determinar las zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja, puede brindar una solución al fenómeno de expansión urbana en sitios poco aptos, y que, históricamente han traído consecuencias ambientales negativas; tales como la inundación en construcciones asentadas en rondas de ríos, asentamientos en cárcavas, saturación de la malla vial y conflictos entre zonas de expansión urbana y zonas de protección.

El propósito, en suma, es obtener el mapa de las zonas potencialmente urbanizables de la ciudad de Tunja, aplicando SIG y EMC, como herramienta para la planificación e identificación de zonas idóneas de expansión urbana, localización de equipamientos y nueva infraestructura en la ciudad.

De esta forma, se identificó que la mayoría de las áreas que tienen las características de restricción e idoneidad propicias para urbanizar, se encuentran en el sector sur occidental de la ciudad de Tunja, de acuerdo a las variables de amenaza por inundación y erosión, amenaza antrópica, polígono minero, vías urbanas y rurales, espacio público y equipamientos, zonas de protección, zonas industriales, cobertura del suelo, geología, pendientes y zonas ya urbanizadas.

## **1.2 Aspectos conceptuales preliminares**

### **1.2.1 Los SIG y la gestión del territorio**

Durante los últimos 20 años, se ha venido estudiando a nivel mundial la aplicación de los SIG en conjunto con las EMC, como una solución a la problemática de la gestión del territorio. Entre los principales planteamientos a nivel mundial podemos encontrar los siguientes:

Santos Preciado (1997), presenta un planteamiento teórico de las EMC y su aplicabilidad en conjunto con los SIG; en primera instancia, se expone un contexto teórico sobre la toma de decisiones con base en una EMC, se evidencian algunas de las técnicas algebraicas que permiten obtener un resultado final en función de varios criterios. Una vez dado el fundamento teórico, el autor da a conocer la aplicación de la metodología multicriterio en el planteamiento y resolución de problemas ambientales y territoriales para después combinar dicha metodología con los SIG, mediante un caso práctico para el establecimiento de una actividad humana respecto al territorio.

Bosque & García (2000), muestran en su estudio, el uso de los SIG en la planificación territorial, iniciando con una explicación teórica referente a las aplicaciones de los SIG en el ámbito de la gestión del territorio, las fases de la planificación territorial, el papel de los SIG en la planificación ambiental y ordenamiento territorial; la aplicación de los SIG en la localización óptima de elementos puntuales, elementos geográficos de tipo lineal y de polígonos. Finalmente, da a conocer un ejemplo aplicativo de ordenación del territorio usando SIG y técnicas de EMC, para determinar la asignación óptima del uso del suelo realizada en la cuenca del Río Tuy en Venezuela.

Morelo, Grindla, & Asenso (2007), proponen escenarios que cuantifican nuevas potencialidades para el desarrollo regional en la ciudad de Granada (España), los autores modelizan la accesibilidad, considerando el territorio como una matriz de elementos discretos o malla, a la cual se le asignan valores que representan la resistencia al desplazamiento en términos de tiempo (superficie de fricción), esta es afectada por un algoritmo que denominan costo – distancia, el cual permite calcular el menor costo acumulado en términos de tiempo hasta el objetivo más cercano, dando como resultado una superficie continua a la que a cada celda se le ha asignado el tiempo que tarda en alcanzar dicho objetivo. Finalmente, el análisis de la aptitud de la urbanización involucra múltiples variables territoriales que condicionan la ocupación del suelo; se efectúa la evaluación multicriterio, teniendo en cuenta un análisis de la dinámica poblacional, obteniendo como resultado valores de superficie urbana demandada para cada año horizonte y para cada ámbito municipal.

Wenrui, Feng, Rusong, & Dan (2011), en su estudio dan a conocer una plataforma de gestión del ecosistema urbano, para ayudar a los planificadores territoriales a obtener un mejor desarrollo urbano utilizando un modelo denominado *neural cellular automata* (CA), con el cual se realizan simulaciones de la expansión urbana en tres escenarios, y se evalúan a la vez diferentes escenarios de desarrollo urbano y el beneficio ecológico complejo. En cada simulación o plataforma, se utiliza como ejemplo a Beijing oriental, con seis variables sensibles en la expansión urbana elegidas para modelar de 2004 a 2024, sobre una base de datos de expansión urbana obtenida para esta ciudad de 1991 a 2004. Los beneficios ecológicos complejos en diferente uso del suelo urbano, se evalúan a través de una metodología de evaluación multicriterio denominada Proceso Analítico Jerárquico (AHP), por sus siglas en inglés. Los resultados de este estudio muestran que el escenario de gestión del uso de la tierra orientada a los servicios ecológicos es más beneficioso y su índice de beneficio ecológico complejo alcanza un 0,78 % más alto que los demás escenarios evaluados, lo que les permitió proporcionar a los desarrolladores y gerentes urbanos de Beijín (China), una sugerencia científica para el desarrollo urbano.

De Pietri, Dietrich, & Mayo (2011), elaboran un modelo espacial que integra factores ambientales que constituyen una amenaza para la salud, el cual se aplica en la cuenca del Río Matanza – Riachuelo (CMR) en Argentina. En el modelo se implementan procedimientos de EMC entorno a los SIG para obtener una zonificación del territorio basada en grados de aptitud para residir, donde se georreferencian variables que caracterizan las condiciones de habitabilidad

de las viviendas y las posibles fuentes de contaminación de la cuenca. Por otra parte, realizan encuestas de factores de riesgo para determinar el riesgo relativo de vivir en zonas no aptas en relación con las zonas aptas. Encuentran que la CMR presenta 60% de su superficie en condición de aptitud, situación que afecta a 40 % de la población residente. El resto de la población habita en un territorio no apto y el 6% se encuentra en la condición más desfavorable de la cuenca.

Da Silva & Cardozo, (2011) plantean utilizar técnicas de EMC y SIG, con el fin de identificar espacios potenciales para la ocupación residencial en la ciudad de Resistencia (Argentina), delimitando espacial y temporalmente la ciudad, a partir de la recolección de información referente a equipamientos, cuerpos de agua, modelo digital de elevación (DEM), coberturas terrestres, entre otras, con el fin de clasificar y definir los criterios a emplear en el estudio y posteriormente darle una ponderación y tratamiento a los factores que influyen en cada criterio. Como resultado, determinan que el oeste y noroeste de la ciudad tiene buena capacidad para realizar una ocupación potencial de tipo residencial.

A nivel nacional, también se han establecido algunos estudios referentes a los SIG y la EMC aplicándolos a la gestión territorial.

(Gutiérrez Ossa & Urrego Estrada, 2011), analizan la aplicabilidad y el contexto de los SIG en el ordenamiento y la planeación territorial en Colombia. La implementación de los sistemas obedece a la relevancia de codificar y monitorear, por medio de las herramientas tecnológicas, la información que se tiene de la estructura geográfica de cada región, marco que implica la revisión de las formas estipuladas hasta el momento, para evaluar y hacer gestión territorial. En primera instancia, realizan un planteamiento teórico sobre la geografía y la interacción de esta entre el ordenamiento, la planeación y el territorio, con el fin de determinar la aplicación e instrumentalización de los SIG en estos temas y enfocarse finalmente sobre el uso de los SIG en el ordenamiento y planeación territorial en Colombia. Uno de los hallazgos cruciales derivados del estudio, radica en poder establecer los criterios de convergencia entre los planes de ordenamiento y los de desarrollo territorial que son tan dispares en el país.

Corzo Ramírez, Jerena, & Rubio Mendoza (2012), presentan una propuesta de diálogo interdisciplinar a través del uso de herramientas SIG, para la construcción de una metodología de identificación del potencial de restauración ecológica (PRE) en áreas del borde urbano y que hacen parte de la estructura

ecológica principal de Bogotá según el ordenamiento territorial. Se describen los pasos metodológicos para la identificación del PRE, discutiendo los alcances y limitaciones del uso de herramientas SIG, como posibilidad metodológica para la interacción entre disciplinas como la biología, la geografía física y la sociología, durante el proceso de restauración ecológica.

Patiño, León, & Ávila (2016), presentan en su artículo “Análisis de idoneidad del suelo para construcción de colegios públicos integrando SIG Y PAJ en el área urbana de Bogotá. Redes de Ingeniería, 145” un procedimiento de evaluación de la idoneidad del suelo para su destinación a nuevos equipamientos educativos públicos en el área urbana de la ciudad de Bogotá, utilizando AHP y los SIG, en los que se tienen en cuenta las directrices de la Norma NTC 4595, el Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad y diferentes usos de suelo, cuyo cambio de actividad es poco probable, así como los destinados a hospitales y cementerios. El resultado del análisis establece las zonas idóneas para la ubicación de terrenos reservados para estos fines, además de identificar qué equipamientos educativos cumplen o no con los criterios evaluados.

## **1.2.2 Parámetros de análisis**

### **1.2.2.1 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)**

Es un método matemático creado por Thomas Saaty, para “evaluar alternativas cuando se tiene en consideración varios criterios” (Osorio Gómez & Orejuela Cabrera, 2008). Su aplicación “parte de la comparación de pares de criterios a través de una matriz cuadrada basándose en los juicios subjetivos de expertos que tiene como objetivo resolver una temática de manera particular” (Ordoñez & Cabrera, 2011-2012), por tal razón, es ideal para dar solución a distintas problemáticas territoriales.

El método AHP, se clasifica dentro del grupo de análisis multicriterio discreto y es capaz de emplear variables cualitativas y cuantitativas frente a múltiples objetivos. El AHP, es un método de descomposición de estructuras complejas en sus componentes, ordenando estos componentes o variables en una estructura jerárquica, donde se obtienen valores numéricos para los juicios de preferencia y, finalmente los sintetiza para determinar qué variable tiene la más alta prioridad. Esta fundado sobre una base teórica simple pero sólida, posee tres principios rectores, los que en términos generales, guían el proceso de evaluación:

- Construcción de las jerarquías. Los sistemas complejos pueden ser mejor comprendidos mediante su descomposición en elementos

constituyentes, la estructuración de dichos elementos jerárquicamente, y la composición o sinterización de los juicios, de acuerdo con la importancia relativa de los elementos de cada nivel de la jerarquía.

- Establecimiento de prioridades. Los seres humanos perciben relaciones entre los elementos que describen una situación, pueden realizar comparaciones a pares entre ellos con respecto un cierto criterio y de esta manera expresar la preferencia de uno sobre otro.
- Consistencia lógica. Existe en el cerebro un ordenamiento jerárquico para los elementos. Dada la ausencia de valores exactos para esta escala en la mente humana, esta no está preparada para emitir juicios 100% consistentes, por lo tanto, deben ser verificados.

La jerarquización representa la desintegración del problema en las partes que lo componen. En este sentido, un problema está constituido por: un foco, unos criterios generales (dimensiones), criterios específicos y las alternativas posibles como solución. El foco, es el objetivo amplio y global, es lo que se espera resolver. Los criterios generales son los elementos o dimensiones que definen el objetivo principal. Las alternativas, son las diferentes soluciones o cursos de acción.

#### 1.2.2.2 Idoneidad

Se refiere a las variables optimas que convergen para un buen establecimiento geográfico de las zonas urbanizables.

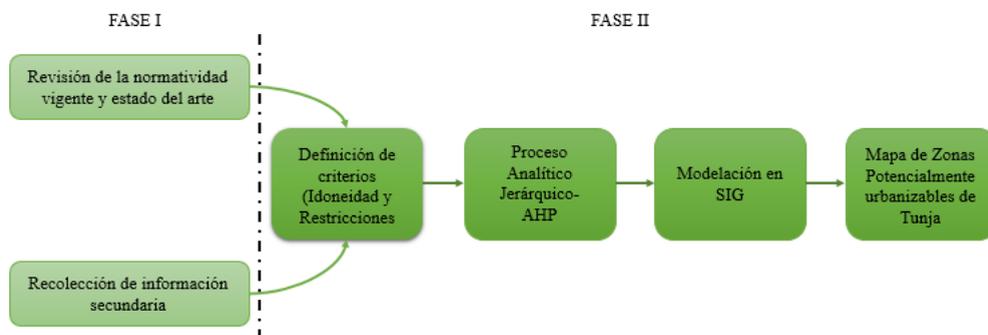
#### 1.2.2.3 Restricciones

Son aquellas limitantes geográficas que, por sus características, configuran un impedimento físico y riesgo ambiental, social y económico para las zonas urbanizables.

### 1.3 Metodología

Para el desarrollo del presente estudio se propusieron dos fases metodológicas así: en la primera fase se obtuvo la información bibliográfica y secundaria, la segunda fase hizo referencia a la definición de los criterios que influirán en la EMC y en el análisis de la información en el SIG, tal como se observa en la Figura 1-1.

**Figura 1-1** Metodología para la determinación de las zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja (Colombia)



Fuente: Autores

### 1.3.1 Fase I

La revisión del estado del arte incluyó la búsqueda de investigaciones sobre los SIG, EMC y el ordenamiento territorial a nivel global, con el propósito definir la metodología a utilizar en el estudio; de igual manera, se consultó la normatividad nacional acerca de los planes de ordenamiento territorial (POT); por último, se obtuvo la información geográfica oficial (capas), para la conformación del modelo suministrado en formato vector (*shapefile*) y raster (TIFF).

### 1.3.2 Fase II

Se establecieron las capas base, correspondientes a las restricciones e idoneidad, teniendo en cuenta la información geográfica oficial. Mediante el AHP, se calcularon los pesos de los parámetros de idoneidad para cada criterio y subcriterio definido, para superponer las restricciones obteniendo así, las zonas potencialmente urbanizables.

La información en formato *shapefile* se convirtió a ráster, mediante el software ArcGIS, para la reclasificación y el cálculo de los pesos en la AHP. Se utilizó la metodología de panel de expertos, en la cual se consultó a diferentes profesionales según las temáticas de interés para el análisis, quienes basados en su experiencia y criterio, determinaron los valores de la reclasificación y los pesos que dan a cada criterio y subcriterio en el estudio; se contó con la opinión de especialistas agrónomos, biólogos, geotécnicos, de infraestructura vial y ordenamiento territorial egresados de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Escuela

Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Universidad Católica de Colombia, Universidad de Los Andes y funcionarios de la Oficina Asesora de Planeación de la ciudad de Tunja.

### 1.3.2.1 Modelo de restricciones

Las restricciones o criterios limitantes se definieron con base en información del POT, suministrada por la Oficina Asesora de Planeación de la ciudad de Tunja. Esta información se fusionó por medio del álgebra de mapas, para obtener un único ráster con valores binarios, donde el valor de 0 representa las zonas restringidas y el valor de 1 corresponde a las zonas sin restricción. Las variables utilizadas para las restricciones son:

- Suelos de protección urbano y rural: incluye áreas de uso forestal, áreas del sistema nacional de áreas protegidas, suelos de infiltración para recarga de acuíferos, rondas de ríos, protección de fauna, zonas de restauración morfológica y rehabilitación del suelo, terrenos susceptibles a actividades mineras y áreas destinadas a la disposición de residuos líquidos y sólidos.
- Áreas con amenaza alta de inundación y erosión.
- Áreas con amenaza antrópica.
- Áreas destinadas a plantas de beneficio y faenado.
- Polígono minero existente.
- Zonas ya urbanizadas.
- Vías urbanas y rurales
- Espacio público y equipamientos.
- Zonas industriales.

### 1.3.2.2 Criterios de idoneidad para urbanizar

Basados en la información disponible, los lineamientos establecidos en el POT de la ciudad de Tunja y la normatividad vigente, se determinaron los criterios para realizar el análisis de idoneidad con sus respectivos subcriterios, los cuales fueron valorados en una escala de 1 a 5, siendo 5 el valor correspondiente a una mayor idoneidad para urbanizar y 1 el valor de menor idoneidad. Los criterios utilizados fueron los siguientes:

**Físicos:** Contemplan aquellos factores propios de las condiciones de la zona de estudio como las pendientes, geología y cobertura del suelo.

- **Pendiente:** Fue clasificada con base en el Manual de Diseño Geométrico de Vías del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), según el criterio de los panelistas: un ingeniero civil especialista en infraestructura vial y magíster

en Ciencias y Sistemas de Información Geográfica y un ingeniero de vías y transporte magíster en ingeniería (infraestructura vial). Se establecieron cuatro tipos de terreno que dependen de la topografía que predomine en la zona de estudio, a continuación, se describen los diferentes tipos de terreno encontrados en el manual:

- Terreno plano: cuyas pendientes longitudinales son normalmente menores de tres por ciento (3%).
- Terreno ondulado: sus pendientes longitudinales se encuentran entre tres y seis por ciento (3% - 6%).
- Terreno montañoso: las pendientes longitudinales que predominan en este tipo de terreno se encuentran entre seis y ocho por ciento (6% - 8%).
- Terreno escarpado: generalmente sus pendientes longitudinales son superiores a ocho por ciento (8%).

En la ciudad de Tunja se encuentran pendientes desde el 0% hasta el 66%, debido a esto, se creó un nuevo rango para otorgar la valoración de idoneidad tipo 1. Para el análisis se determinaron los terrenos planos y ondulados como los más idóneos para desarrollar nuevos proyectos urbanos y con base en esto, se asignó la valoración correspondiente para los otros tipos de terreno. Tabla 1-1

**Tabla 1-1 Reclasificación de valores subcriterio pendiente**

Pendiente (%)	Valoración
0 – 3 Terreno Plano	5
3 – 6 Terreno Ondulado	4
6 – 8 Terreno Montañoso	3
8 – 14 Terreno Escarpado	2
> 66	1

*Fuente: Autores.*

- **Geología:** Se clasificó según el criterio de los panelistas: un ingeniero civil magíster en Geotecnia de la Universidad de los Andes, un ingeniero civil, magíster en Ingeniería con énfasis en Geotecnia de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, quienes, basados en las formaciones geológicas encontradas en la ciudad y la composición de cada una de ellas, dan su concepto para determinar la valoración de idoneidad correspondiente a cada formación. Tabla 1-2

**Tabla 1-2 Reclasificación de valores subcriterio geología**

<b>Geología</b>	<b>Valoración</b>
Formación Bogotá: compuesta por arcillolitas abigarradas, areniscas arcillosas blancas o amarillas.	3
Formación Guaduas: se compone por arcillolitas carbonáceas, areniscas y arcillas abigarradas y presencias de mantos de carbón en la parte inferior.	4
Dépósitos Aluviales: conformados por gravas, gránulos de arenisca blanca y matriz arcillosa, cherts, arcilla amarilla, arena arcillosa, limos, arcilla y arenas en la parte superior.	1
Grupo Guadalupe: compuesto por porcelanitas, cherts y fosforita esporádica, en su parte intermedia cuenta con presencia de arcillas y areniscas.	4
Formación Tilatá: compuesta por gredas, capas arenosas y cascajos, presencia de material arcilloarenoso.	2
Formación Conejo: esta formación tiene presencia de shales carbonosos y silíceos de color gris oscuro, intercalaciones de areniscas silíceas de grano fino, niveles de lutitas y areniscas cuarzosas.	5

*Fuente: Autores.*

- **Cobertura del suelo:** Su clasificación se determinó mediante el concepto de los panelistas: un ingeniero agrónomo, magíster en Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia y un biólogo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, quienes indican las características y el uso habitual que tiene cada cobertura de suelo existente en la ciudad de Tunja y con base en estos conceptos, se determina la valoración de idoneidad para cada una de ellas. Ver Tabla 1-3

**Tabla 1-3 Reclasificación de valores subcriterio cobertura**

<b>Cobertura</b>	<b>Valoración</b>
Tierras desnudas y degradadas: Esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema. Se incluyen las áreas donde se presentan tierras salinizadas, en proceso de desertificación, o con intensos procesos de erosión que pueden llegar hasta la formación de cárcavas.	3

Cobertura	Valoración
Herbazal: cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente herbáceos desarrollados en forma natural en diferentes sustratos, los cuales forman una cobertura densa (>70% de ocupación), el cual se desarrolla en áreas que no están sujetas a períodos de inundaciones, donde no existe presencia de elementos arbóreos y/o arbustivos, o en caso de existir en ningún caso representarán más del 2 %.	5
Tejido urbano continuo: son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada. Las edificaciones, vías y superficies cubiertas artificialmente cubren más del 80% de la superficie del terreno. La vegetación y el suelo desnudo representan una baja proporción del área del tejido urbano.	5
Tejido urbano discontinuo: son espacios conformados por edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura construida cubren artificialmente la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación. Esta unidad puede presentar dificultad para su delimitación cuando otras coberturas se mezclan con áreas clasificadas como zonas urbanas.	5
Pastos limpios: esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastizales con un porcentaje de cubrimiento mayor al 70%, son evidentes prácticas de manejo como limpieza, enclamiento o fertilización, etc., estas prácticas impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas.	1
Zonas verdes urbanas	4
Mosaico de pastos con espacios naturales: esta cobertura está constituida por las superficies ocupadas principalmente por coberturas de pastos en combinación con espacios naturales. Las coberturas de pastos representan entre el 30% y el 70% de la superficie total del mosaico. Los espacios naturales están conformados por las áreas ocupadas por relictos de bosque natural, arbustos, herbazales, bosque de galería o ripario, pantanos y otras áreas no intervenidas o poco transformadas y que debido a limitaciones de uso por sus características biofísicas permanecen en estado natural o casi natural.	1
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales: comprende superficies ocupadas por cultivos y pastos en combinación con coberturas naturales. Las áreas de cultivos y pastos ocupan entre el 30 % y el 70 % de la superficie total de la unidad. Los espacios naturales están conformados por las áreas ocupadas por relictos de bosque natural, arbustales, bosque de galería o riparios, vegetación secundaria o en transición, pantanos u otras áreas no intervenidas o poco transformadas, que, debido a limitaciones de uso, o por sus características biofísicas permanecen en estado natural o casi natural.	1

Cobertura	Valoración
Cultivo de tubérculos	1
Bosque fragmentado: comprende los territorios cubiertos por bosques naturales con evidencia de intervención humana, aunque que mantienen su estructura original. Se pueden dar la ocurrencia de áreas completamente transformadas en el interior de la cobertura, originando parches donde hubo presencia de coberturas antrópicas como pastos y cultivos pero que han sido abandonadas para dar paso a un proceso de regeneración natural del bosque en los primeros estados de sucesión vegetal. Los parches de intervención deben representar entre el 5% y el 50% del total de la unidad.	1
Arbustal: cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbustivos, los cuales forman un dosel irregular, pero que puede presentar elementos arbóreos dispersos cuya cubierta representa más del 70% del área total de la unidad. Esta formación vegetal no ha sido intervenida o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y sus características funcionales (IGAC, 1999).	1
Bosque denso: corresponde a vegetación de tipo arbóreo caracterizada por un estrato más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más del 70% del área total de la unidad, con altura del dosel superior a 15 metros y que se encuentra localizada en zonas que no presentan procesos de inundación periódicos.	1
Zonas de extracción minera	1
Mosaico de pastos y cultivos: es una unidad que comprende una asociación de pastos y cultivos, en los cuales el tamaño de las parcelas es muy pequeño y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlos cartográficamente de manera individual.	2
Aeropuertos	1
Plantación forestal	1
Mosaico de cultivos: es una unidad que comprende cultivos anuales, transitorios o permanentes, en los cuales los tamaños de parcelas son muy pequeños y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlos cartográficamente de manera individual.	2
Suelos de uso agropecuario mecanizado o intensivo	1
Suelos de uso agropecuario semi - mecanizado o semi-intensivo	1

*Fuente: Autores.*

**Accesibilidad:** la accesibilidad expone la posibilidad de acceder e interrelacionar a las personas con el territorio, a la vez con servicios primordiales para el desarrollo de las actividades y necesidades básicas de

la población. Los criterios de accesibilidad que se tuvieron en cuenta para el análisis son los siguientes:

- **Cercanía a parques, centros de salud y colegios:** la valoración de idoneidad será mayor en cuanto las zonas potencialmente urbanizables estén más cerca de estos equipamientos, debido a que son establecimientos que brindan servicios de primera necesidad para la población. La clasificación para este criterio se determinó con base en la NTC 4595, ingeniería civil y arquitectura, planeamiento y diseño de instalaciones y ambientes escolares, en donde se estipula que los nuevos asentamientos urbanos deben estar en una distancia no mayor a 500 m en caso de situaciones críticas. En Tabla 1-4, se presenta la valoración otorgada a este subcriterio.

**Tabla 1-4 Reclasificación de valores subcriterio cercanía a parques, centros de salud y colegios**

Cercanía a parques, centros de salud y colegios(m)	Valoración
0 – 150	5
150 – 250	4
250 – 500	3
500 – 4000	2
> 4000	1

*Fuente: Autores.*

- **Cercanía a vías (urbanas y rurales):** Entre más cerca se este de la malla vial, será más favorable la valoración que se le dé a una zona, debido a que los desplazamientos de la población hacia diferentes partes de la ciudad serán más sencillos. Los valores otorgados con base en la distancia respecto a las vías se pueden observar en la Tabla 1-5.

**Tabla 1-5 Reclasificación de valores subcriterio cercanía a vías urbanas y rurales**

Cercanía a vías urbanas y rurales (m)	Valoración
0 – 150	5
150 – 370	4
370 – 590	3
590 – 810	2
> 810	1

*Fuente: Autores.*

- **Cercanía a zonas ya urbanizadas:** la clasificación de este subcriterio se basó en la importancia de la cercanía a espacios o zonas ya ocupadas por el hombre,

ya que esto garantiza una mayor interacción entre los pobladores que habitan estos lugares, mejor acceso a diferentes servicios como salud, recreación y cultura. Las zonas más próximas a áreas ya urbanizadas serán más favorables para nuevos asentamientos, los rangos de distancia a zonas ya urbanizadas y sus valoraciones se pueden ver en la Tabla 1-6.

**Tabla 1-6 Reclasificación de valores subcriterio cercanía a zonas ya urbanizadas**

Cercanía zonas ya urbanizadas (m)	Valoración
0 – 500	5
500 – 1500	4
1500 – 3000	3
3000 – 6000	2
> 6000	1

Fuente: Autores.

### 1.3.2.3 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Para la aplicación del método se realizó una jerarquización en la que se definieron los criterios físicos y de accesibilidad, así como los subcriterios utilizados para el estudio y presentados en el numeral 1.3.2.2. Este AHP se presenta en la Figura 1-2.

**Figura 1-2** Jerarquización de criterios para el proceso analítico jerárquico (AHP)



Fuente: Autores.

Posteriormente, se realizó una comparación por pares según los valores establecidos por Saaty, para cuantificar la importancia de un criterio con respecto a otro tal como se presenta en la Tabla 1-7. A partir de las matrices, se asignaron los pesos correspondientes a cada criterio y subcriterio, y se calculó el radio de consistencia RC, el cual debe ser menor al 10% para evitar posibles incoherencias y contradicciones a la hora de evaluar la importancia de los criterios en cada matriz.

**Tabla 1-7 Escala de comparación de Thomas Saaty**

Valor Importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen de igual manera a los objetivos
3	Importancia moderada	El criterio A es ligeramente favorecido sobre el criterio B
5	Importancia fuerte	El criterio A es fuertemente favorecido sobre el criterio B
7	Importancia muy fuerte	El criterio A es severamente favorecido sobre el criterio B
9	Importancia extrema	El criterio A es en extremo más importante que el criterio B
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando sea necesario un término medio

*Fuente: Saaty, 2008*

Para el cálculo del radio de consistencia RC se tuvieron en cuenta las siguientes ecuaciones (Saaty, 2008).

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

$$CI = \frac{\tau_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Donde  $\tau_{max}$  corresponde al máximo valor propio de la matriz de comparaciones y se calcula multiplicando la sumatoria de las columnas  $\Sigma Col$  de la matriz de comparación de criterios por el vector de prioridades W que representa el peso que tiene cada criterio o subcriterio en el objetivo general. El valor de n corresponde al tamaño de la matriz.

En cuanto al valor de RI índice aleatorio, Saaty proporciona los siguientes valores según el tamaño de la matriz.

**Tabla 1-8 Índice aleatorio RI**

Tamaño de la matriz (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio (RI)	0	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484

*Fuente: Saaty, 2008*

En cuanto al cálculo de los pesos de los criterios y subcriterios se utilizó un libro de Excel programado para el cálculo de la AHP del BPMSG (Business Performance Management), en donde se relaciona, en una de sus hojas de cálculo, una matriz resumen, de la cual se obtuvieron las ponderaciones que cada uno de los profesionales consultados determinaron para cada criterio y subcriterio evaluado. En la Figura 1-3, se presenta el cálculo de la ponderación realizada entre los criterios de accesibilidad y físicos en donde se obtuvo un valor RC de 0,1%, para la totalidad de los análisis realizados se obtuvieron valores de RC por debajo del 10% evitando así posibles inconsistencias en la evaluación de la importancia de los criterios.

**Figura 1-3** Matriz de comparación de criterios-hoja de cálculo matriz resumen para el AHP del BPMS

**AHP Analytic Hierarchy Process (EVM multiple inputs)**

K. D. Goepel *Version 11.10.2017* | Free web based AHP software on: <http://bpmmsg.com>

**Only input data in the light green fields and worksheets!**

n=  Number of criteria (2 to 10)      Scale:      

N=  Number of Participants (1 to 20)      a :       Consensus:

p=  selected Participant (0=consol.)      2      7     

**Objective**

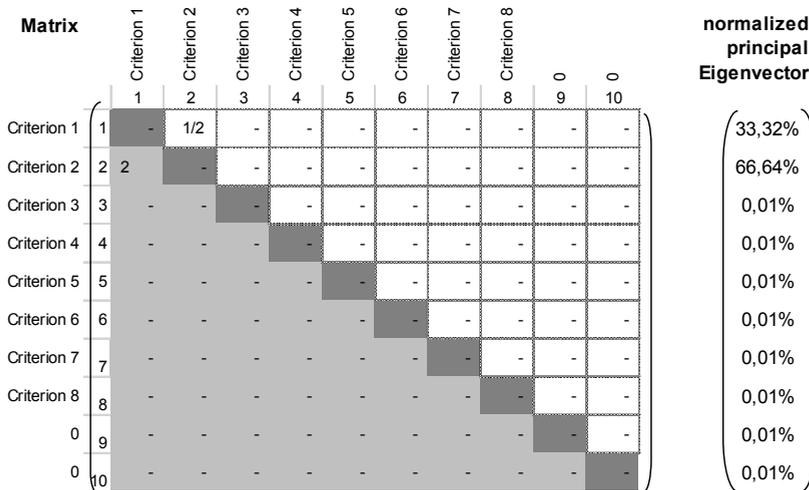
**Author**

**Date**       Thresh:       Iterations:       EVM check:

Table	Criterion	Comment	Weights	Rk
1	Criterion 1	FISICOS	33,3%	2
2	Criterion 2	ACCESIBILIDAD	66,6%	1
3	Criterion 3		0,0%	
4	Criterion 4		0,0%	
5	Criterion 5		0,0%	
6	Criterion 6		0,0%	
7	Criterion 7		0,0%	
8	Criterion 8		0,0%	
9		for 9&10 unprotect the input sheets and expand the question section ("+" in row 66)	0,0%	
10			0,0%	

**Result**      **Eigenvalue**      lambda:

**Consistency Ratio**      0,37      GCi:       CR:



Fuente: Autores.

Una vez realizada la ponderación de cada criterio y subcriterio por parte de cada panelista, se obtuvieron como resultado los pesos finales para cada uno de ellos, en la Tabla 1-9 se relacionan los valores obtenidos para el estudio.

**Tabla 1-9 Pesos encontrados para criterios y subcriterios según el AHP**

<b>Criterios</b>	<b>Pesos</b>	<b>Subcriterios</b>	<b>Pesos locales</b>	<b>Pesos globales</b>
Físicos	33%	Pendiente	21%	6,93%
		geología	24%	7,92%
		Cobertura	55%	18,15%
Accesibilidad	67%	Cercanía a parques, centros de salud, colegios.	16%	10,52%
		Cercanía a vías (urbanas y rurales)	59%	39,80%
		Cercanía a zonas ya urbanizadas	25%	16,68%
$\Sigma$	100%		$\Sigma$	100%

*Fuente: Autores.*

Con el cálculo de los pesos globales de cada subcriterio (Tabla 1-9), se procedió a crear el modelo en ArcGIS, obteniendo un ráster que representa la idoneidad para urbanizar en la ciudad de Tunja. Los ráster de los criterios de accesibilidad se obtuvieron utilizando la herramienta de distancia euclideana, la cual calcula la distancia desde el centro de una celda de origen hasta el centro de las celdas aledañas.

Una vez reclasificado cada subcriterio en una escala de 1 a 5 teniendo en cuenta lo establecido en el numeral 1.3.2.2, se utilizó la herramienta de ArcGIS weighted overlay, para realizar la ponderación de las variables con base en los pesos globales encontrados con el método AHP.

#### 1.3.2.4 Superposición de mapa restricciones y mapa de idoneidad

A partir del algebra de mapas, se realizó la superposición del ráster de restricciones con el ráster de idoneidad, por medio de una multiplicación, se obtuvo el mapa de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja. De esta manera, se enlazaron los criterios de idoneidad y las restricciones, encontrando una solución a la demanda de áreas que permitan implementar procesos de urbanización en la ciudad, que no solo cumplan con las necesidades de la población, sino que respete los espacios naturales y suelos de protección establecidos dentro del POT y garantice una disminución del

impacto ambiental que se genere a futuro con dichos procesos de expansión urbana de la ciudad.

## **1.4 Resultados**

Una vez realizadas las dos fases de la metodología, se tienen como resultado tres mapas:

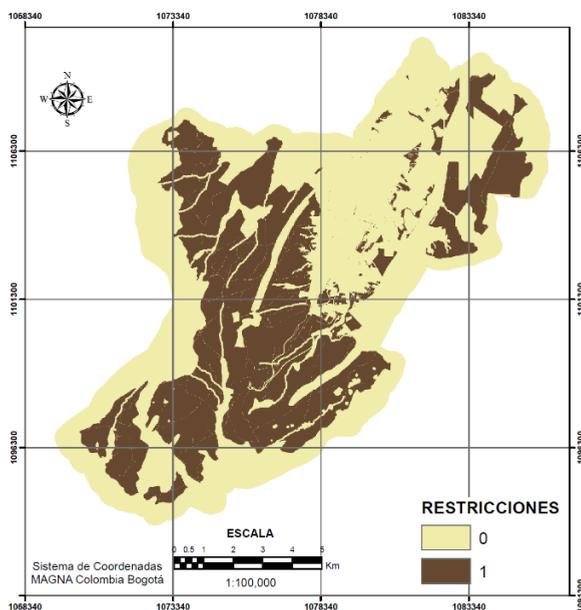
- Mapa de restricciones: en él se evidencian aquellas zonas que presentan restricción para realizar cualquier tipo de urbanismo.
- Mapa de idoneidad: espacio en el que se ven las zonas clasificadas según el rango estipulado de idoneidad.
- Mapa final: muestra las zonas potencialmente urbanizables de la ciudad de Tunja.

Finalmente, se generó un modelo en el software ArcGIS, el cual permite la realización de todo el análisis espacial, geométrico y de mapas, necesario para la determinación de las zonas potencialmente urbanizables.

### **1.4.1 Mapa de restricciones**

Según el mapa de restricciones, 625 ha, presentan limitantes de algún tipo representadas en la Figura 1-4 con color claro, razón por la que no se puede realizar ningún tipo de urbanización en ellas, la mayoría de estas zonas restringidas se encuentran en el casco urbano de la ciudad y en las zonas perimetrales. En color oscuro, se muestran las 555 ha que no presentan restricción y se ubican en zonas aledañas al casco urbano de la ciudad y en la zona rural de la misma. Se encontró que un 53% del área total de la ciudad presenta restricciones, dejando el 47% del territorio sin algún tipo de restricción para realizar expansión urbana (Ver Figura 1-4).

**Figura 1-4** Mapa de restricciones

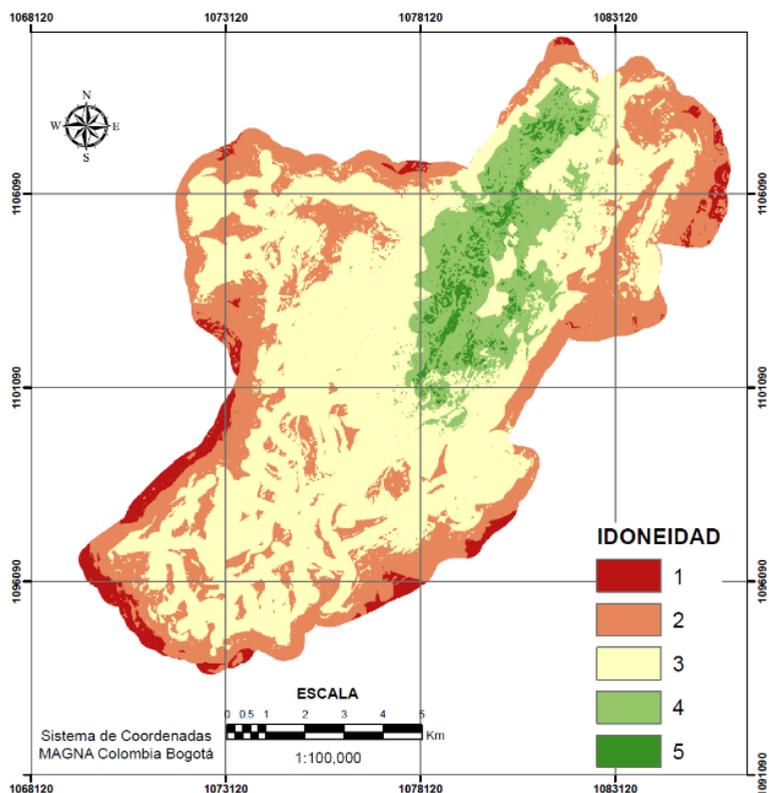


*Fuente: Autores.*

### 1.4.2 Mapa de idoneidad

En la Figura 1-5, se puede apreciar la distribución espacial del grado de idoneidad para la ciudad de Tunja, las áreas caracterizadas por color verde oscuro y verde claro, corresponden a las zonas idóneas para urbanizar dentro del perímetro urbano, las cuales corresponden al 35% del área de la ciudad con un total de 425 Ha, las restantes 765 Ha, no presentan condiciones óptimas para realizar obras de urbanización dentro del municipio, entretanto, la zona rural se caracteriza por la presencia de zonas con idoneidad urbanizable aceptable caracterizado en la leyenda con un valor de 3.

**Figura 1-5** Mapa de idoneidad



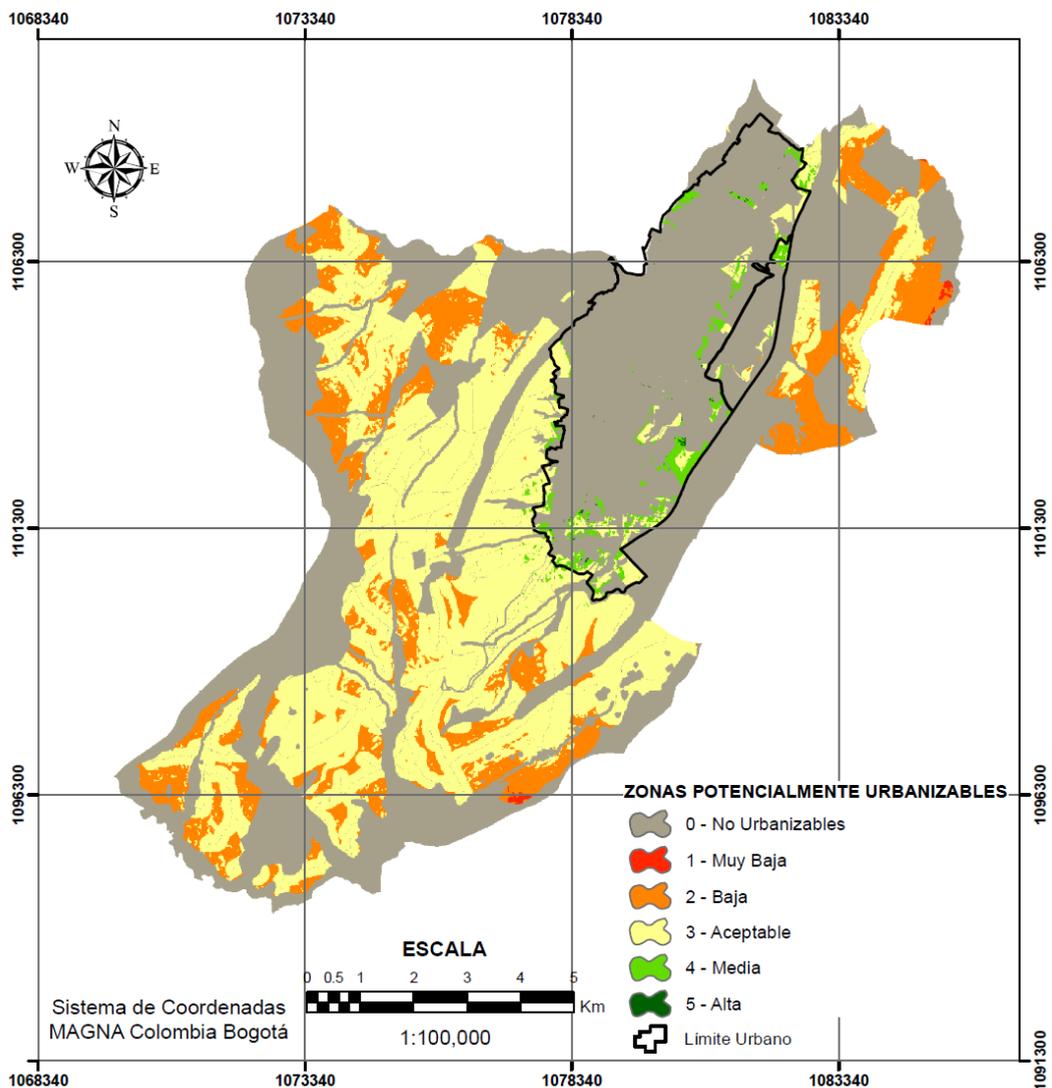
*Fuente: Autores.*

### 1.4.3 Mapa de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja

Se pudo identificar, que las zonas potencialmente urbanizables con clasificaciones 5 (alta) y 4 (media), tienen un área total de 768,19 Ha, distribuidas mayormente de sur a norte en el costado occidental de la ciudad; dicha área equivale a un 6,5% del territorio. Aquellas zonas con clasificación 3 (aceptable), presentan un área de 4090 Ha, las cuales representan un 35% del área total de la ciudad y se encuentran en su mayoría en la zona rural.

El área sin potencial de urbanismo es de 6944 Ha, lo que representa un 59% de la ciudad, ubicada dentro del casco urbano y en la periferia de la capital boyacense. En la Figura 1-6, se pueden ver las zonas potencialmente urbanizables de la ciudad de Tunja.

**Figura 1-6** Mapa zonas potencialmente urbanizables Tunja



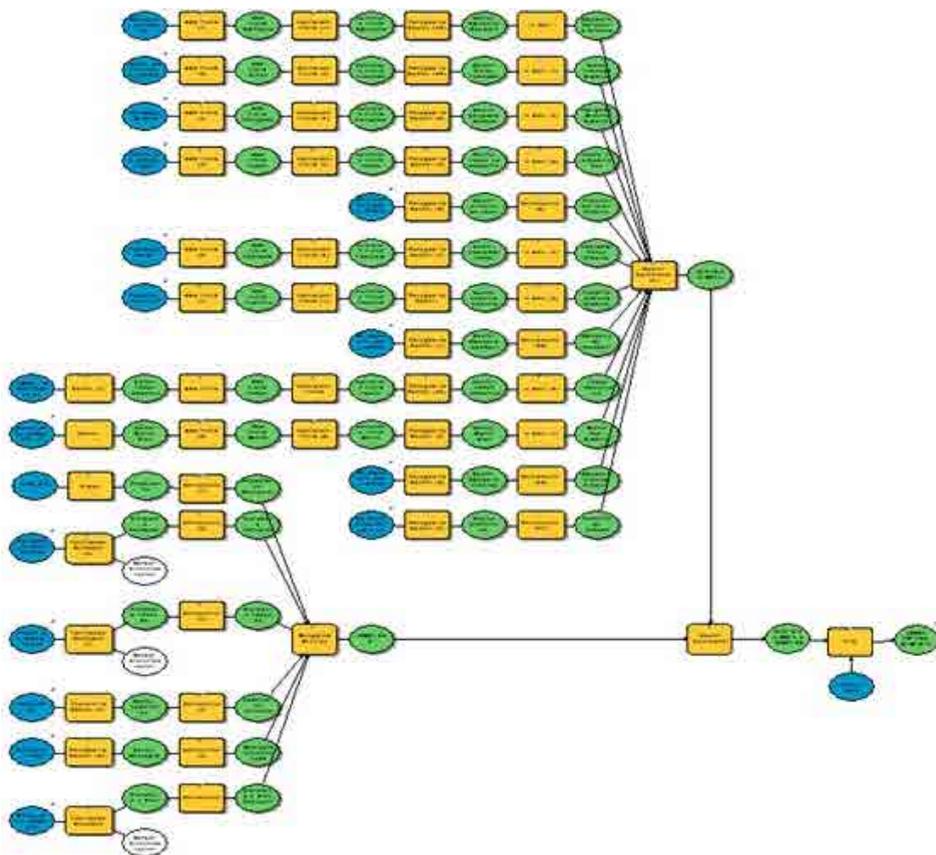
Fuente: Autores.

#### 1.4.4 Modelo de zonas potencialmente urbanizables en ARCGIS

Como aporte final, se obtuvo el modelo mostrado en la Figura 1-7, obtenido en el software ArcGIS, donde se relaciona la información recolectada para realizar el análisis. En este modelo se efectuaron reclasificaciones, análisis de pendientes, determinación de distancias euclidianas, zonas de influencia,

asignación de criterios de valorización y la conformación de los mapas; modelo que es totalmente automatizado y podrá ser implementado por los entes territoriales para proyectar las zonas de expansión de acuerdo a la información de cada municipio basándose en los criterios físicos y de accesibilidad propios de cada uno de ellos.

**Figura 1-7** Modelo para determinar zonas potencialmente urbanizables Tunja



*Fuente: Autores.*

Las zonas destinadas para el uso residencial, deben poseer características específicas de habitabilidad, y estar relacionadas con la salud y seguridad de la población, así como con la necesidad de satisfacer ciertas demandas en cuestión de equipamiento; estas se encargarán de garantizar a las personas, el disfrutar de una buena calidad de vida que posibilite a los habitantes acceso a cultura, educación, esparcimiento, salud y trabajo.

La determinación de la aptitud del territorio se basa en limitantes relativas ligadas a percepciones subjetivas, que pueden ser probables más no exactas. Idealmente, un área o una zona específica con potencial para urbanizar y residir, debería ser el resultado del análisis de un conjunto de variables cuantitativas, que disminuyan la incertidumbre en la toma de decisiones.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario el uso de herramientas y metodologías que permitan realizar un análisis detallado de cada una de las variables que intervienen en la determinación de las zonas de expansión urbana. Es allí, donde los sistemas de información geográfica (SIG) y la evaluación multicriterio (EMC), se convierten en una solución ideal para realizar este tipo de análisis, dada su practicidad y facilidad en el desarrollo de procesos, análisis individuales y la interacción de relaciones espaciales entre múltiples conjuntos de datos, de cada una de las variables que se tengan en cuenta para este tipo de estudios.

## 1.5 Conclusiones

La magnitud de la información y la cantidad de variables asociadas al análisis del panel de expertos, fueron fácilmente procesados por la integración de los SIG con la EMC; lo que permitió modelar la información alfanumérica con una estructura de datos simple, facilitando su análisis espacial, obteniendo una herramienta sencilla y versátil para la gestión del territorio, la cual puede ser utilizada por los entes territoriales en la toma de decisiones.

Se encontró un área total de 4858,19 Ha, en las cuales se puede desarrollar una zona de expansión urbana, una amplia fracción de esta área se encuentra en la parte rural, y la que fue clasificada como zona aceptable para urbanizar, por lo que se debe determinar un polígono adecuado para zonas de expansión, con el fin de no realizar una afectación importante a la parte rural de la ciudad.

El estudio se ajusta a las condiciones y características propias de la ciudad de Tunja, razón por la que no se recomienda tener en cuenta los mismos criterios, subcriterios y valores de las matrices de comparación para otros lugares, ya que estos criterios varían según el lugar, el tipo y cantidad de información que se tengan para realizar el análisis.

La metodología planteada en el presente estudio, puede ser utilizada por las autoridades competentes den cuanto a la planeación territorial, para la planificación e identificación de zonas idóneas, no solo para lugares de expansión urbana o posible urbanización, sino para localización de equipamientos, nuevas infraestructuras, etc., debido a que es una metodología

sencilla y versátil convirtiéndola en una herramienta apropiada para la gestión del territorio.

De igual manera, la información encontrada frente a las zonas potencialmente urbanizables es de gran utilidad para la ciudadanía, debido a que expone aquellas zonas donde no se tiene ningún impedimento para poder construir o urbanizar, lo que garantiza a los ciudadanos la posibilidad de adquirir predios que no presenten problemas en el futuro, identificar si predios ya adquiridos cuentan con restricciones y así continuar con el proceso pertinente para dar solución a dichas problemáticas.

Al realizar este tipo de análisis se garantiza que se realice una expansión urbana de manera responsable, sin afectar aspectos ambientales, sociales o económicos, al territorio y las personas que lo habitan, lo que permite que estas expansiones se hagan de forma sostenible.

## **1.6 Recomendaciones**

Se recomienda actualizar constantemente el modelo con un volumen mayor de información, ya sea de tipo primaria o secundaria, con el fin de tener una amplia cantidad de criterios para realizar el análisis, lo que permitirá determinar de manera precisa las zonas potencialmente urbanizables de la ciudad.

La aplicación de la metodología presente en este estudio, depende significativamente de la información que se obtenga para el análisis en cada ciudad o área que se quiera analizar, lo que hace necesario realizar las respectivas modificaciones a los modelos y ponderaciones que aquí aparecen, con el fin de obtener resultados veraces en cada lugar donde se realice el estudio.

Se recomienda a los entes territoriales utilizar estudios como el expuesto, para la planificación e identificación de zonas idóneas, no solo para lugares de expansión urbana o posible urbanización, sino para localización de equipamientos, nuevas infraestructuras, etc., ya que esta es una metodología sencilla y versátil, lo que la convierte en una buena herramienta para la gestión del territorio.

Es necesario que se evalué lo más pronto posible la ubicación actual de las zonas de expansión urbana de la ciudad, para no realizar expansiones en lugares no aptos para estos fines, de igual forma, evitar la compra de predios que a futuro pueden tener conflictos en el uso del suelo, de esta manera, evitar un impacto ambiental, social y económico en la ciudad y las personas que la habitan.

## **2. GESTIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES BASADO EN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA RED VIAL DE BOYACÁ, COLOMBIA**

Andrés Leonardo Silva Balaguera  
Diego Fernando Gualdrón Alfonso

### **2.1 Introducción**

La red vial de Colombia se encuentra a cargo de entidades nacionales (Instituto Nacional de Vías “INVÍAS” y la Agencia Nacional de infraestructura “ANI”), y entidades territoriales como Departamentos y Municipios; donde la red vial es asignada de manera ponderada. Las vías de carácter primario están a cargo del INVÍAS y la ANI, quienes a su vez tienen parte de la red secundaria y terciaria. Las redes secundarias y terciarias se encuentran a cargo de los departamentos y municipios. En el caso de departamento de Boyacá, se cuenta con aproximadamente 17415 km en total, de los que se han definido 5176 Km en vía secundaria y terciaria a la gobernación del departamento; el restante es adjudicado a INVÍAS, ANI y en vías terciarias a las alcaldías municipales (Gobernación de Boyacá, 2020).

De los 2275 km de red secundaria, que se encuentran a cargo del Departamento de Boyacá el 43.6 % tienen superficie de rodadura en pavimento (asfalto o concreto), y el 56.4 % en afirmado (material granular) (Gobernación de Boyacá, 2020). Del total de las vías terciarias el 0.8 % está en pavimento (asfalto o concreto), el 82.6 % en afirmado y el 16.6% en material granular (tierra). Según la gobernación, el total de la red se encuentra en un estado 14% bueno, 57% regular y 29 % malo (Gobernación de Boyacá, 2016). En el Departamento de Boyacá existen rutas de transporte de carga y pasajeros muy importantes, que permiten establecer los diferentes flujos vehiculares con rutas de origen y destino departamentales, nacionales e internacionales, con un orden de importancia según los volúmenes transportados desde las áreas de desarrollo internas y externas. En la red vial secundaria del departamento, se movilizan un total de pasajeros anual de 5.297.712 y un total de carga anual de 24.100.440 toneladas. Información tomada del Plan Vial de Boyacá 2009.

Cabe reconocer, que el departamento no cuenta con bases de datos detalladas (información dispersa e incompleta) de la red vial a cargo. La información disponible está conformada por reportes de consultoría, construcción, interventoría y supervisiones (espesores, módulos de capas, procesos constructivos, materiales, auscultaciones, etc.). Una amplia cantidad de esta información, se encuentra almacenada en informes técnicos que hace, muchas veces, difícil su recuperación y uso en bases de datos espaciales. Más aún, con las referencias en que la gestión de infraestructura vial se fundamenta, hoy en día y en muchos países, en el uso de herramientas de análisis espacial y Geodatabases para mejorar la toma de decisiones.

En Colombia, un ejemplo de aplicación de las bases de datos espaciales, es el Sistema Integral Nacional de Carreteras (SINC), alimentado de información entregada por las entidades encargadas de la red vial. Este sistema busca georreferenciar la información de la infraestructura vial como un inventario (Ministerio de Transporte, 2015), se observa su aplicación en el INVÍAS, con el sistema HERMES. Esta información relevante y se recomienda generar una metodología, que con adecuado uso de tecnologías, herramientas computacionales y gestión de pavimentos optimice la condición actual de manera sustentada y con mejoras económicas a futuro. Metodología que puede centrarse como referencia para el desarrollo de la gestión vial a nivel departamental.

Debido a que Colombia es un país en desarrollo, la condición o estado de la red vial secundaria y terciaria actual es mayormente regular y mala, por lo que el enfoque de la gestión de vías se centra en construir toda la red vial posible. Los recursos a cargo de las entidades son pocos, por lo que se entiende una limitada información y recurrente toma de intervenciones sin bases técnicas de caracterización o adecuada gestión. La principal forma de priorizar recursos del departamento de Boyacá, se realiza mediante el plan vial departamental, en cual se evalúa principalmente bajo la cantidad de pasajeros y carga (comercio) en la red. Estas dificultades presupuestales también impactan posibles proyectos de mantenimiento de pavimentos que requieren de información primaria, asociada con estudios que no es posible contratar, razón por que en varias oportunidades se deben tomar decisiones con la información secundaria disponible y con un mínimo de información primaria que, a su vez, implique bajos costos.

### 2.1.1 Gestión de pavimentos

El buen servicio de un pavimento está representado en su capacidad para proporcionar a los usuarios comodidad, seguridad y economía. La recuperación del nivel de servicio de un pavimento en uso, por medio de obras de rehabilitación, se hace necesaria por una o más de las siguientes razones (Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías, 2008):

- Incomodidad para la circulación vehicular.
- Exceso de defectos superficiales.
- Reducción de la adherencia entre la calzada y los neumáticos de los vehículos.
- Necesidad excesiva de servicios de mantenimiento rutinario.
- Costos de operación elevados para los usuarios.
- Capacidad estructural inadecuada para las solicitaciones del tránsito previsto

Las actividades requeridas para la rehabilitación de las estructuras de pavimento se hacen más importantes, en magnitud y costo, a medida que ellas se deterioran a causa de los efectos ambientales y el tránsito. El énfasis en la administración o gestión de pavimentos es la preservación de la inversión inicial, mediante la aplicación oportuna de tratamientos adecuados de mantenimiento y de rehabilitación para prolongar la vida de estas estructuras (Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías, 2008).

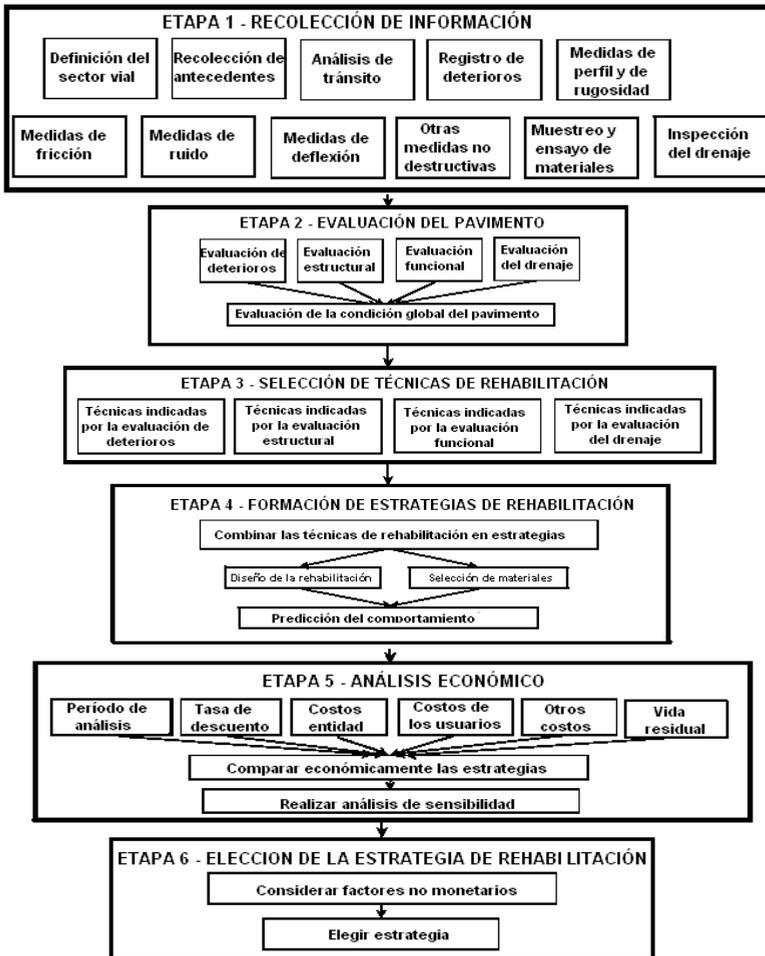
La gestión de pavimentos realiza el monitoreo de la condición de estos, en la fase de post-construcción, de forma preventiva se realiza el mantenimiento y rehabilitación bajo tratamientos especiales, y un análisis económico de alternativas. Un sistema de gestión de pavimentos, es un procedimiento de recolección, análisis, mantenimiento y reporte de información, que sirve de base en la toma de decisiones para optimizar las estrategias de mantenimiento en los pavimentos, buscando una condición servicial para un periodo de tiempo al menor costo posible (Vitillo, 2013).

En el estado actual de la práctica de la ingeniería de pavimentos, en el que las actividades de planeación, diseño, construcción, mantenimiento y rehabilitación se deben vincular dentro de un marco único de carácter integral, el diseñador de la estructura tiene la libertad de considerar múltiples estrategias alternativas de actuación durante un período de análisis relativamente prolongado -restringido únicamente por las limitaciones tecnológicas, ambientales y presupuestales- las cuales somete a un análisis de costos

durante el ciclo de vida, considerando las posibilidades y las restricciones, que resulten más favorables para la comunidad.

El INVÍAS recomienda el diseño y comparación de alternativas técnicamente viables de rehabilitación, de acuerdo con la capacidad estructural y funcional del pavimento por intervenir, así como la disponibilidad inmediata de fondos para su materialización, realiza un análisis de costos durante el ciclo de vida de ellas, suponiendo unas condiciones razonables de intervención en el futuro. De esta manera, propone el siguiente seguimiento para la selección de una rehabilitación adecuada al pavimento:

**Figura 2-1** Proceso del diseño de la rehabilitación del pavimento



Fuente: (Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías, 2008)

### **2.1.2 Prácticas existentes**

A nivel mundial, el uso de Sistemas de Información Georreferenciada (SIG), ha tomado importante aceptación debido a la facilidad de integración de la localización de datos e introducción de información necesaria en la toma de decisiones para los proyectos. El sistema de datos georreferenciados, permite el ingreso y procesamiento de información en tiempo real, de parámetros establecidos en la evaluación del pavimento. Las aplicaciones de SIG con los Sistemas de Gestión de Pavimentos (SGP), llegan a una selección o interpretación de la priorización de recursos que otorgan el mayor beneficio a la región. La facilidad de consulta del SIG, brinda eficiencia en el manejo de información para las autoridades a cargo de la red vial (Adeleke, et al, 2015).

Los SGP, se enfocan principalmente en dos niveles; nivel de red y proyecto. El nivel de red comprende la posible infraestructura a cargo de una entidad y el nivel de proyecto un tramo definido dentro de la red o particular, que requiere mayor detalle en la evaluación del pavimento para su intervención. En los SGP, se analizan el tránsito promedio diario anual (TPDA) (Hafez, et al, 2017) y una evaluación técnica del pavimento (funcional y estructural) (Carlos Higuera, 2015). El análisis del TPDA en los tramos viales, ha permitido identificar las zonas con mayor influencia (Chen, et al, 2014) y su distribución vehicular, debido al impacto que este genera en el pavimento (Iliya Yut, et al, 2017). En algunos casos, estos estudios han permitido organizar el flujo de tránsito, de tal manera, que en la ciudad no afecten rápidamente las estructuras de pavimento (Sitányiová & Mužík, 2013). En otros parámetros importantes en el análisis del estado del pavimento, se contempla la red vial y condición topográfica de Nepal, similar a Colombia; donde se advierte que es importante evaluar la pendiente del terreno, debido a la estabilidad o susceptibilidad de falla en la infraestructura vial por los tipos de terrenos (Pantha, et al, 2010).

### **2.1.3 Evaluación técnica de los pavimentos**

Los SGP, se enfocan en los parámetros que inciden en el pavimento como: tránsito, condición estructural (deflexión, módulo resiliente, estructuras de capas) y condición superficial del pavimento (Regularidad, fricción y auscultación) (Hafez et al., 2017). Estos parámetros miden detalladamente el estado del pavimento y así, se prevén las intervenciones a realizar para dar una mayor durabilidad a bajo costo.

### 2.1.3.1 Daños en el pavimento

El parámetro con mayor uso para la evaluación del pavimento a nivel internacional es la condición del pavimento (PCI), en la Tabla 2-1 se muestran algunos daños presentes en el pavimento flexible.

**Tabla 2-1 Daños comunes en el pavimento flexible**

<b>Categoría</b>	<b>Tipo de daño</b>
Grietas	Longitudinal, transversal, bloque, borde, reflectiva y fatiga
Deformación	Ahuellamiento, corrugado, depresiones y empuje
Deterioro	Baches, parches, pulimento, descascaramiento, fragilidad (piel de cocodrilo inicial) y bombeo
Material inadecuado	Segregación y sangrado

*Fuente: (Kumar & Gupta, 2010)(M. M. E. Zumrawi, 2015)*

El PCI fue desarrollado por la U.S. Army Corps of Engineering, y es una metodología de evaluación y clasificación de daños que mide de forma objetiva y ponderada los daños presentes en el pavimento. Se desarrolla con el tipo de daño, nivel de severidad y densidad sobre el pavimento. Es un indicador que va de 0 (Falla) a 100 (Bueno) y normalmente se evalúa en tramos seleccionados por el tipo de pavimento (U.S. Army Corps of Engineering, 2001).

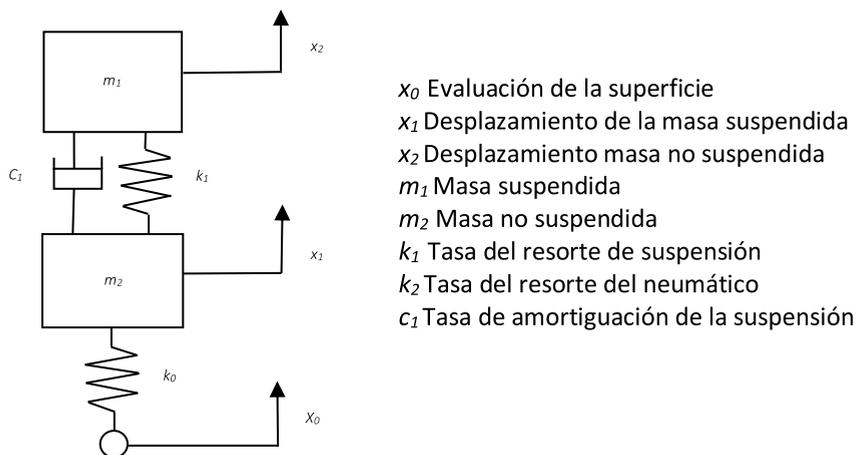
Actualmente, la normativa Colombia INVIAS, adopta la metodología francesa VIZIR para evaluar los daños del pavimento, en la que se interpretan daños tipo A y B relacionados con la condición estructural y funcional respectivamente. Con los daños inventariados, se obtienen los índices de fisuración (If) y deformación (Id) basados en los daños de tipo A, que combinados representan el índice de deterioro superficial (Is) del pavimento que va en un rango de 1 a 7, aunque debe ser corregido por el porcentaje de reparación presente en el pavimento (Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías, 2008).

Se han desarrollado comparaciones (Cerón-Bermúdez, 2006; Pinilla, 2007; Sierra Díaz & Rivas Quintero, 2016) entre ambas metodologías que permiten concluir favorabilidad por el PCI, debido a los rangos de clasificación que van desde 0 hasta 100, así mismo, se observa que la metodología PCI, evalúa la mayoría de daños conocidos para la superficie del pavimento. Como debilidad se observa del PCI, que la clasificación “daños”, es más compleja y detallada.

### 2.1.3.2 Regularidad en el pavimento

El segundo parámetro más evaluado es el de regularidad, mediante el índice de regularidad internacional (IRI) (m/km), que se aconseja sea menor a 1.5 m/km; el IRI modela un cuarto de carro a una velocidad de 80 km/h en una variación del perfil en forma longitudinal, fue desarrollado en 1986, con experimentos en vías de Brasil (1982), bajo el apoyo del banco mundial (Lavaud, 2011).

**Figura 2-2** Modelo cuarto de carro. Muestra la estructura del equipo



Fuente: (Abulizi, Kawamura, Tomiyama, & Fujita, 2016)

### 2.1.3.3 Fricción o rozamiento transversal

El coeficiente de fricción o rozamiento transversal, se ha valorado con diferentes indicadores internacionales, mediante la micro y macro textura del pavimento. su valor está conectado con la seguridad y representa la adherencia del neumático con el pavimento (Alfar, 2016). El equipo *grip tester*, es muy utilizado, cuenta con un sistema de deslizamiento fijo que está diseñado para rotar proporcionalmente a una velocidad diferente, produciendo un deslizamiento de 14.5% con respecto a las ruedas motrices; esta relación es el punto crítico de fricción máxima con el que se diseñan los sistemas de frenos antibloqueo de los vehículos para activarse y desactivarse; normalmente es evaluado con una película de agua de 0.25 mm debajo de la rueda (Plati & Georgouli, 2014), y también es medido con el péndulo británico o la mancha de arena (Carlos Higuera, 2015).

La normatividad colombiana normaliza este parámetro con el índice de fricción internacional IFI, que es una escala de referencia basada en el modelo

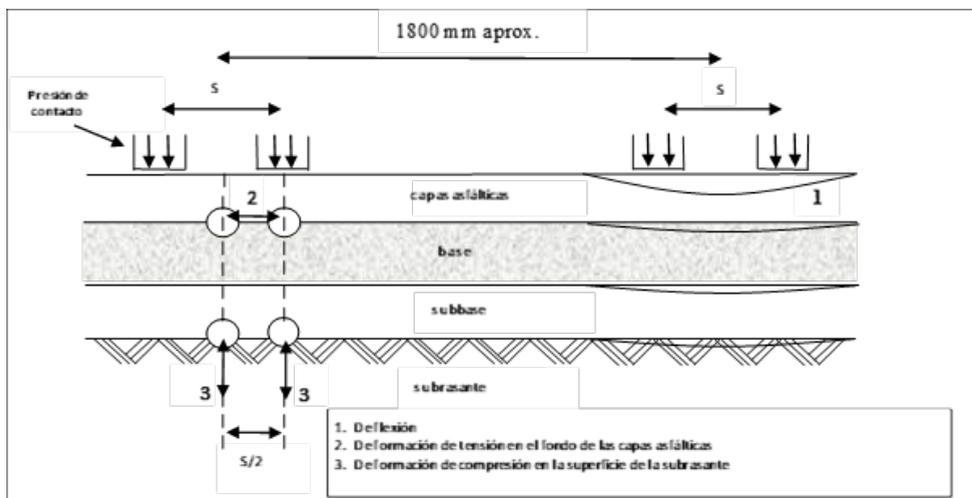
AICPR (Relaciona la fricción con la velocidad de deslizamiento), también denominada fricción superficial, donde se evalúa en primera instancia la seguridad del usuario, mediante el coeficiente de fricción (Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías, 2008).

El IFI se expresa mediante dos números escritos dentro de un paréntesis y separados por una coma (F60, Sp), el primero detalla la fricción a 60 km/h, en tanto que el segundo representa la macro textura, mediante una constante de referencia de velocidad. El F60, es un número adimensional y el Sp es un número positivo, sin límites determinados, con unidades de velocidad (km/h) (Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías, 2008).

#### 2.1.3.4 Deflexión del pavimento (estructural)

La deflexión del pavimento no es un parámetro comúnmente medido en una gestión a nivel de red por su alto costo, a nivel de proyecto, es esencial para seleccionar las intervenciones adecuadas al pavimento (Los proyectos son tramos que se encuentran dentro de una red vial), se define como el desplazamiento vertical de la superficie del pavimento en respuesta a la aplicación de una carga externa, representa una respuesta total del sistema constituido por la estructura y la subrasante ante la aplicación de dicha carga. Cuando una carga se aplica sobre la superficie del pavimento, todas las capas se deflectan, desarrollándose esfuerzos y deformaciones en cada capa como lo ilustra la Figura 2-3 (Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías, 2008).

**Figura 2-3** Deformaciones producidas por las cargas del tránsito.



Fuente: (Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías, 2008)

Existen diferentes equipos de forma estandarizada para medir la deflexión a través de la aplicación de una carga y registro de las deflexiones, los cuales con una serie de sensores desplazados radialmente del centro de la carga establecen lo que se conoce como el “Cuenco de deflexión”. Los equipos más conocidos son el deflectómetro de rueda giratoria RWD (Rolling Wheel Deflectometer) (Zhang, Gaspard, & Elseifi, 2014) y el deflectómetro de impacto FWD (Falling Weight Deflectometer) (Carlos Higuera, 2015).

#### 2.1.3.5 Evaluación geotécnica (Estructural)

Aunque la premisa global en la gestión de pavimentos es conocer las propiedades e indicadores de los pavimentos ya construidos, en algunos casos (organización o falta de información), se hace necesaria una evaluación geotécnica que permita identificar los espesores de las capas y sus características in situ. Se deben ubicar sondeos con ensayos destructivos y no destructivos, de acuerdo con la debilidad estructural (deflexión) y el nivel de degradación de la estructura (Carlos Higuera, 2015).

#### 2.1.4 Aplicación espacial de la evaluación de pavimentos

La información antes mencionada (evaluación técnica), debe ser organizada y estructurada adecuadamente en el software de procesamiento, donde la entidad encargada interpreta los diferentes parámetros presentes en el pavimento y

procede al respectivo análisis e identificación de puntos o zonas de afectación (James Mahoney, et al, 2017). La gestión de pavimentos mediante SIG, es considerada la base de una adecuada administración, manejo y mantenimiento de la información (Huisman & A., 2009). En este marco, sí se considera el tránsito (TPDA) como parámetro constante de evaluación se observan parámetros complementarios en cada una de las aplicaciones del SGP:

**Tabla 2-2 SIG mediante la aplicación de los diferentes parámetros**

<b>Parámetro evaluado</b>	<b>Obtención de información</b>	<b>Referencias</b>
IRI	Evaluación del IRI, se observa variación en aumento cada año y una evaluación al detalle para cada tramo evaluado.	(Abulizi et al., 2016; Díaz-vilariño, González-jorge, Bueno, Arias, & Puente, 2016; Pantha et al., 2010)
PCI o daños superficiales	Evaluación de la condición superficial del pavimento en la red.	(Adeleke et al., 2015; Bazlamit, Ahmad, & Al-suleiman, 2017; Chen et al., 2014; Ghazi, Mustafa, Kokkas, & Smith, 2014; Hong, Perrone, Mikhail, & Eltahan, 2001; Ibraheem & Falih, 2012; Jiao, Bowen, & Siranc, 2012; Obaidat & Al-kheder, 2005; Rusu et al., 2015; Zhou et al., 2010; M. Zumrawi & Margani, 2017)
IRI y PCI	Comodidad del usuario y predicciones de los daños, regularidad y daños superficiales.	(Amador-Jimenez & Pooyan Afghari, 2015; Bonifacio R, 2015; Fernandez Seoane et al., 2006; Macea-Mercado, Morales, & Márquez-Díaz, 2016; Shamsabadi, 2014; Zapata Duque & Cardona Londoño, 2012)
Todas	Condición estructural y superficial.	(Babashamsi, Izzì, Ceylan, & Ghani, 2016; Hafez et al., 2017; Iliya Yut, James Mahoney and Donald A. Larsen, 2017; Mohammed & Elhadi, 2009; Satria & Castro, 2016; SITÁNYIOVÁ & MUŽÍK, 2013; Zhang et al., 2014)

*Fuente: Autores.*

## 2.2 Desarrollo

### 2.2.1 Metodología SIG para SGP propuesta

La metodología desarrollada integra la normatividad vigente por el Ministerio de Transporte en Colombia, inicialmente realiza una priorización vial mediante el Plan Vial Departamental, y una selección final de intervenciones mediante la evaluación del estado del pavimento de los principales corredores (Propuesta gestión de pavimentos basado en SIG).

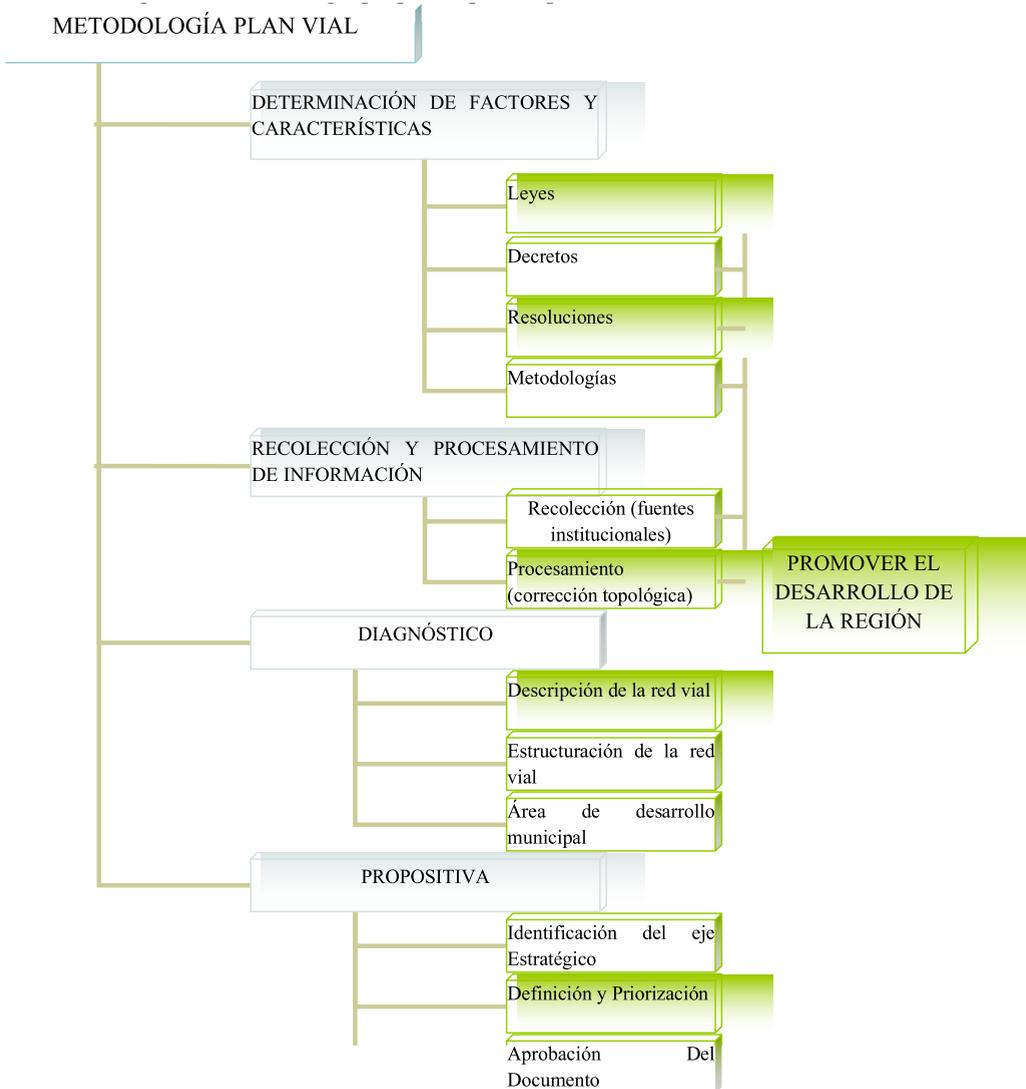
### 2.2.1.1 Priorización Vial

En el marco normativo se contempla de la Constitución Política de 1991, Ley 152 de 1994, ley 338 de 1997, Ley 1083 de 2006 y 1454 del 28 de junio de 2011, donde las entidades territoriales, tienen la responsabilidad de elaborar y desarrollar planes y programas sectoriales orientados a consolidar el progreso de su región, con inversiones públicas conducentes a la prosperidad general en el territorio.

La metodología o estrategia gubernamental para establecer el plan vial, se realiza mediante la determinación de factores y características, recolección y procesamiento de información, diagnóstico y propositiva. El Ministerio de Transporte, en un marco normativo y técnico, permite a los municipios o regiones, adaptarse a las variadas organizaciones, necesidades y capacidades operativas de los gobiernos municipales, brindando asistencia técnica e institucional en materia de proyectos de infraestructura y gestión vial.

La metodología seleccionada pretende ser utilizada en el Plan Vial para el departamento de Boyacá, el cual es un conjunto de acciones encaminadas a la generación de planes, diseños y operación de la infraestructura con el fin de orientar el desarrollo ordenado de la malla vial, el tránsito y del transporte de un municipio. Esta metodología permitirá obtener el acompañamiento en la definición de los entornos técnicos que deben prevalecer en la red y la forma de solicitar recursos para la inversión en la transformación de las condiciones que limitan el nivel de servicio ofrecido. Por lo tanto, la metodología debe responder a las especialidades y particularidades de cada zona de estudio, ajustándose al plan de ordenamiento instituido, considerando las características de su red vial, las competencias y funciones establecidas en el marco normativo vigente y la disponibilidad de recursos para su transformación, de forma que su implementación permita el mejoramiento del bienestar de la población y la creación de nueva infraestructura vial a través de generación de proyectos de gestión vial.

**Figura 2-4** Metodología propuesta para la priorización de vías



Fuente: Autores.

La implementación de esta metodología busca dar cumplimiento a los siguientes propósitos:

- Desarrollo de capacidades institucionales y conocimientos técnicos aplicables a la gestión de la red de transporte a cargo de los departamentos y municipios.

- Fortalecimiento de la gestión en su rol de ente rector del sector transporte para desarrollar o actualizar el marco técnico y normativo para la gestión en la red vial municipal.
- Contar con un marco normativo y técnico de inversión y gestión en la red vial, flexible y adaptable a las condiciones y naturaleza de la demanda, y a los sistemas de planificación y programación vial.
- Actualizar y desarrollar Planes Viales Regionales y Municipales, reconociendo la red vial y las intervenciones necesarias para su operatividad en términos seguridad y niveles de confort, según corresponda a las demandas por infraestructura en cada municipio en particular, y
- Promover el desarrollo de las regiones y municipios a través de la implementación de planes, programas y proyectos viales que permitan la comunicación ágil, segura y económica, y así ofrecer condiciones en el costo del transporte que no afecten la competitividad de los productos que se producen en las regiones, frente a otras, a nivel nacional e internacional.

### 2.2.1.2 Propuesta Gestión De Pavimentos Basada En SIG

En los últimos años, los estudios del estado del pavimento han aumentado notablemente. Se observa un enfoque fundamental en los SGP, con en el continuo seguimiento y mantenimiento, para aumentar la vida del pavimento a bajo costo. Los SGP encuentran aportes significativos con la inclusión de una metodología SIG que facilita su análisis de manera general, simplificada, rápida y organizada.

Los SIG presentan importante utilidad en la representación gráfica de las vías presentes en una zona. La presentación de la información permite establecer en una determinada red o proyecto bajo sistemas de colores o condiciones específicas, el estado o necesidad que se requiere, así mismo, establecer para determinados puntos o lugares de interés una especie de “libreta” o estructura de información (geodatabase), que despliega su condición específica. La información es recolectada bajo la necesidad del proyecto a trabajar o directrices del encargado del sistema para fácil interpretación (Kmetz, 2011). Entre los principales aportes del SIG a la gestión de pavimentos se encuentran los siguientes:

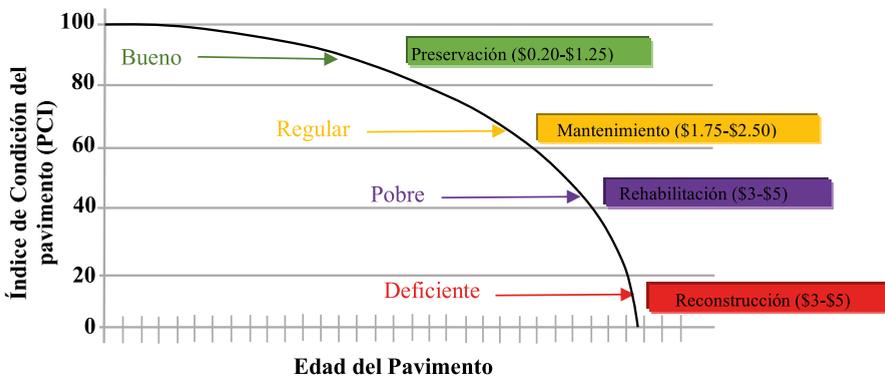
- “Capacidad de extracción rápida de información con facilidad de uso.
- Reduce los esfuerzos en recolección de información geoespacial.
- Se puede mejorar la actualización de datos, precisión y coherencia de la información presente.
- Se promueve la cultura para compartir información y trabajo en

equipo.

- El mapa obtenido entrega información segura y más organizada” (Mohd Zulkifli B. Mohd Yunus, 2010).
- Permite una selección de intervenciones de forma general y no únicamente localizada.
- Es apropiado para la integración carretera-operación-presentación, organiza y proyecta a futuro los datos o información del SIG.
- Entrega una presentación y evaluación confiable, siempre que la información base sea proporcionada correctamente.

Como se puede apreciar, la mayoría de evaluaciones del pavimento con SIG, el parámetro de mayor uso es el PCI. Por lo anterior, es necesario cuidar si se evalúa solo con este parámetro, pues como lo muestra la Figura 5., se pueden establecer acertadamente los límites de intervención (mantenimiento y reconstrucción), pero en la zona media de la gráfica (PCI entre 70 y 30), se debe complementar con el análisis estructural, para no incurrir en intervenciones inadecuadas como sucede con el estado superficial del pavimento (Zhang et al., 2014). Un análisis similar, lo presenta Edgar Armas, en el que detalla que la fase más importante de intervención, se centra en la intermedia, con mayor pendiente de deterioro del pavimento, ya que en esta fase con solamente una inversión cercana al 10% de la construcción total se puede recuperar y no incurrir en mayores costos (Armas, 2012).

**Figura 2-5** Intervenciones a realizar según PCI (Los Ángeles-California).



Fuente: (Los Angeles County, 2017)

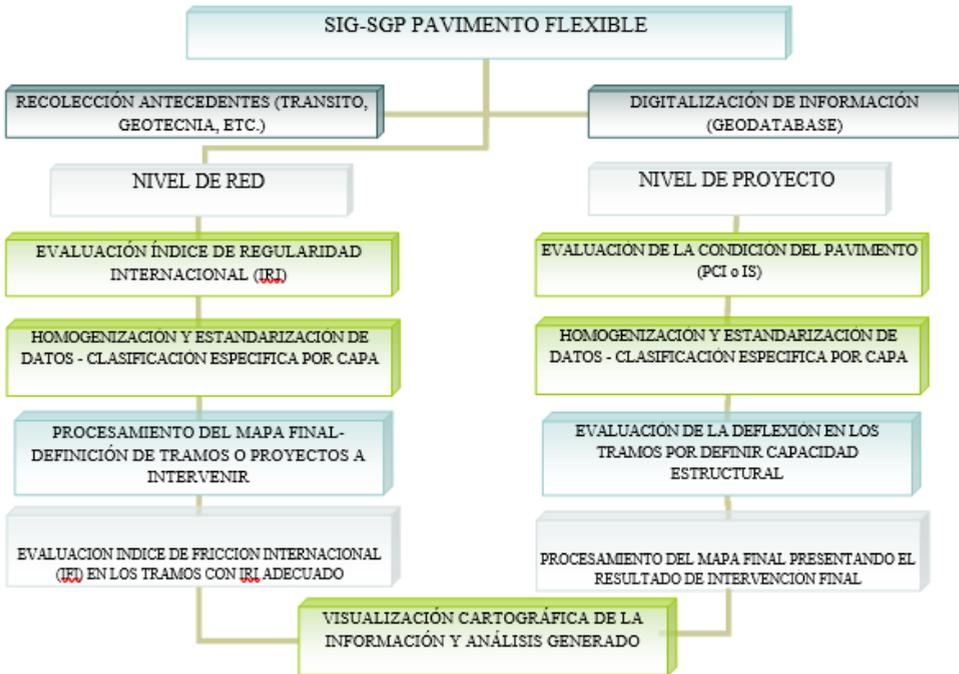
Aunque la aplicación de un solo parámetro como el PCI se ha desarrollado notablemente, cabe aclarar que como parámetro de análisis global o a nivel de red, puede dar acercamientos a las intervenciones a realizar, pero no se debe tomar como la fuente final para la toma de decisiones en la intervención

particular de cada tramo. Debido a la actual condición normativa en el país, donde el INVIAS tiene reglamentada la metodología francesa VIZIR, para la evaluación de daños del pavimento, se propone esta metodología en el desarrollo del proyecto.

Finalmente, el sistema de evaluación recomendado requiere de la recolección de información de forma estandarizada, adecuación de una base de datos espaciales, procesamiento de mapas y presentación de la información en los niveles de red y proyecto, sistema que debe buscar:

- A nivel de red realizar una evaluación de carácter funcional con el IRI, especificando así los puntos con mayor IRI, que seguramente presentarán daños en el pavimento y debilidad estructural. En la evaluación de red se pueden seleccionar los tramos específicos a intervenir, que deberán desarrollarse a nivel de proyecto. De igual forma, los tramos con IRI bajo o en buena condición, deberán ser evaluados con el IFI, permitiendo así identificar sectores de alto riesgo por poco coeficiente de fricción.
- A nivel de proyecto se debe complementar claramente la intervención a realizar ya sea mantenimiento o rehabilitación, donde la base de distinción será inicialmente el  $I_s$  obtenido con la metodología VIZIR, propuesta por el INVIAS. Si se evalúa el  $I_s$ , se obtendrán los sectores donde los resultados sean medio (3-4) y bajo (5-7), que con el parámetro estructural de deflexión del pavimento (módulos elásticos de las capas de pavimento) se identifican los tratamientos adecuados, para un  $I_s$  alto o de buena condición (1-2); se establecerá mantenimiento con tratamiento según los tipos de daños presentes en el pavimento. Si se debe rehabilitar, se recomiendan las metodologías de rehabilitación propuestas a nivel mundial que valoran la capacidad estructural presente en el pavimento.

**Figura 2-6** Esquema propuesto para la gestión de pavimentos basada en sistemas de información geográfica pavimento flexible.



Fuente: Autores.

### 2.2.1.3 Estructura de la Geodatabase

La cantidad de datos que se espera utilizar en el proyecto, requieren un gran espacio de almacenamiento, por lo cual se selecciona la *Geodatabase tipo File Geodatabase* con capacidad de almacenamiento de 1 TB expandible. Se propone la estructura de datos compuesta por dos *feature datasets*, los cuales se definen en las categorías temáticas.

La provincia de Valderrama, del departamento de Boyacá se encuentra ubicada en el punto de encuentro de los orígenes Central y Este. Se utiliza el origen Bogotá por aquel que cubre un porcentaje mayor del área en estudio. Y se adopta el Marco geocéntrico nacional de referencia (MAGNA- SIRGAS), al ser el sistema horizontal de referencia, datum oficial de Colombia (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2005).

El *feature dataset* “*Evaluación pavimento*”, contiene los resultados de los análisis obtenidos para el trazado en estudio. En los *feature class*, tipo línea se

almacenan los datos por tramo, mientras que en los *feature class* de geometría de punto, se almacenan los resultados de campo obtenidos para cada uno de los puntos de muestreo realizados en el tramo de estudio.

El *feature dataset* “Priorización vial”, contiene la información cartográfica base (Delimitación municipal, ubicación de los centros poblados), el trazado y priorización inicial de la vía.

La información fue estandarizada y posteriormente incluida en la base de datos, siguiendo los parámetros de contenido y tipo presentados en el diccionario de datos. Los datos obtenidos en campo fueron recolectados mediante GPS en el sistema de coordenadas geográficas WGS 1984, y proyectadas en oficina en la fase de post proceso. Se llevaron carteras de campo en las cuales se consignó la información relacionada en la tabla XYZ posteriormente incluida en la geodatabase.

**Figura 2-7** Base de datos estructurada en ArcGIS.



Fuente: Autores.

En el diccionario de datos se establece para cada *feature class*, la forma precisa para ingresar la información y los rangos en que se pueden presentar cada valor. Este, será definido por la entidad a cargo y el sistema establecido.

## 2.2.2 Implementación de la metodología propuesta

A nivel departamental, el plan vial articula las áreas productivas con los ejes de integración económica existentes, con el fin de potenciar las actividades regionales. La identificación adecuada del eje vial de la provincia está ligada a las capacidades, potencialidades y limitaciones que tengan cada uno de los municipios que la conforman, y la capacidad organizativa para enfrentar los retos económicos y sociales que garanticen un desarrollo dentro de la integración territorial.

Dicha identificación se realiza a través del conocimiento de los procesos que se dan sobre el territorio, a través del estudio de indicadores que permitan una caracterización idónea de la región, donde se interpretan aspectos físicos, económicos, y sociales.

El primer indicador corresponde a la caracterización física de la región, allí, se describen aspectos como regiones naturales, relieve, hidrografía, clima y recursos característicos, a través de los cuales es posible definir las áreas de desarrollo actuales e identificar las dificultades y ventajas de los municipios para su integración territorial.

Por su parte, la caracterización social está relacionada con los aspectos demográficos, tamaño de la población, distribución espacial de la población, composición urbana y rural, niveles de pobreza y los indicadores de calidad de vida de los habitantes de la provincia. A partir de estos datos es posible establecer las áreas de concentración poblacional al distinguir, los procesos de organización del territorio y relacionándolos con la actividad económica, lo cual constituye la base para el desarrollo de un sistema de priorización.

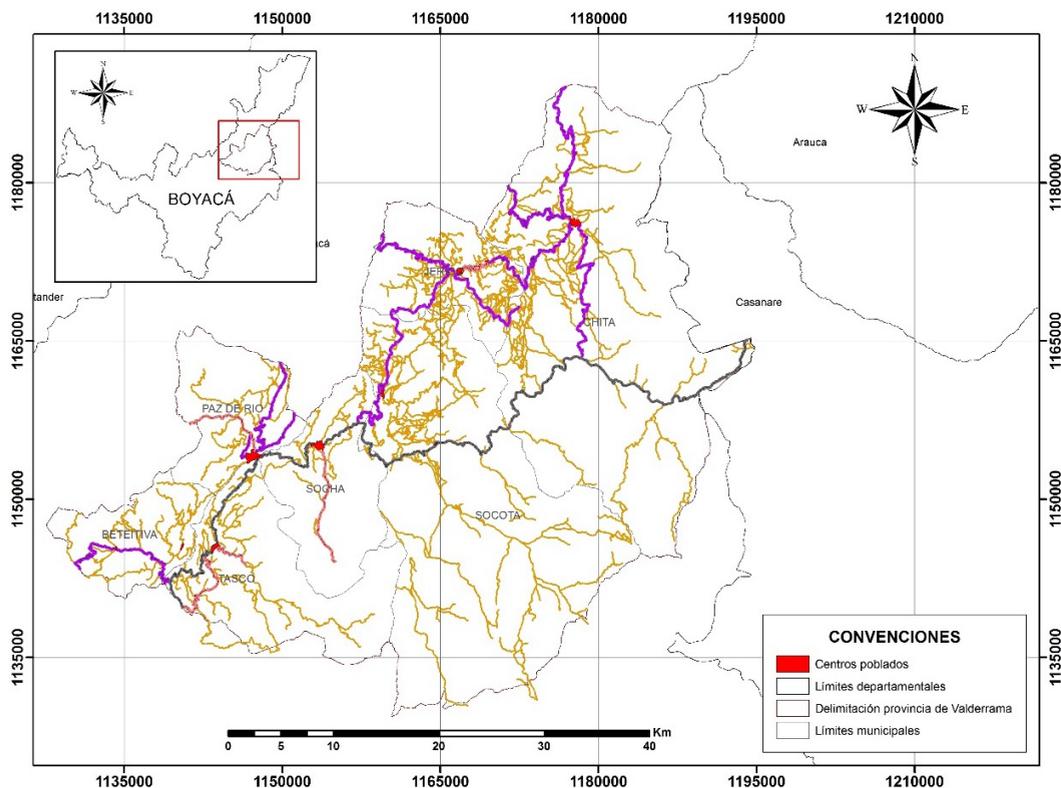
La evaluación de los indicadores económicos se realiza a través de los datos obtenidos referentes a la producción global y a los principales sectores productivos, a partir de los cuales se genera un perfil de la economía de la zona, simplificando dos o tres actividades productivas que correspondan a la identidad regional. Allí, se incluyen datos de localización de las áreas de producción y de los mercados de destino, volumen de comercialización y los principales productos que permitan obtener un diagnóstico socioeconómico, en el que a su vez se identifican las limitaciones para la comercialización de los productos.

Otro factor importante, es el referente a la organización espacial del transporte, en el que se describen los diversos modos de transporte que operan en la zona con la finalidad de evidenciar su importancia en el contexto nacional y departamental. Lo anterior, se establece mediante una medición de volúmenes

de carga movilizada y costo del flete por cada modo de transporte y está relacionado con la definición de la red vial requerida basada en las políticas de desarrollo social y económico, acordes a una estructura de ordenamiento territorial, la cual considera aspectos de tipo técnico como la conectividad, transitabilidad, pasajeros transportados, el tráfico proyectado y las características propias físicas de las vías que incluyen tipo de vía, jerarquía, ancho de calzada, material, estado, longitud, proyectos de infraestructura, existencia de bermas, obras de drenaje, puentes, señalización, tipo de terreno y tipo de superficie.

El análisis de dichos factores, permitió identificar para la validación de la metodología planteada para el eje de la provincia Valderrama (Ruta 64), que cuenta con una estructura de pavimento flexible.

**Figura 2-8** Eje estratégico y vías a cargo de la provincia de Valderrama.



Fuente: (TOVAR & SILVA-BALAGUERA, 2017)

### 2.2.2.1 Priorización de las vías departamentales de la provincia de Valderrama

El procedimiento de definición del orden de intervención de la red vial de la provincia, se realiza mediante un análisis matricial, que incluye la normalización de resultados y aplicación de factores de ajuste, que evalúan el nivel de importancia como vía estratégica, pertenencia a un eje vial estratégico y el impacto ambiental que genera. Estos aspectos son incluidos dentro de cuatro dimensiones centrales que componen los indicadores de evaluación y reúnen la información recopilada durante la fase diagnóstica.

- **Indicadores Técnicos:** Considera criterios de transitabilidad de la vía, tráfico proyectado a 10 años, frecuencia de los servicios de transporte público y conectividad con otros municipios, buscando la facilitación de las actividades sociales y productivas.
- **Indicadores de conectividad Intermodal:** Relacionados con la longitud de vías que se conectan al tramo y que mejoran la accesibilidad y la comunicación entre centros urbanos a través del modo de transporte carretero.
- **Indicadores Económicos:** Miden la importancia económica de la vía, a partir de criterios como, la carga que transita sobre la vía, por la incidencia del flete de transporte en el precio del producto y por su rol articulador, a centros turísticos en su área de influencia, que permiten el mejoramiento de la accesibilidad y la comunicación entre centros productivos, centros de provisión de materia prima e insumos, centros de distribución de bienes y acceso a uso de puntos de servicio.
- **Indicadores Sociales:** Evalúan el índice de pobreza a partir del balance general de las condiciones de vida de la población, con el fin de comparar con aquella que se ve beneficiada por el servicio que presta el tramo, y orientar las intervenciones hacia las zonas de mayor pobreza.

**Tabla 2-3 Criterios e indicadores de priorización de vías departamentales**

INDICADOR TÉCNICO		
CONECTIVIDAD CON MUNICIPIO	Articulación del sistema urbano regional (Número de municipio que articula)	Ficha 2
PASAJEROS TRANSPORTADOS	TPD	Ficha 11
TRANSITABILIDAD	Se considera de mayor prioridad un camino que permanece mayor número de días intransitable durante el año)	Ficha 2
TRÁFICO PROYECTADO	Tráfico proyectado a 10 años	Ficha 11

*Fuente: Metodología Plan Vial Departamental.*

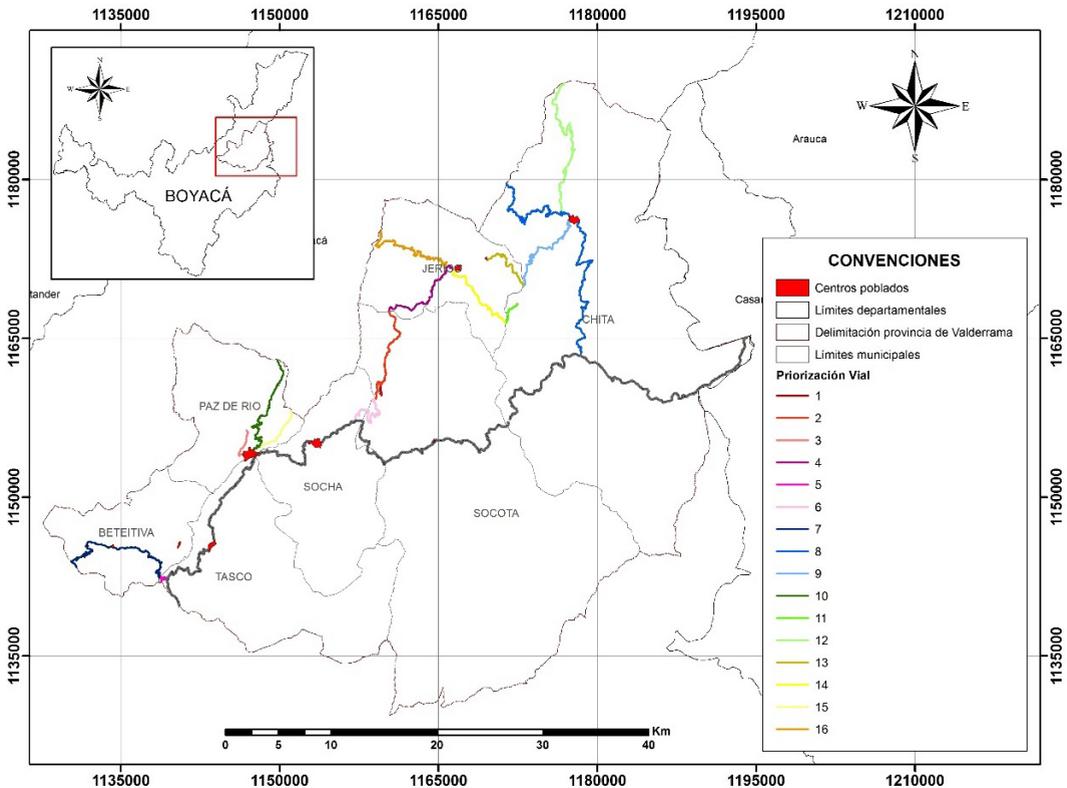
**Tabla 2-4 Continuación Criterios e indicadores de priorización de vías departamentales**

<b>CONECTIVIDAD INTERMODAL</b>		
CARRETERA	Longitud de vías terciarias a cargo del departamento, que se conectan al tramo de vía secundaria en evaluación.	Ficha 3
<b>INDICADORES ECONÓMICOS</b>		
CARGA	Carga que transita por la vía (función de articulación económica de la vía)	Ficha 11
CALIFICACIÓN ÁREA DESARROLLO NORMALIZADO	Áreas de especialización productiva y diferenciadas por su nivel de dinamismo	Ficha 23
ARTICULACIÓN CON CENTROS TURÍSTICOS	(la categoría del centro turístico la define la gobernación)	Centro turístico de categoría 1 = 1 Centro turístico de categoría 2 = 0,8 Centro turístico de categoría 3 = 0,6
<b>INDICADORES SOCIALES</b>		
ÍNDICE DE POBREZA MULTIDIMENSIONAL NORMALIZADO	Indicador de pobreza=nivel de pobreza del municipio/nivel de pobreza del departamento.	Ficha 18
POBLACIÓN BENEFICIADA NORMALIZADA	Promedio de la normalización de la población de cada municipio origen destino para cada vía	Ficha 18
DOTACIÓN	Número de centros educativos, plazas de mercado, obras de infraestructura que se encuentren presentes en cada una de las vías	Ficha 28

*Fuente: Metodología Plan Vial Departamental.*

A partir de la evaluación de los indicadores, se obtuvo el orden de priorización de las vías de la provincia que se muestra en la Figura 2-9.

**Figura 2-9** Mapa priorización de vías departamentales en la provincia de Valderrama.



Fuente: (TOVAR & SILVA-BALAGUERA, 2017).

Para llevar a cabo dicha priorización, se recomienda a la entidad interesada, identificar los parámetros de acuerdo a sus propios intereses, ya que la metodología anteriormente planteada, contempla intereses nacionales y particulares del departamento de Boyacá, de acuerdo al sistema y organización de fichas establecidas por la gobernación.

### 2.2.2.2 Evaluación técnica del pavimento

El informe del contrato de consultoría número 40 de 2013, desarrollado por el INVIAS, presenta una evaluación completa de la Ruta 64, entre los municipios de Belén-Socha y Sácama. Estableciéndose como punto de comparación, se realiza la evaluación comparativa de los resultados obtenidos en él, para el tramo comprendido entre el municipio de Paz del Río atravesando el municipio de Socha, PR25+000 hasta PR42+000 (vía en pavimento asfáltico) de la Ruta 64.

Siguiendo la metodología propuesta, inicialmente, se debe evaluar el IS con la metodología visir y finalmente, la deflexión, para establecer el reforzamiento estructural definitivo y los tramos que lo requieran. De esta forma, los métodos estadísticos usados para una selección objetiva de tramos y puntos críticos son:

### 2.2.2.2.1 Sectorización de tramos

Las intervenciones a realizar en un pavimento requieren de una adecuada sectorización que permita mejoras económicas en intervenciones globales, y no específicamente localizadas. Para ello, la guía de rehabilitación recomienda una sectorización objetiva en su Anexo E, mediante la metodología de diferencias acumuladas propuesta en el apéndice J en la guía de la AASHTO en 1993 (Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías, 2008), en la que se seleccionan tramos estadísticamente homogéneos o de similar comportamiento.

El método consiste en identificar variaciones de pendiente con respecto a los valores del parámetro a evaluar, la cual se relaciona con la totalidad de datos y se observa específicamente con el cambio de signo en la pendiente. La Figura 2-10, presenta el ejemplo de la sectorización en la evaluación del índice superficial (Is) de la Ruta 64.

**Figura 2-10** Unidades homogéneas índice superficial Ruta 64



Fuente: Autores.

En la Figura 2-10., se identifican claramente los tramos que se presentan para el índice superficial del pavimento evaluado en la Ruta 64, detallados en la Tabla 2-5.

**Tabla 2-5 Tramos seleccionados índice superficial Ruta 64**

Tramo	Abscisa inicial	Abscisa fin	Longitud	IS promedio	Desviación estándar
1.000	PR25+000	PR30+2000	5.2	3.327	0.834
2.000	PR30+200	PR38+200	8	1.538	1.102
3.000	PR38+200	PR40+100	1.9	3.895	0.567
4.000	PR40+100	PR42+000	1.9	1.368	1.116

*Fuente: Autores.*

Para la determinación de un valor representativo, se recomienda identificar un nivel de confiabilidad para los datos, debido a que se espera un comportamiento estadístico normal en la muestra de los datos del pavimento, se puede realizar mediante la siguiente ecuación:

$$X_{rep} = \bar{X} + Z * S, \text{ Donde: } (3)$$

Xrep= Valor representativo

Z= Coeficiente de confiabilidad

S= Desviación estándar

**Tabla 2-6 Nivel de confianza y coeficiente de confiabilidad**

Nivel de confianza (%)	Coeficiente de Confiabilidad Z
99	2.58
98	2.33
97	2.17
96	2.05
95	1.96
90	1.65
80	1.28
50	0.67

*Fuente: (Borja, 2012)*

Para el proyecto se recomienda un nivel de confianza del 90%, considerando intervenciones específicas en los puntos críticos que sobrepasen este valor.

**Tabla 2-7 Tramos seleccionados índice superficial Ruta 64**

Tramo	Abscisa inicial	Abscisa fin	Xrep
1.000	PR25+000	PR30+200	4.7
2.000	PR30+200	PR38+200	3.35
3.000	PR38+200	PR40+100	4.83
4.000	PR40+100	PR42+000	3.21

Fuente: Autores

#### 2.2.2.2.2 Puntos críticos o valores extremos

De igual forma, para cada tramo, se deben identificar puntos con condiciones externas que sobrepasen la media de los datos, más la desviación estándar. Para realizar esta evaluación, se recomienda la ecuación 7.1., obtenida del método de Pep-Grubbs, uso específico para detectar puntos externos en una distribución normal (Ribeiro, Augusto, & Andrade, Joyce Costa, 2011).

$$T_{critico} = \frac{X_i - \bar{X}}{S}, \text{ Donde: } (4)$$

Tcritico= Ponderación numérica

Xi= Dato de referencia

$\bar{X}$ = Media aritmética de los datos

S= Desviación estándar

De esta forma, los valores que entreguen un Tcrítico superior al 1.65 (coeficiente de confiabilidad), según el valor especificado por el encargado de la gestión de pavimentos, se debe evaluar específicamente. Se recomienda identificar prioritariamente los valores por encima de 1.65, debido a que los valores menores pueden llegar a la misma o mejor condición de la que se encontraba el pavimento con la intervención escogida, mientras que, para la condición crítica, es necesario detallarlos específicamente. De igual forma, cuando se presenten valores consecutivos en buen estado o menores de -1.65, se puede establecer la no intervención de ese tramo debido a su buen estado.

De la evaluación del índice superficial para la Ruta 64, se obtienen los puntos en la Tabla 8, puntos en condición de buen estado o crítico, comparado con el tramo de referencia. Para realizar una validación se realiza visita de campo al tramo y a las unidades específicas consideradas por esta evaluación, evaluación base desarrollada a finales de 2014.

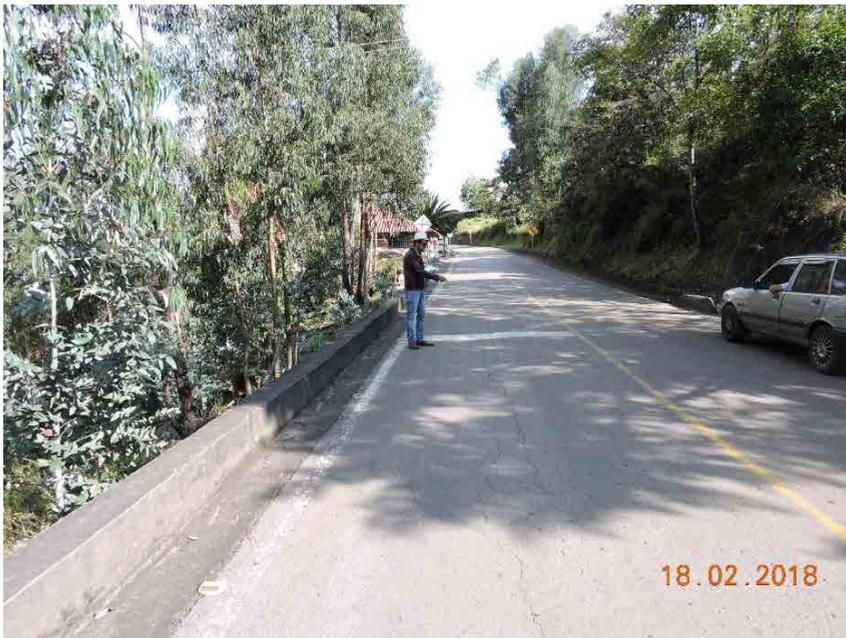
**Tabla 2-8 Puntos extremos para el tramo evaluado Is Ruta 64**

Abscisa	Índice superficial	Tramo	Evaluación
PR31+000	4.00	2	Crítico
PR31+400	4.00	2	Crítico
PR32+900	4.00	2	Crítico
PR39+000	3.00	3	Buen estado
PR39+600	5.00	3	Crítico
PR40+100	2.00	3	Buen estado

*Fuente: Autores.*

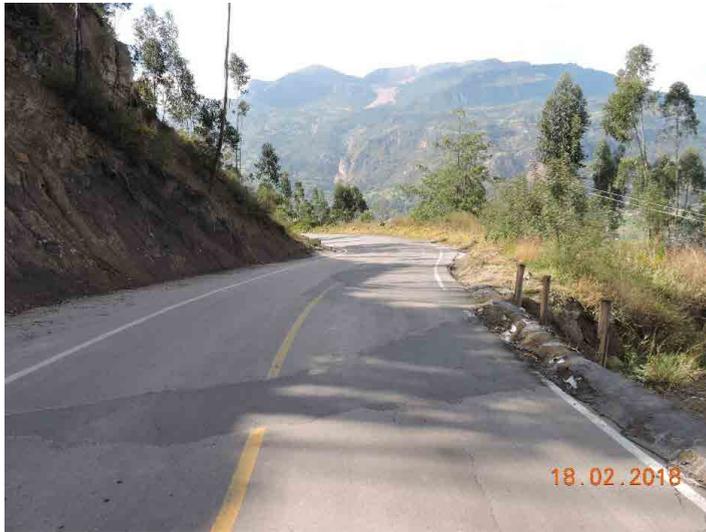
Sí, se entiende que la afectación vial aumenta anualmente en el pavimento flexible y que la metodología de daños evalúa tramos de la red, se observa en la evaluación desarrollada (febrero de 2018), un aumento en el deterioro superficial de forma puntual, aunque no muy alejado del valor encontrado para el año 2014, evidencia registrada por las siguientes fotografías.

**Figura 2-11** PR31+000– Daño puntual debido a inestabilidad (Muro de contención)



*Fuente: Autores.*

**Figura 2-12** PR32+900 – Altas deformaciones en el pavimento



*Fuente: Autores.*

Como se observa en la anterior figura, el PR32+00, presenta ahuellamiento, fisuras longitudinales y transversales, depresiones del pavimento importantes mejoradas en algunos tramos con parcheo. Así mismo, se observa debilidad estructural en todo el tramo mediante fisuras en media luna constantes en el carril izquierdo sentido Paz del Río – Socha.

**Figura 2-13** Abscisa PR40+100 – Estado del tramo bueno, no presenta daños relevantes



*Fuente: Autores.*

Habiéndose validado la información representada por el estado superficial del pavimento, se procede a hacer la sectorización por cada uno de los factores a evaluar en el presente proyecto.

### 2.2.2.2.3 Sectorización de tramos por parámetro para la Ruta 64

- IRI, el índice de regularidad internacional no fue evaluado en el presente proyecto.
- Condición de la subrasante, la evaluación del CBR en campo, fue desarrollada por la metodología del PDC (Penetrómetro dinámico de cono). La subrasante presenta un comportamiento de CBR estadísticamente normal en 4 tramos, observado que:

**Tabla 2-9 Tramos seleccionados CBR**

Tramo	Abs. inicial	Abs. final
1	PR25+000	PR27+300
2	PR27+300	PR30+000
3	PR30+000	PR36+500
4	PR36+500	PR42+000

*Fuente: Autores.*

**Tabla 2-10 Puntos extremos para el tramo evaluado Deflexión Ruta 64**

Abscisa	CBR (%)	Tramo	Evaluación
PR36+750	40	4	Buen estado
PR37+000	5	4	crítico
PR38+000	40	4	Buen estado

*Fuente: Autores.*

- El tramo 1, presenta un buen CBR con 27 % en promedio, aunque muestra dos puntos críticos en el PR26+300 y PR27+300 con 10%, y uno regular en el PR25+600 del 15%, estableciéndose una desviación del 13%.
- El tramo 2 el CBR es de 20%, sin ninguna variación de datos.
- El tramo 3 presenta una buena condición con 40% de CBR entre los PR30+500 hasta el PR33+250. Tiene una zona crítica con 15% de CBR del PR33+500 hasta el PR33+750. El promedio del tramo es de 28% con desviación del 10.7%.
- El tramo 4 presenta el CBR más crítico de todo el pavimento con 5% en el PR37+000, de igual PR41+500 es crítico con 10%. El promedio

del tramo es de 18% con desviación del 8% y se presentan las mejores condiciones en el PR36+750 con CBR de 40% y en el PR38+000 con CBR de 40%. El estado más crítico del tramo evaluado es el PR37+000, que cuenta con un CBR de 5%.

- Deflexión, la deflexión como parámetro de capacidad estructural, se midió mediante el cuenco de deflexión obtenido por el método análogo y de carga estática (viga benkelman), con un vehículo C2 (volqueta sencilla). La medida se desarrolló en el carril izquierdo y derecho del tramo evaluado. Para el análisis metodológico aquí presentado, se tomará en cuenta la deflexión más crítica de los dos carriles evaluados (selección de carril de diseño), presentada debajo de la rueda externa (Do – deflexión crítica por las repeticiones de carga).

La deflexión se comporta estadísticamente normal, con desviación estándar promedio de 0.14 mm.

**Tabla 2-11 Tramos seleccionados Deflexión**

Tramo	Abscisa inicial	Abscisa fin
1	PR25+000	PR31+000
2	PR31+000	PR37+800
3	PR37+800	PR40+300
4	PR40+300	PR42+000

*Fuente: Autores.*

- El tramo 1, presenta una deflexión alta con 1.268 mm y desviación estándar de 0.14 mm. El PR 27+300 muestra el punto más crítico con una deflexión de 1.540 mm. El PR30+800 con 1.010 mm y el PR31+000 con 1.010 mm el mejor estado en el tramo según la metodología de GUBBS(Ribeiro et al., 2011).
- El tramo 2, presenta una deflexión promedio de 0.783 mm con desviación estándar de 0.17 mm, presentando cinco puntos altos con valores de 1.09 mm y 1.17 mm.
- El tramo 3, presenta la deflexión más alta del proyecto evaluado con 1.353 mm y desviación estándar de 0.17 mm, evidencia dos puntos con el mejor estado con deflexiones de 0.930 mm y 1.05 mm.
- El tramo 4, presenta un comportamiento constante estadísticamente, con valor de deflexión de 0.686 mm y deflexión estándar de 0.11 mm. Es el tramo con la mejor condición de la deflexión.

**Tabla 2-12 Puntos extremos para el tramo evaluado Deflexión Ruta 64**

Abscisa	Deflexión (mm)	Tramo	Evaluación
PR27+300	1.540	1	Crítico
PR30+800	1.010	1	Bajo
PR31000	1.010	1	Bajo
PR32+300	1.090	2	Alto
PR32+400	1.090	2	Alto
PR32+500	1.170	2	Alto
PR32+600	1.170	2	Alto
PR32+700	1.090	2	Alto
PR40+200	1.050	3	Bajo
PR40+300	0.930	3	Bajo

*Fuente: Autores.*

- Fricción, El presente proyecto no realizo la evaluación de fricción.

#### 2.2.2.2.4 Umbrales de evaluación para cada parámetro

Los umbrales propuestos para cada parámetro evaluado entregan una escala adecuada para el encargado en la gestión de pavimento, y corresponden a las metodologías establecidas para Colombia:

- Is, El índice de deterioro superficial se evalúa en tres rangos de estado como lo detalla la Tabla 2-13

**Tabla 2-13 Umbral índice de deterioro superficial VIZIR**

RANGO	CALIFICACIÓN	DETALLE
1 y 2	Bueno	Limitados fisuramientos y deformaciones, que presentan un buen aspecto general y que, probablemente, no requieran en el momento más que acciones de mantenimiento rutinario.
3 y 4	Regular	Fisuramientos de origen estructural y pocas o ninguna deformación, así como pavimentos sin fisuramientos, pero con deformaciones de alguna importancia. Está lo suficientemente degradado como para poner en marcha tratamientos de rehabilitación de mediana intensidad.

RANGO	CALIFICACIÓN	DETALLE
5,6 y 7	Deficiente	Presentan abundantes fisuramientos y deformaciones de origen estructural, cuyo deficiente estado superficial posiblemente exija la ejecución de trabajos importantes de rehabilitación.

Fuente: (Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías, 2008).

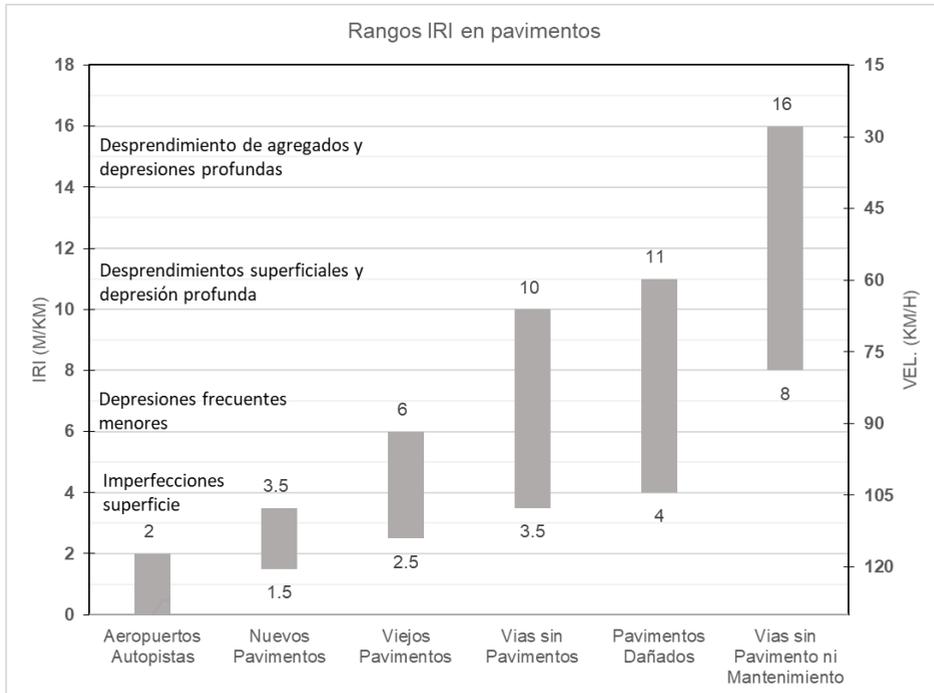
- IRI, Los umbrales de regularidad superficial propuestos por el INVIAS, se muestran en la Tabla 2-14 , los rangos específicos para cada pavimento en la Figura 2-14.

**Tabla 2-14 Niveles de IRI para evaluar la lisura de pavimentos asfálticos de carreteras en servicio**

CLASIFICACIÓN	IRI (m/km)		CONDICIÓN TÍPICA
	TRÁNSITO BAJO NT1	TRÁNSITO MEDIO Y ALTO NT2 Y NT3	
Bueno	< 2.5	< 2.0	Pavimento con gran regularidad superficial; circulación muy cómoda
Aceptable	2.5 – 4.0	2.0 – 3.5	Pavimento algo rugoso; el valor superior es advertido por los usuarios al circular a la velocidad de operación de la vía
Pobre	4.0 - 5.5	3.5 – 5.0	Rugosidad notoria; incomodidad para los conductores de los vehículos pesados
Muy pobre	> 5.5	> 5.0	Pavimento muy rugoso y carente de confort para todos los usuarios

Fuente: (Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías, 2008)

**Figura 2-14** Escala de un pavimento según el IRI



Fuente: (Lavaud, 2011).

- Deflexión, para interpretar los umbrales de la deflexión en un pavimento, es necesario hacer una evaluación estructural, en la que se identifiquen las capas y estableciendo los índices de requerimiento estructural para las cargas que representa el tránsito durante el periodo de diseño. En este caso, el valor admisible que representa la vida de un pavimento es la deflexión, y se obtiene mediante la ecuación planteada por Yang Huang (Carlos Higuera, 2007), que entrega la deflexión vertical admisible en la superficie del pavimento:

$$\Delta_z \text{ adm} = 26.32202 * N^{-0.2438}, \quad (5)$$

Donde:

$\Delta_z \text{ adm}$ = Deflexión vertical en la superficie de la estructura admisible, mm

N= Número de ejes equivalentes de 8.2 ton cd pd

Según el estudio de tránsito y proyección presentada, se espera un paso de 578,264 de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño, en el

periodo de diseño. Para el presente proyecto la deflexión admisible para el año 2024 será de:

$$\Delta_{z adm} = 26.32202 * 578264^{-0.2438} = 1.036 \text{ mm}$$

IFI, para Colombia, los umbrales de deslizamientos se presentan según el tipo de tránsito para vías en pavimento nuevo flexible. De igual forma, no se recomienda un índice inferior a 0.35 (Leiva, 2005), debido a la inseguridad que ofrece.

**Tabla 2-15 Umbral de deslizamiento para pavimento nuevo flexible**

TIPO DE SECCIÓN	COEFICIENTE MÍNIMO DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO		
	NT1	NT2	NT3
Glorietas; curvas con radios menores de 200 metros; pendientes mayores o iguales a 5% en longitudes de 100 metros o más; zonas de frenado frecuente	0.50	0.55	0.60
Otras secciones	0.45	0.50	0.50

*Fuente: (Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías, 2008).*

Sin embargo, según estudios realizados en Reino Unido, el nivel de deslizamiento mínimo debe analizarse para diferentes casos en la red vial, como se presentan en la siguiente tabla (Transportation Research Board of The National Academies, 2009).

**Tabla 2-16 Lugares y niveles encontrados para Reino Unido**

Cat. del sitio	Definición	Nivel encontrado para 50 km/hr							
		0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65
A	Autopista								
B	Doble calzada sin evento								
C	Calzada única sin evento								
Q	Cercanías y cruces en enlaces menores y mayores, cercanía a glorietas								
K	Cercanía a paso peatonales y otras situaciones de alto riesgo								
R	Glorieta								
G1	Inclinación 5 a 10% más larga que 50 m.								
G2	Inclinación > 10% más larga que 50 m								
S1	Radio de curvatura <500 m - Calzada única								
S2	Radio de curvatura <500 m - Doble calzada								

Fuente: (VINER, SINHAL, & PARRY, 2004)

#### 2.2.2.2.5 Análisis espacial de los datos

La sectorización espacial permite al ingeniero a cargo, realizar una adecuada intervención en campo, homogenizando el tratamiento o recuperación del pavimento.

Inicialmente, se debe realizar la organización de la información en tablas de Excel, facilítenlas cuales facilitan su ingreso al software ArcGIS. De igual forma, la definición del alineamiento del tramo evaluado se lleva a cabo, a partir del levantamiento topográfico, desde el que se inicia el procesamiento, inclusión e información mediante las herramientas de Linear Referencing.

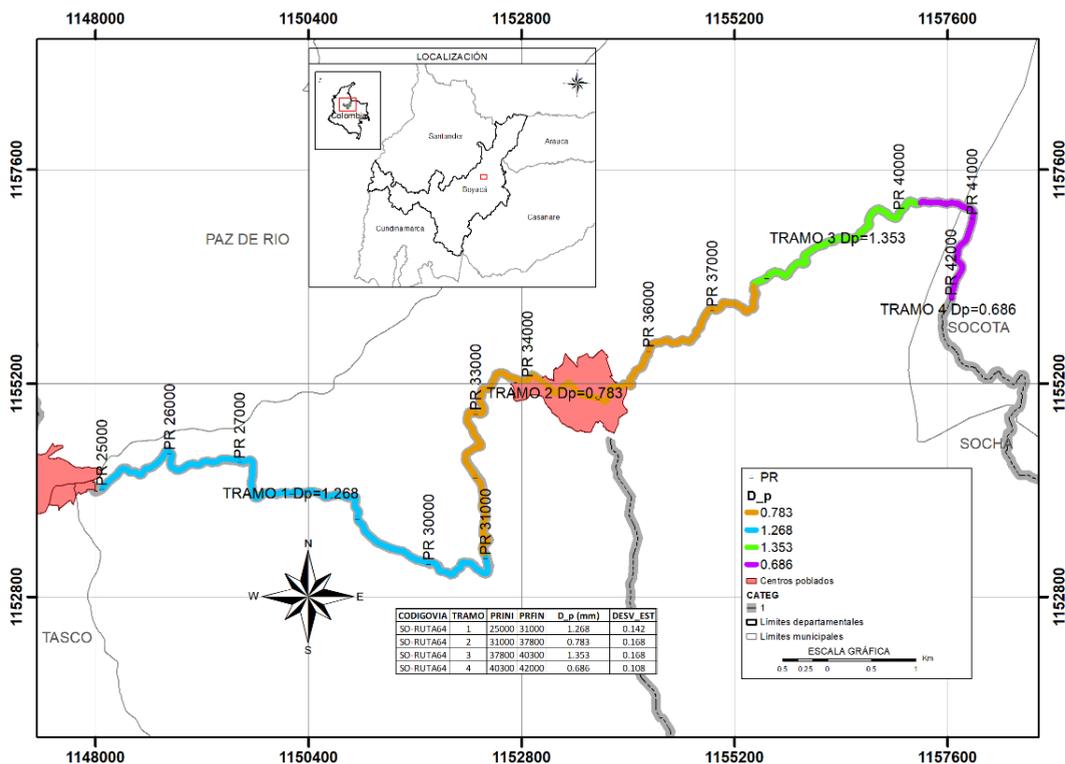
Mediante la herramienta *Calibrate Routes* o *Create Routes*, se adecua el alineamiento para el procesamiento de información, que se desarrolla inicialmente para cada parámetro mediante la herramienta *Make Route Event Layer*, en forma lineal, es decir, dar los valores de cada parámetro en cada tramo estadísticamente establecido.

Finalmente, mediante la herramienta *Overlay Route Event* (requiere el manejo de información en forma de tabla - ingresada en ArcGIS), se establece la

interrelación de parámetros para la selección de los tramos finales, o los que definirán las intervenciones a realizar.

La información anteriormente mencionada, debe ser ingresada a la geodatabase, y se procede a realizar un análisis individual por cada tramo seleccionado según la metodología planteada.

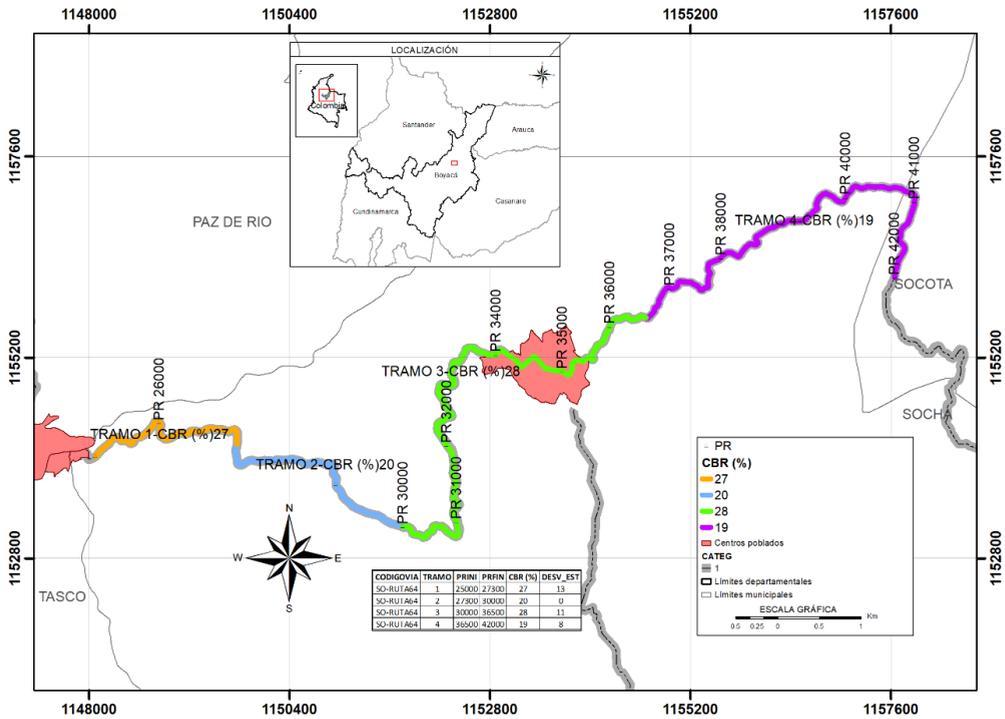
Figura 2-15 Mapa sectorización de tramos - Deflexión



Fuente: Autores.

La deflexión, ya que la máxima permitida en los 10 años de diseño, debe ser 1.036 mm, se presenta en una necesidad de intervención estructural. El tramo 4, presenta una deflexión en buena condición, similar al tramo 3. Los tramos que requieren intervención urgente son el número 1 y el número 3.

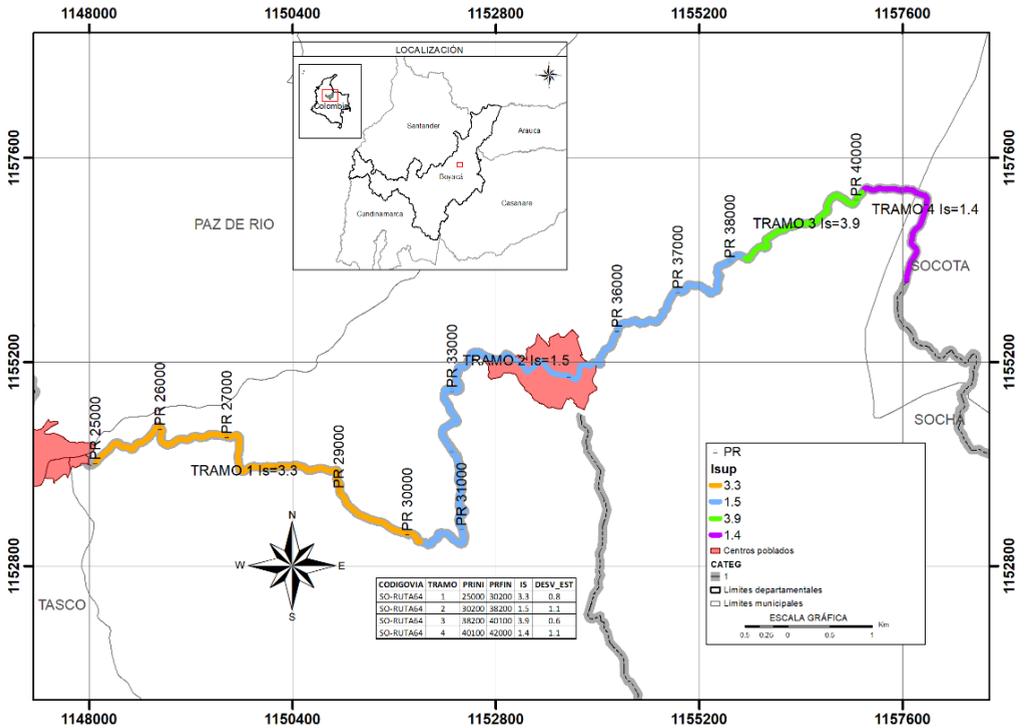
**Figura 2-16** Mapa sectorización de tramos - CBR



Fuente: Autores.

La condición de subrasante, presenta cuatro tramos, el tramo 1 y 3 presentan un CBR similar, al igual que el tramo 2 y 4. Es importante observar que se presentan condiciones adecuadas con CBR de una regular resistencia.

Figura 2-17 Mapa sectorización de tramos - Índice Superficial



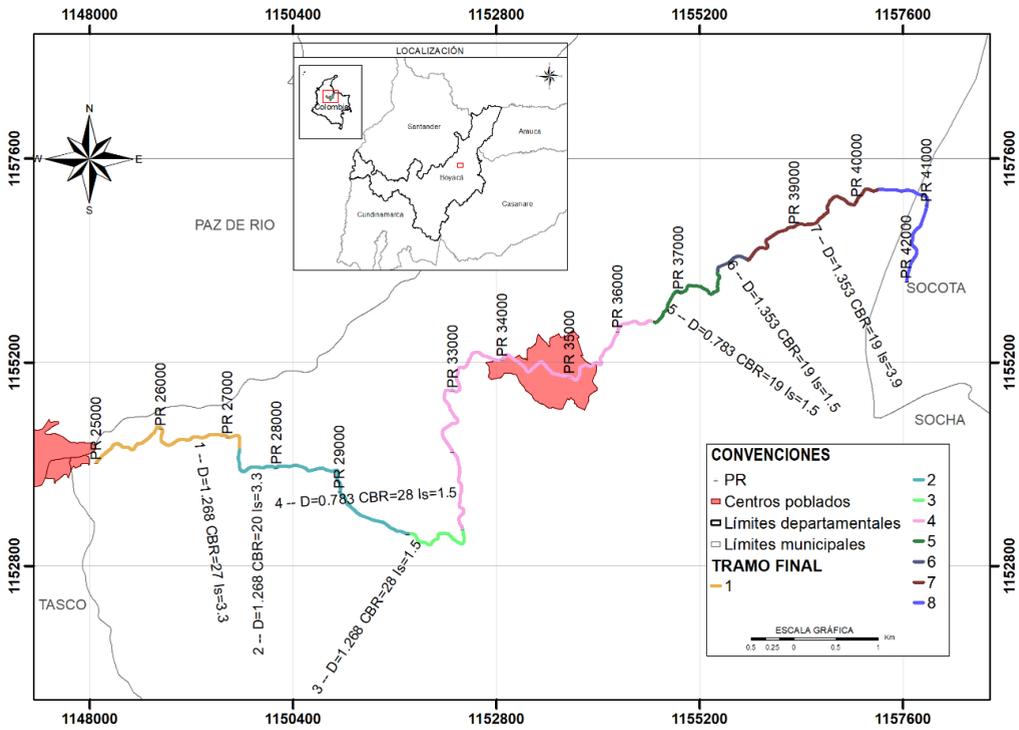
Fuente: Autores.

El tramo número 2 y 4, presenta un estado o condición buena, con un índice superficial inferior a 2. El tramo 1 y 3 se observan Is cercanos a 4.

Se puede apreciar, que la metodología planteada se sustenta como lógica, debido a que los tramos considerados en buen estado por el Is de la metodología VIZIR, contiene deflexiones del pavimento adecuadas, lo que demuestra que, en este caso, la necesidad de rehabilitación no es necesaria. El anterior resultado, concuerda con la metodología, que, para tramos regulares y malos, se les debe analizar estructuralmente o mediante la deflexión.

En la evaluación global o tramos finales, se establece que las unidades homogéneas, en este caso, serán representadas en forma jerárquica por la condición estructural del pavimento (Deflexión), el estado de la subrasante (CBR) y finalmente por el estado funcional (Is).

Figura 2-18 Mapa sectorización de tramos total



Fuente: Autores.

Tabla 2-17 Tramos finales de intervención, de acuerdo a análisis espacial.

TRAMO	ABSINI	ABSFIN	Is <sub>sup</sub>	DES <sub>V_EST</sub> - Is	D <sub>p</sub>	DES <sub>V_EST</sub> - D	CBR	DES <sub>V_EST</sub> - CBR
1	PR25+000	PR27+300	3.3	0.8	1.268	0.142	27	13
2	PR27+300	PR30+000	3.3	0.8	1.268	0.142	20	0
3	PR30+000	PR31+000	1.5	0.8	1.268	0.142	28	11
4	PR31+000	PR36+500	1.5	1.1	0.783	0.168	28	11
5	PR36+500	PR37+800	1.5	1.1	0.783	0.168	19	8
6	PR37+800	PR38+200	1.5	1.1	1.353	0.168	19	8
7	PR38+200	PR40+300	3.9	0.6	1.353	0.168	19	8
8	PR40+300	PR42+000	1.4	1.1	0.686	0.108	19	8

Fuente: Autores.

### 2.2.2.2.6 Intervenciones propuestas

Para la selección de intervenciones, inicialmente, se debe identificar el tipo general de intervención que requiere el pavimento detallado en la Tabla 18; selección realizada con el análisis espacial. La intervención específica puede seleccionarse según la Tabla 19, donde se presentan las intervenciones puntuales por daño, presente en la superficie de pavimento flexible. La selección de intervención específica está muy ligada al levantamiento de daños, en este proyecto evaluado con la metodología VIZIR, es necesario retomar la información para los tramos seleccionados de diseño e interpretar cada daño con su posible solución, como no se presenta en el informe únicamente se establecerá la intervención general.

**Tabla 2-18. Costo probable según la intervención del pavimento**

PCI	INTERVENCIONES	COSTO (\$ US)
100-70	Preservación	0.2 hasta 1.25
70-50	Refuerzo	1.75 hasta 2.50
50-25	Rehabilitación	3 hasta 5
0-25	Reconstrucción	3 hasta 5

*Fuente: (Los Angeles County, 2017).*

Para los tramos evaluados, se debe detallar en cada tramo de intervención el daño con mayor presencia, así mismo, es necesario seleccionar dicha intervención con predominio por mejorar el daño más grave presente del pavimento de acuerdo a la siguiente tabla.

**Tabla 2-19 Matriz de decisión para el mantenimiento de pavimento flexible**

Daños pavimento flexible	Bajo		Moderado		Alto	
	Ocasi.	Frecu.	Ocasional	Frecuente	Ocasional	Frecuente
Piel de cocodrilo**	3, 1	3, 6	6, 3, 11, 4	6, 5	13, 6, 11	15, 13
Grieta de borde	1, 2	2, 1	2, 13	2, 13	13	13
Grieta longitudinal	2, 1	2, 6, 1	2, 6	2, 6	13, 2, 6	6, 2, 13
Aleatorio/Grieta en bloque	2, 1	2, 3	2, 6	2, 6	6, 11, 12	12, 6, 14
Descascaramiento/Envejecimiento	3, 1, 6	3, 6, 5	6, 7	6, 7	6, 11, 5	6, 12, 11
Deformación	1, 8, 13	13, 1, 8	8, 13, 6, 2	8, 13, 6, 2	8, 11, 6, 13	8, 14, 13
Ahuellamiento	1	1	8 + 6	8 + 6	8 + 6, 12	8, 14, 13
Exceso de asfalto	1	1, 6	6, 1, 8	6, 8	8 + 6	8 + 6 or 12***
Grieta transversal	2, 1	2	2, 6	2, 6	2, 6	2, 6, 13

**Tratamientos de pavimento:** 1) No hacer nada; 2) Sello / Relleno de fisuras; 3) Sello de riego negro; 4) Sello de arena-asfalto; 5) Lechada asfáltica; 6) Capa de sellado; 7) Tratamiento superficial; 8) Fresado; 9) Reciclaje en frío en el lugar; 10) Reciclaje en caliente en el lugar; 11) Superposición fina de mezcla fría; 12) Superposición fina de mezcla caliente; 13) Parcheo; 14) Superposición gruesa; 15) Reconstrucción Total. \*De acuerdo con las recomendaciones de los ocho Superintendentes de Mantenimiento del Distrito y la División de Materiales e Investigación. \*\*Cabe de posibilidad de ineficiencias en los tratamientos que no sean 13, 14 y 15 serán mínimas y de corta duración. \*\*\*Los proyectos del programa de extensión de pavimento son típicamente de 2 pulgadas de grosor y se consideran el grosor máximo de este tratamiento.

Fuente: (M. Johanns and J. Craig, 2002).

- Intervención para preservación, el tramo 4 y 5, tienen un comportamiento favorable con buenas condiciones en subrasante (CBR), y estado superficial (Is) desde el PR31+000 hasta el PR37+800, la deflexión promedio crítica es establecida por la deflexión media, más la desviación estándar, para dichos tramos 0.783 mm más 0.168 mm, lo que establece una deflexión total crítica en los tramos de 0.951 mm. Realizando una comparación con la deflexión admisible 1.036 mm, se presenta una reserva del 8.2% que, aunque es baja cumple con la resistencia solicitada por las cargas. Para estos tramos se espera una intervención alta de preservación.

Los daños presentes en el tramo son fisuras longitudinales, fisuras transversales, fisuras en el borde y piel de cocodrilo. El daño de mayor frecuencia es la fisura longitudinal, el caso más crítico, es la piel de cocodrilo en zonas puntuales. Teniendo en cuenta que el mantenimiento requerido no supera el 15% de daño en área, es de sellado de fisuras con la contemplación de una posible capa de sellado.

De igual forma, el tramo número 8, que comprende del PR40+300 hasta el PR42+000, presenta condiciones apropiadas en subrasante (CBR), estado

superficial (Is) y deflexión. La deflexión cuenta con una reserva del 23%. Es el tramo con mejor estado del proyecto evaluado, y seguramente requerirá valores bajos de preservación.

Los daños presentes en el tramo, corresponden a fisuras longitudinales y piel de cocodrilo. El daño de mayor frecuencia es la fisura longitudinal, el caso más crítico es la piel de cocodrilo, en una zona puntual. El mantenimiento requerido ya que no supera el 10% de daño en área, es de sellado de fisuras.

- Intervención para rehabilitación, para los tramos con un estado crítico se requiere establecer una nueva estructura de pavimento, la recomendación es que se desarrolle mediante el método mecanicista (mecánica de pavimentos). La mecánica de pavimentos considera las propiedades de los materiales a partir del modelo de retro cálculo, identificando la estructura del pavimento actual y desarrollando su evaluación mediante los controles de fatiga, ahuellamiento y deflexión.

Para el presente proyecto, no se puede realizar la modelación estructural debido a que la medición es mediante viga benkelman. Por tal motivo, la selección de rehabilitación será desarrollada de acuerdo al propuesto por los tramos en esta condición se visualizan en la siguiente tabla:

**Tabla 2-20 Tramos para rehabilitación.**

TRAMO	ABSINI	ABSFIN	I <sub>sup</sub>	DESV_ EST_Is	D <sub>p</sub>	DESV_ EST_D	CBR	DESV_ EST_CBR
1	PR25+000	PR27+300	3.3	0.8	1.268	0.142	27	13
2	PR27+300	PR30+000	3.3	0.8	1.268	0.142	20	0
3	PR30+000	PR31+000	1.5	0.8	1.268	0.142	28	11
6	PR37+800	PR38+200	1.5	1.1	1.353	0.168	19	8
7	PR38+200	PR40+300	3.9	0.6	1.353	0.168	19	8

*Fuente: Autores.*

Los tramos 1, 2 y 3, comprenden desde el PR25+000 hasta el PR31+000, a pesar de tener cambios en el CBR, presentan una condición crítica de la deflexión del pavimento y se pueden prever como la primera estructura.

Los tramos 6 y 7, se presentan del PR37+800 hasta el PR40+300 con condición de CBR regular y crítica, respecto a la deflexión, esta combinación de tramos será la segunda estructura.

Es claro que el comportamiento de los materiales de subrasante alcanza valores altos, por lo que se realizó la revisión de la obtención del CBR, verificando que el valor obtenido por el método de campo del PD. Bajo esta afirmación, se detalló cada apique para identificar los valores de la evaluación del CBR en laboratorio, con muestra inalterada para los diferentes sectores:

**Tabla 2-21 Tramos CBR muestra inalterada.**

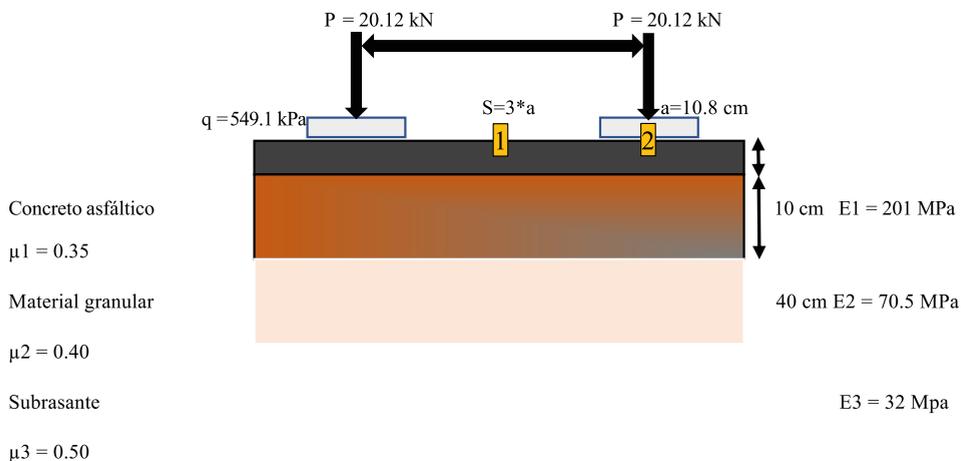
TRAMO	ABSINI	ABSFIN	CBR	DESV_ EST_CBR	CBR DE DISEÑO
1-3	PR25+000	PR31+000	4.8	1.6	3.2
6-7	PR37+800	PR40+300	6.1	0.1	6

*Fuente: Autores.*

Mediante el modelo de retro cálculo con la deflexión obtenida en el centro y a 25 cm, se realiza una modelación iterativa que permite establecer los módulos de las capas presentes en el pavimento. Inicialmente, se debe contar con el tamaño de la estructura en este caso 10 cm de asfalto y 40 cm de material granular para todo el proyecto (estructura de acuerdo al estudio geotécnico). El modelo se realiza en el software BISAR 3.0, que se encuentra definido por el método SHELL.

- Primera estructura, la deflexión crítica es de 1.410 mm en el centro de la carga para el carril izquierdo, a 25 cm de la aplicación de la carga la deflexión presentada es de 0.645 mm. El módulo elástico de la mezcla asfáltica corresponde a una resistencia media (201 MPa), y el módulo resiliente de la subrasante es de 32 Mpa de acuerdo a la correlación de 10 veces el CBR propuesta por Wiseman et al (1977). Mediante la modelación e interacción en el software se entrega la siguiente estructura:

Figura 2-19. Modelación 1 estructura de pavimento 1.



1. Deflexión medida viga Benkelman
2. Deflexión máxima en la estructura de pavimento

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-22. Resultados modelación 1.

Punto	Def (mm)	Desfase	Def (mm)
1	1.409	25 cm	0.92
2	1.648	N/A	N/A

Fuente: Autores

Para efectos de comparación, se realiza la modificación del módulo, en la carpeta asfáltica y la subrasante, acercándose al comportamiento de la deflexión medida en campo para 25 cm.

Tabla 2-23. Modelación 2 estructura de pavimento 1.

Capa	Nombre	Espesor(cm)	E (Mpa)	$\mu$
CA	Carpeta Asfáltica	10	137	0.35
MG	Material Granular	40	59.5	0.40
SBR	Subrasante	N/A	40	0.50

Fuente: Autores

**Tabla 2-24. Resultados modelación 2.**

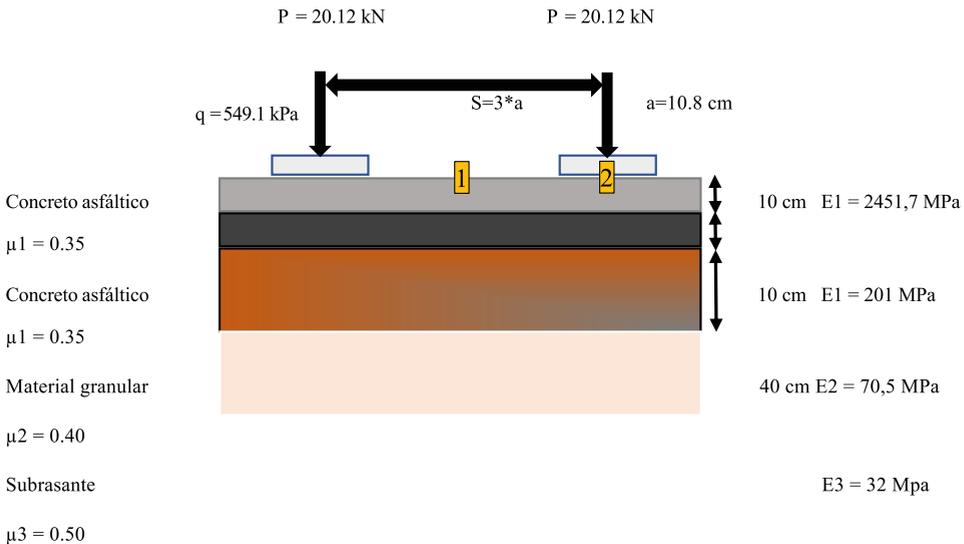
Punto	Def (mm)	Desfase	Def (mm)
1	1.411	25 cm	0.832
2	1.772	N/A	N/A

Fuente: Autores.

Como se observa, el comportamiento de la deflexión en el centro y a 25 cm, no es exacto al obtenido en campo, sin embargo, el mayor acercamiento lo presenta el segundo modelo. El modelo número 1., presenta valores de resistencia más adecuados a lo esperado para cada material encontrado en campo, razón por la cual se da mayor validez; este modelo presenta una deflexión máxima de 1.648 mm bajo la llanta.

Para el modelo número 1, se propone una rehabilitación de una mezcla asfáltica con módulo elástico de 2451,7 Mpa (25000 km/cm<sup>2</sup>) de 10 cm de espesor.

Figura 2-20. Rehabilitación propuesta PR25+000 hasta PR31+000



1. Deflexión medida viga Benkelman
2. Deflexión máxima en la estructura de pavimento

Fuente: Autores.

**Tabla 2-25. Resultados Rehabilitación.**

Punto	Def (mm)	Desfase	Def (mm)
1	0.948	25 cm	0.772
2	0,935	N/A	N/A

*Fuente: Autores.*

De acuerdo a la solicitud de deflexión de 1.036 mm, para el tránsito establecido, se observa que la rehabilitación propuesta ofrece una reserva del 8.5 % con 0.948 mm de deflexión máxima.

- **Segunda estructura**, la deflexión crítica es de 1.521 mm, en el centro de la carga para el carril izquierdo, a 25 cm de la aplicación de la carga la deflexión presentada es de 0.726 mm. El módulo elástico de la mezcla asfáltica corresponde a una resistencia baja (137 MPa) y el módulo resiliente de la subrasante es de 60 Mpa de acuerdo al CBR.

**Tabla 2-26. Modelación 2 estructura de pavimento 1.**

Capa	Nombre	Espesor(cm)	E (Mpa)	$\mu$
CA	Carpeta Asfáltica	10	137	0.35
MG	Material Granular	40	40.3	0.40
SBR	Subrasante	N/A	60	0.50

*Fuente: Autores.*

**Tabla 2-27. Resultados modelación 2.**

Punto	Def (mm)	Desfase	Def (mm)
1	1.522	25 cm	0.756
2	1.890	N/A	N/A

*Fuente: Autores.*

De acuerdo a lo presentado, el comportamiento de la deflexión en el centro y a 25 cm es similar a la obtenida en campo. El modelo muestra una deflexión máxima de 1.890 mm bajo la llanta. Para una solución adecuada y de igual forma, similar al anterior proceso, se propone una rehabilitación de una mezcla

asfáltica con módulo elástico de 2451,7 Mpa (25000 km/cm<sup>2</sup>) de 10 cm de espesor.

**Tabla 2-28. Rehabilitación propuesta PR37+800 hasta PR40+300**

Capa	Nombre	Espesor(cm)	E (Mpa)	$\mu$
CA	Carpeta Asfáltica	10	2451.7	0.35
CA	Carpeta Asfáltica	10	137	0.35
MG	Material Granular	40	40.3	0.40
SBR	Subrasante	N/A	60	0.50

*Fuente: Autores.*

**Tabla 2-29. Resultados modelación 1.**

Punto	Def (mm)	Desfase	Def (mm)
1	0.894	25 cm	0.680
2	0.871	N/A	N/A

*Fuente: Autores.*

De acuerdo a la solicitud de deflexión de 1.036 mm para el tránsito propuesto, se observa que la rehabilitación planteada ofrece una reserva del 13.7 % con 0.894 mm de deflexión máxima.

## 2.3 Discusión

La metodología basada en análisis espacial para la gestión de pavimento flexible establecida, involucra información secundaria (tránsito, geotecnia, informes de obra, cartografías, auscultaciones y deflexión) y primaria (georreferenciación y auscultación), en la selección de intervenciones viales de forma adecuada y confiable.

Los resultados, en cuanto a intervención, presentados por la metodología propuesta, no difieren con respecto a los obtenidos en la evaluación desarrollada por el INVAS. Los principales aportes se generan en la organización y presentación de la información, sectorizando los diferentes parámetros (Índice superficial, CBR y Deflexión), es decir, una nueva forma de interpretación de la información actual del pavimento.

La gestión de pavimentos mediante sistemas de información geográfica, permite integrar análisis estadísticos, facilita la identificación de puntos críticos, reduce tiempos de evaluación y los costos de inversión, evita la subjetividad e identifica fallas en la construcción.

La aplicación de metodologías estadísticas para la selección de tramos e identificación de puntos críticos, son de útil aplicación al encargado de la gestión de pavimentos, ya que, aumenta la objetividad en la selección de intervenciones finales para los tramos viales. En la evaluación de la infraestructura vial se requiere identificar de forma obligatoria los puntos críticos asociados al drenaje (obras de arte, cunetas, bombeos, etc.), geología (fallas, materiales, etc.) y geotecnia (taludes, licuefacción, etc.), puntos que se deben intervenir previamente al mantenimiento específico de la estructura de pavimento.

La recolección de la información que se realiza mediante una base de datos espaciales, lleva a una reducción en tiempos de evaluación y facilidad de acceso en procesos futuros. El manejo de dicha información mediante SIG, permite una evaluación del pavimento de manera histórica y zonificada.

Se ha verificado en diferentes investigaciones que una gestión de pavimentos adecuada a la red vial, reduce el costo en 2 o hasta 3 veces del valor de reconstrucción del pavimento, además de que facilita contar con una mejor condición del pavimento respecto a la obtenida bajo una rehabilitación; evidenciado finalmente en el aumento de la vida del pavimento.

Cuando los parámetros de evaluación de la estructura (auscultación y deflexión), resultan en mal estado, se debe analizar únicamente su rehabilitación o reconstrucción, ya que, al mejorar su condición se optimizaría directamente la condición funcional (regularidad y fricción). De esta forma, no habrá sobrecostos por recolección de información innecesaria.

Es recomendable tener el adecuado equipo y personal en la instalación de los materiales que conforman la estructura de pavimento, debido al alto impacto que ello representa en la resistencia y comportamiento del pavimento (Dungana, Dubjur, Choden, Dorji, & Dema, 2016). Así mismo, seleccionar intervenciones con materiales que permitan una mayor durabilidad.

Teniendo en cuenta que las entidades nacionales han adoptado parámetros de aplicabilidad importante a nivel internacional como IRI, IFI y deflexión; se recomienda propender en la evaluación superficial del pavimento por el

PCI, que ha sido estudiado en varios países y detalla de manera importante el estado de los daños del pavimento con su respectivo mantenimiento.

Finalmente, es importante crear una cultura de la conservación vial a través de las universidades, centros de investigación y entidades territoriales, ya que una carretera adecuadamente conservada, garantiza crecimiento y desarrollo de la economía, nacional, regional y local (Armas, 2012). Así mismo, se requiere, que las entidades territoriales inicien con la recolección y estandarización de información (geodatabase) para establecer un SGP basado en SIG, que permita mejorar el estado de la infraestructura vial a cargo. En su fase inicial a nivel de red se recomiendan los parámetros como IRI o PCI, que históricamente revelen el comportamiento del pavimento.

## 2.4 Conclusiones y recomendaciones

- El SIG aplicado en un SGP, demuestra ser una herramienta de facilidad en acceso, organización geoespacial general y puntual, actualización e interpretación muy útil de la información en presente, pasado y futuro; que finalmente se ve reflejado en las decisiones de intervención y bajo costo para el mantenimiento y durabilidad de los pavimentos.
- La priorización de la red vial, facilita la selección de vías que requieren de evaluación técnica del pavimento, por medio de la selección de ejes estratégicos de acuerdo a indicadores técnicos, conectividad intermodal, impacto social y económico de la región.
- Una metodología reducida en la evaluación del pavimento facilita la selección de intervenciones en los tramos viales de manera más económica y rápida, considerando la importancia de la recolección, organización, verificación, procesamiento y adecuada presentación de la información. Facilita el trabajo del encargado de la gestión de pavimentos.
- A pesar de que la metodología planteada ayuda en la objetividad de intervención, es importante la experiencia del encargado en la selección de alternativas de mantenimiento.
- Los parámetros para la evaluación del estado del pavimento se recomienda desarrollarlos de forma general (red), hasta particular (proyecto), según la siguiente secuencia: IRI, IFI, PCI Y DEFLEXIÓN de acuerdo al nivel que se desee llegar. Las condiciones que siempre deben analizarse son el estado de la subrasante (geotecnia) y el drenaje.
- En la recolección del PCI en campo, puede desarrollarse una mejora importante si se permite que la comunidad comparta información en tiempo real a la base de datos. Las aplicaciones mediante teléfonos móviles, tabletas, internet, etc., facilitan la conexión, siempre que

dicha información sea codificada y verificada por un experto para una alta confiabilidad.

- El cálculo del CBR mediante el PDC, permite una visibilidad de la sectorización de los materiales presentes, pero no puede ser usado en el análisis mecanicista, debido a su alto margen de error. La evaluación de la subrasante mediante el ensayo de CBR de laboratorio de una muestra inalterada, es el procedimiento adecuado para establecer el comportamiento del material.
- El cálculo de los módulos de la estructura del pavimento por retro-cálculo pueden establecerse mediante un cuenco de deflexión más preciso como el entregado por el FWD o deflectómetro de impacto. En el presente proyecto se obtuvieron con base en el ensayo de viga benkelman, que solo puede comparar la deflexión en el centro de las llantas y a 25 cm de esta.
- Para la evaluación de la estructura de pavimento, el método mecanicista establece resultados más acordes a los materiales presentes y las sollicitaciones de cargas generadas por el tránsito.
- El encargado de la red vial debe identificar las posibles afectaciones del suelo a la infraestructura, mediante la geología y geotecnia del sector. Así mismo, se recomienda realizar adecuadamente los estudios, construcción y mantenimiento del drenaje vial.
- Es importante la actualización constante de la base de datos, teniendo en cuenta que la información del proyecto evaluado es del año 2015, y la estructura del pavimento sufre deterioro constantemente, así como, las intervenciones variarán en cada periodo de evaluación.
- Se recomienda la recolección de información histórica o constante para la red vial según la base de datos propuesta, principalmente la información respecto al espesor de las capas y los módulos estructurales de cada capa; ya que dicha información es muy importante para un análisis de la rehabilitación, mediante el método mecanicista. De igual forma, una evaluación histórica permite identificar las principales fallas en la construcción y conservación, así como, la mejora continua en los diferentes procesos que permitan una mayor durabilidad de la estructura del pavimento.



# 3. APLICACIONES SIG EN ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA PARA CIUDADES INTERMEDIAS. CASO TUNJA, BOYACÁ

Jorge Luis Rodríguez González  
Diego Fernando Gualdrón Alfonso

## 3.1 Introducción

Tunja está ubicada en una región de amenaza sísmica intermedia, registra varios eventos sísmicos durante los cuales se han presentado daños significativos en algunas zonas específicas de la ciudad, especialmente, en el centro histórico, que data de los años de 1500 d.C., donde se ubican la sede de la Alcaldía Mayor de Tunja y la gobernación de Boyacá, entre otros principales edificaciones de entidades administrativas, museos, parques, iglesias y monumentos históricos de la época de la colonia, demandando gran concentración de ciudadanos en las horas del día.

El crecimiento urbano se ha desarrollado principalmente en el flanco oriental y en la zona plana del eje del sinclinal para uso residencial y comercial, con edificaciones que superan los 5 pisos de altura y con alta densidad poblacional.

El proyecto es necesario, ya que toda capital de departamento en Colombia, deberá disponer de los estudios de microzonificación sísmica con el objetivo de contar con las herramientas e instrumentos para organizar y ejecutar el Plan de Ordenamiento Territorial (POT). Así mismo, para los constructores y diseñadores, es fundamental conocer las propiedades y características de los suelos y los espectros de diseño estructural (respuesta del suelo ante un evento sísmico). Para los Consejos Departamentales, Distritales y Municipales para la gestión del riesgo acompañados por la ingeniería geotécnica, es indispensable localizar las zonas potenciales de suelos expansivos, licuación y movimientos de remoción en masa con el fin de delimitar zonas susceptibles de inestabilidad.

Los resultados de la microzonificación sísmica, beneficiarán a la población de Tunja en general, dado que permitirán determinar con mejor precisión las recomendaciones en el diseño y la construcción de edificaciones nuevas, así como las pautas para el reforzamiento estructural de las edificaciones antiguas.

La microzonificación sísmica será la base para la elaboración de los planes de prevención y atención de desastres en caso de un sismo, generando un nuevo conocimiento en el área de geotecnia y estructuras ante el comportamiento del suelo en Tunja en presencia de ondas sísmicas.

El presente proyecto de Modelo Piloto de Microzonificación, establece las bases para alimentar la geodatabase geotécnica, permitirá la validación de la caracterización de los suelos con la construcción de perfiles geotécnicos y así tener un acercamiento a una modelación en 3D del suelo de la ciudad.

Es necesario resaltar, que en la actualidad se desarrollan las modelaciones geotécnicas y sísmicas por parte del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica y Amenazas Geo ambientales (GIISAG) de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Tunja, con el fin de encontrar los espectros de diseño estructural para las diferentes zonas de la ciudad de Tunja; por tal motivo, los datos e información en este aspecto estarán sujetos al avance de dichas modelaciones. Los ensayos geofísicos en campo con el fin de determinar la velocidad cortante de onda de diferentes estratos, estudio de microtrepidaciones y el análisis para la generación de los coeficientes de aceleración dependen del avance del convenio suscrito entre la Alcaldía de la ciudad y el grupo de investigación GIISAG, debido a los altos costos y tiempo para la ejecución de los mismos; por tal motivo, se plantea un modelo inicial de microzonificación para la ciudad de Tunja, actualizando la geotadabase en el momento de contar con los resultados de dichos ensayos.

## 3.2 Antecedentes

Colombia, por su posición geográfica, es atravesada por la cordillera de Los Andes, en la cual se encuentran situadas las más importantes capitales de departamento, centros de producción industrial y grandes centros poblados. El país bordea el Cinturon de Fuego del Pacífico donde chocan las placas de Nazca y Suramericana y en la costa Atlántica; limita con la placa Caribe, motivos por los cuales se encuentra expuesto a diferentes fenomenos naturales como sismos, tsunamis, y deslizamientos entre otros (López Ramírez, Reyes Echeverria, y Ramírez, 2001).

El 31 de marzo de 1983, la ciudad de Popayán (ubicada al suroeste del país), sufrió un sismo de magnitud 5.5 en la escala de *Richter*, dejando aproximadamente 300 muertos y más de 10,000 personas damnificadas (Cardona Arboleda Omar Darío, 2004). A raíz de la ocurrencia del sismo, con la Ley 11 de 1983, se promulgan las pautas de reconstrucción de dicha

ciudad, así mismo, dá origen al Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes CCCSR-84 mediante el Decreto 1400 de 1984 (Contreras, 2018).

En el año de 1997, la Unidad de Prevención y Atención de Emergencias (UPES), el Instituto en Geociencias, Minería y Química (INGEOMINAS) y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, atendiendo la solicitud distrital de generar una estrategia para la prevención y atención de desastres por riesgo sísmico de la ciudad de Bogotá, presentan los resultados del convenio: Microzonificación Sísmica de la ciudad de Santafé de Bogotá donde se delimitan 5 zonas de comportamiento homogéneo del suelo en la ciudad.

Cada zona establece parámetros particulares para el diseño y construcción de edificaciones y líneas vitales (UPES, INGEOMINAS, y UNIANDES, 1997).

A través del tiempo el CCCSR-84, demostró ser insuficiente y debió ser actualizado. Por esta necesidad, fue aprobada por el Congreso de la República la Ley 400 de 1997, que corresponde al Reglamento de Construcción Sismo Resistente (AIS, 1997), sustituyendo al CCCSR de 1984.

El 25 de enero de 1999, el eje cafetero de Colombia, que corresponde a los departamentos de Quindío, Risaralda y Caldas, ubicados sobre la Cordillera Central de los Andes, sufrió un sismo con magnitud de 6.4 grados en la escala de *Richter*. La ciudad de Armenia, capital del departamento del Quindío, fue la más afectada con cifras aproximadas de 1,000 muertos, 4,000 heridos y cerca de 13,000 edificaciones afectadas (Cardona Arboleda Omar Darío, 2004).

El Decreto 926 del 19 de marzo de 2010, promulgó El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) (AIS, 2010). Posteriormente, al Decreto 926 de 2010, han sido introducidas modificaciones en los Decretos 2525 del 13 de julio de 2010, 092 del 17 de enero de 2011 y 340 del 13 de febrero de 2012.

En la NSR-10, se incluye un nuevo mapa de sismicidad elaborado por la Red Sismológica Nacional, que permitió identificar de manera más acertada las zonas de amenaza sísmica en Colombia. Para realizar este mapa, se registraron entre 1995 y el 2009 alrededor de 22,000 eventos adicionales que permitieron realizar un mejor estimativo (Aguirre Patiño María Fernanda, 2012).

Tunja, capital del departamento de Boyacá, ha registrado en los últimos 30 años 3 sismos de baja intensidad. Así mismo, la ciudad se encuentra a 160 km de La Mesa de los Santos, en dicha zona, se encuentra el nido sísmico de

Bucaramanga, donde se presenta el 50% de los movimientos telúricos que se registran en el país. La razón de esta actividad es que muy profundamente hay una gran lámina de rocas que todavía está fría y que al romperse producen sismos (Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2000).

La NSR – 10 (AIS, 2010), establece que para capitales de departamento localizadas en zona de amenaza intermedia y alta, deberán armonizar los instrumentos de planificación para el ordenamiento territorial con un estudio de microzonificación sísmica. En la actualidad la ciudad de Tunja (Colombia), cuenta con datos de caracterización geotécnica y geológica de forma dispersa y sin ningún tratamiento geoespacial que establezca información base para la toma de decisiones de planificación.

Según el Instituto Geofísico Universidad Javeriana (2000), en los últimos 500 años se han presentado un número importante de eventos sísmicos en la zona de estudio. Catálogos sísmicos del Programa para la Mitigación de los Efectos de los terremotos de la Región Andina (SISRA), registran 253 temblores entre 1643 y 1981, con magnitudes variables entre 2.0 y 5.5 con un promedio de un sismo cada dos años. Catálogos del *Preliminary Determination of Epicenters* (PDE), muestran que entre 1973 y 2005, se presentaron en la misma zona 28 sismos con magnitudes que varían de 3.7 a 5.8 con un promedio aproximado de un sismo por año.

### 3.3 Estado del arte

En un recuento mundial de estudios de microzonificación sísmica, en el Norte de Anatolia, Turk, Gümüşay y Tatar (2012), analizaron la importancia del uso de las fotografías aéreas en los estudios de microzonificación sísmica, y la integración de los datos en un SIG. Estos autores desarrollan un modelo basado en el uso de los SIG con el objetivo de determinar las zonas urbanas de Erbba (Turquía), con riesgo de desastre por fenómenos naturales. Así mismo, es la herramienta base para los posteriores estudios de microzonificación sísmica y planeamiento del territorio urbano.

Mediante la evaluación e integración de datos geotécnicos, geológicos, fotografías aéreas, datos topográficos, historia de eventos sísmicos, microtemblores y exploraciones geotécnicas entre otros parámetros, es posible detectar zonas potenciales de licuefacción del suelo en el área de estudio. Sin embargo, se encontró en la evaluación de fotografías aéreas de 1972 y 2006, y la integración de estos datos con los SIG, que una urbanización considerablemente densa se ha desarrollado cada vez más hacia

la localización de la falla geológica. El estudio reveló las zonas potenciales para la licuefacción del suelo.

Turk et al. (2012), presentan una metodología de microzonificación donde el eje fundamental de análisis y generación de resultados es el SIG. Como complemento, el estudio incorpora la herramienta Model Builder de ArcGIS 9.2 con el fin de facilitar las operaciones de análisis espacial y delimitación de zonas con riesgo de terremotos.

Los resultados son los mapas de dirección del crecimiento urbano de la ciudad, zonas de potencial licuefacción, el porcentaje de edificaciones en riesgo por sismo y recomendaciones para la ubicación de nueva infraestructura.

Según Turk (2009), los desastres están directamente relacionados con la ubicación geográfica. Por lo tanto, los datos geográficos antes y después de un desastre son necesarios para estimar la vulnerabilidad antes del evento y cuantificar los daños después de él. La adquisición precisa y rápida de estos datos tiene un directo impacto en el éxito de los planes para el futuro. En tales casos, fotografías aéreas e imágenes de satélite han sido aceptadas como fuentes de datos geográficos indispensables.

Por lo tanto, para que las medidas necesarias puedan ser tomadas en el menor tiempo y con la mayor eficiencia, se requiere de la integración entre las fotografías aéreas, las imágenes de satélite, los datos geológicos y los datos geotécnicos en un entorno SIG. La confiabilidad de los datos que se introducen en un SIG es parte fundamental en los procesos de análisis geográfico, estos se obtienen a partir de fuentes diferentes, como fotografías aéreas, imágenes de satélite, escaneo láser, sistemas de posicionamiento global (GPS), mediciones terrestres y digitalizaciones de mapas, los cuales deberán tener un tratamiento y procesamiento especial.

Las investigaciones sobre ingeniería geotécnica son en casos específicos investigaciones que abarcan una extensión espacial muy grande, en este tipo de estudios, donde los componentes de análisis espacial son muy densos, los SIG, han surgido como ayuda fundamental; sin embargo, el avance científico de los SIG se ha enfocado con más rigurosidad en disciplinas tales como: Ingeniería ambiental, ordenamiento territorial, cartografía y ciencias agropecuarias. Este hecho muestra que, aunque existen avances de SIG en geotecnia, estos avances han sido lentos y no han llamado la suficiente atención de los desarrolladores de software para SIG que permitirán avances

más rápidos y accesibles a toda la comunidad en temáticas específicas como la modelación en 3D.

Por ejemplo, Kaufmann y Martin (2008), presentan una metodología la cual permite integrar mapas geológicos, perfiles estratigráficos 2D, registros de exploraciones del subsuelo y demás datos análogos y digitales de uso común con el fin de construir un modelo 3D geológico a través de herramientas SIG denominadas *Geomodeler*. Las herramientas base de la metodología propuesta es la creación de una base de datos con los atributos de cada pozo de exploración, luego con ArcGIS, se elaboran los límites y extensiones de las formaciones geológicas, se digitalizan los perfiles o cortes geológicos y se fabrica el modelo digital de elevación; y el *Geomodeler* realiza la interacción e integración de los datos, permite reinterpretación y validación del modelo 3D.

Otros estudios como el desarrollado por Jiménez, García-Fernández, Zonno, y Cella (2000), han integrado modelos geológicos 3D como insumo para la modelación de eventos sísmicos en proyectos de microzonificación.

En el proyecto de microzonificación sísmica de Bucarest, Kienzle et al. (2006), implementaron herramientas SIG para el modelamiento 3D de la geología e hidrogeología de la ciudad, denominado Modelo Digital Geológico (MDG), a partir de información de exploraciones geotécnicas, digitalización de mapas, cortes geológicos y bases de datos de sondeos geotécnicos a diferentes profundidades. Las herramientas SIG empleadas fueron interpolación *Kriging* y extensión TOPOGRID de ESRI. El modelo resultante incluye no solo información acerca de la profundidad y espesor de las diferentes unidades geológicas, sino también los datos hidrogeológicos.

Otros estudios presentan metodologías más complejas para la integración de herramientas SIG en los estudios de microzonificación sísmica. Nath (2005), incluye dentro de su metodología la ponderación o pesos a los atributos espaciales de: Pendiente, tipo de suelo, litología, deslizamientos, respuesta del sitio, aceleración máxima del terreno y resonancia, para finalmente realizar análisis de superposición, combinación e integración entre las capas resultantes.

Los actuales estudios de microzonificación sísmica con herramientas SIG, están basados en metodologías particulares adaptados a las singularidades de cada región y a los datos espaciales disponibles. Karimzadeh, Miyajima, Hassanzadeh, Amiraslanzadeh, y Kamel (2014), presentan una metodología

basada en 3 pasos: Elaboración de la geodatabase con la inclusión de la mayor cantidad de atributos espaciales, análisis sísmico y análisis de vulnerabilidad.

En la primera etapa se emplean herramientas de interpolación espacial (*kriging*), para elaborar los mapas temáticos de geología, topografía, pendientes, profundidad del aluvión, profundidad del nivel freático y el mapa de material sedimentario. Dentro del análisis sísmico, *ArcGIS* es empleado como herramienta para generar el mapa de sismos denominado: *Ground Shake Map* (GSK), insumo inicial dentro de la metodología *Deterministic Seismic Hazard Analysis* (DSHA) empleada en zonas de alta actividad sísmica. En la tercera etapa, análisis de vulnerabilidad, *ArcGIS* permite superponer las capas de: Tipo de construcción (acero, mampostería, concreto, etc.), mapa de terremotos, población y con el apoyo de las curvas de fragilidad de cada tipo de material de construcción determina el porcentaje de daño para cada escenario propuesto.

### 3.3.1 Experiencias internacionales

Kılıç, Özener, Ansal, Yıldırım, Özaydın y Adatepe (2006), llevaron a cabo en Turquía una investigación donde el SIG fue capaz de almacenar información geotécnica de 107 sondeos, que incluyen ensayos estáticos y dinámicos de laboratorio y campo, análisis de la tectónica del sitio, análisis de agua subterránea y nivel freático, análisis de pendientes y lecho de roca. La evaluación dinámica con SIG, consistió en realizar el mapeo de la variación de la velocidad de onda de corte, clasificación de sitios, análisis de respuesta en sitio, simulación de sismo, análisis de la microzonificación respecto al movimiento del suelo y evaluación de los mapas de microzonificación sísmica. El estudio determinó, además de la microzonificación sísmica, la gran capacidad de los SIG para almacenar y analizar información georreferenciada.

En Asia, en la región China de Wushan, Li y Zhou, (2012), realizaron un estudio de estabilidad de taludes en donde los datos más representativos fueron *raster* representados en Modelos Digitales de elevación (MDEs), y mapas de pendientes dentro de un marco de base de datos geográfica de un SIG, el cual fue denominado *Wushan County*. Para este estudio se determinaron distintos métodos de cálculo estadístico apropiados para los materiales presentes en el sitio, se realizó con el SIG un análisis de fenómenos de remoción en masa con los datos *raster* que fueron vectorizados para obtener una mejor visualización. *Wushan County*, ahora es una fuente de consulta y toma de decisiones ingenieriles para la zona de estudio debido a su alta capacidad de

actualización, este hecho fortalece el uso de la teledetección y los datos *raster* en estudio de la geotecnia y la geología.

Hoy en día se encuentran en auge las investigaciones del suelo y del subsuelo con SIG, la ingeniería geotécnica, demanda cada vez más de caracterizaciones del suelo y de su modelamiento para adelantar proyectos de carácter ambiental o de nuevas infraestructuras, es así como en Asia se ha hecho un uso extensivo de los SIG aplicados a la geotecnia, evidencia de esto son investigaciones como la realizada en la ciudad de Mumbai (India), por MHASKE, S.Y y CHOUDHURY, D. (2011), sobre las velocidades de onda de corte en el suelo como aporte al estudio macro de amenaza sísmica de la ciudad, determinando que el suelo posee velocidades de onda de corte entre los 110 y 350 m/s, la información necesaria para la investigación proviene principalmente de 400 sondeos almacenados en una base de datos, graficada en mapas de contorno de velocidad, analizada espacialmente y validada, todo por medio de un SIG.

Otro ejemplo se presenta en China, donde Cheng, Zhang, y Peng (2013), han comprobado la validez de los SIG en estudios geotécnicos. En esta investigación se utilizó *ArcGIS* para determinar la amenaza geológica. Se compararon los resultados del software con los fenómenos naturales ocurridos, encontrando una similitud bastante alta validando finalmente los SIG en este tipo de estudios de evaluación de indicadores cualitativos.

Estos indicadores incluyen datos cuantitativos los cuales pueden ser: Inclinación y altura de la pendiente o la precipitación; estos deben ser clasificados de acuerdo con un índice de evaluación. Por lo tanto, los indicadores deben tener un valor de importancia asignado. Por ejemplo, para el gradiente, altura y tipo de pendiente, estructura de la roca y suelo, vegetación, precipitación, e impacto de las actividades humanas de la ingeniería.

Una ventaja importante de los procesos con SIG son las herramientas de análisis espacial y geoestadística. En diversas partes del mundo se han usado este tipo de herramientas. Entre ellos se destaca el realizado en Tokio (Japón), Pokhrel, Kuwano, y Tachibana (2013), quienes desarrollaron una metodología por medio del método *Kriging*. Se interpolan datos provenientes de múltiples sondeos para calcular el potencial de licuefacción en ubicaciones no muestreadas. Este estudio determinó que el método de interpolación *Kriging*, es un método adecuado e imparcial para interpolar valores de potencial de licuefacción en el sitio de estudio.

En la ciudad de Gyeongju (Corea del Sur) Sun, Chun, Ha, Chung, y Kim, (2008), desarrollaron una herramienta SIG denominada “Sistema de información geotécnica GTIS” con el fin de predecir amenazas sísmicas. El pilar de esta investigación fue el uso del método geoestadístico *Kriging*, para la interpolación de variables como cotas topográficas, lecho de roca, coeficientes de aceleración de ondas, entre otras. Esta investigación comparó el análisis de los datos con otros tipos de interpolación tradicionales, concluyendo que el *Kriging*, es el método de interpolación más acertado en las predicciones. Así se verificó la utilidad de la GTIS, como instrumento regional de síntesis para su uso en la planificación de los riesgos sísmicos. Finalmente, el aplicativo realizó la visualización correspondiente de los resultados por medio de mapas temáticos. Aplicativos como el mencionado anteriormente, definiendo proyectos de gran envergadura en los cuales la información necesaria para el estudio no proviene de un único trabajo de investigación.

En un estudio en el canal de Zayed, Labib y Nashed (2013), determinaron el potencial de expansión del suelo, mediante la creación de una base de datos geoespaciales con las propiedades de las arcillas presentes en la zona de estudio, para luego modelar por medio de mapas las propiedades de estas, en la zona de estudio. Concluyendo que los SIG pueden ser utilizados con eficacia con el fin de visualizar y analizar los resultados de los estudios experimentales y de inspecciones *in situ*, como se evidencia en su estudio acerca del suelo expansivo en la región de Toshka (Egipto), esta afirmación es coincidente con resultados de otras investigaciones similares donde se ha de resaltar el de Cartaya, Méndez, y Pacheco, (2006). En este documento sobre la modelación de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa, los autores concluyen que las aplicaciones SIG, son una herramienta fundamental cuando se requiera modelar diversas variables, principalmente por la gran cantidad de datos que es posible procesar con el fin de realizar procesos de superposición y álgebra de mapas como resultados cartográficos finales.

La difusión de la información para compartir con usuarios expertos y no expertos, es otro camino que han tomado los SIG, con el fin de profundizar más en los estudios de microzonificación y que expertos del tema puedan re-orientar dichas investigaciones.

La funcionalidad de los paquetes *WebGIS*, es difundir datos geográficos entre el público general y específico del área de interés, sin la necesidad de contar con software SIG, de tal forma que se realicen consultas interactivas en línea.

Más de 30 diferentes paquetes *WebGIS*, están disponibles en la actualidad (Pessina y Meroni, 2009). Entre estos, los más populares y de éxito comercial son: *ESRI*, *ArcIMS*, *Intergraph*, *GeoMedia Mapa web* y *AutoDesk MapGuide*; mientras que la *UNM MapServer*, es una aplicación de código abierto que ha sido ampliamente adoptada. En los análisis de riesgo por sismo, donde un alto nivel de criterios de profesionales multidisciplinarios e interdisciplinarios se requiere, la tecnología *WebGIS*, permite interactuar de forma sincrónica y asincrónica de tal manera que los aportes enriquezcan los resultados finales de los estudios. Así mismo, la constante actualización de las bases de datos provee resultados más precisos y accesibles a la población objetivo.

### 3.3.2 Experiencias regionales

En Latinoamérica se valida la importancia de los SIG en la geotecnia, Cartaya et al., (2003), sostienen que los SIG son un apoyo importante y eficaz para la modelación de diferentes variables por su capacidad de procesar grandes volúmenes de información, su capacidad de generar topología y la habilidad de superposición de escenarios mediante técnicas de álgebras de mapas. Esta afirmación coincide con Torres, Suescún, y Castillo (2006), quienes manifiestan que los SIG tienen características que los hacen un apoyo muy importante en diferentes proyectos de la ingeniería civil, así mismo, su uso no ha sido totalmente explorado desaprovechando el gran potencial de estos en la resolución de problemas ingenieriles, principalmente, por el poco conocimiento de dichas herramientas, lo planteado anteriormente deja abierta la discusión del uso de tecnologías modernas como los SIG en metodologías tradicionales de análisis avanzados en las ciencias de la tierra.

Finalmente, en Colombia se han desarrollado investigaciones sobre microzonificación y uso de los SIG en la parte del eje cafetero y centro del país, y a continuación se destacan algunos de los proyectos más representativos. Slob, Hack, Scarpas, van Bemmelen, y Duque (2002), evalúan, mediante un SIG, los daños que causa un terremoto en la Ciudad de Armenia (Colombia). Los autores proponen un método donde observan la variación espacial de las respuestas sísmicas del sitio, dicha información se puede utilizar como base para la cartografía de microzonificación sísmica. Ellos, determinaron la variación espacial de la aceleración espectral para diferentes frecuencias, mediante observaciones después del terremoto de la ciudad en enero de 1999.

Farbiarz, Jaramillo, y Villarraga (2000), midieron módulos de rigidez y propiedades de amortiguamiento del suelo, para determinar las características del comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Medellín

(Colombia), y así establecer las aceleraciones máximas. Mediante estos estudios se pudo observar la asombrosa variedad de los suelos y la amplia variación de sus características. Algunas de las secciones estudiadas presentan características como, baja plasticidad y presentan periodos en el extremo más corto del espectro. Por ello, lograron establecer aceleraciones máximas que varían entre 0.18 g y 0.38, todo esto con la ayuda de los SIG.

Para la ciudad de Tunja, se ha realizado el Estudio de microzonificación Sísmica Preliminar del Instituto Geofísico Universidad Javeriana (2000). La investigación se basó en la norma para estudios de microzonificación sísmica de la *Association Francaise Du Genie Parasismique* (AFPS), con un nivel de detalle tipo A (nivel bajo de detalle a partir de recopilación e interpretación de la información existente). Como primer paso, recopiló la información de eventos sísmicos previos ocurridos en la zona de interés, análisis de la geología, geomorfología y geotecnia y la probabilidad de ocurrencia de eventos de remoción en masa inducidos por sismos. Adicionalmente, se realizaron análisis de fotointerpretación geológica, estadísticas de la población y clasificación de los tipos de suelo.

Otros estudios preliminares han buscado la caracterización geotécnica de diferentes sectores de la ciudad (Dallos Morantes y Niño Plazas, 2009). Rincón Arango (2000) y Montes Leguizamón y Villate Corredor (2001), cuentan con información secundaria de datos geotécnicos y geológicos de zonas particulares de la ciudad.

Los estudios morfométricos y morfodinámicos de la ciudad de Tunja (Torres Rincón y Cáceres Cárdenas, 2005; Corredor Castellanos y Salamanca Garcia, 2003; Bautista Rubiano y Roberto Flórez, 2003), zonifican las cárcavas y los rellenos antrópicos que se han realizado con el fin de permitir la expansión urbana principalmente con usos residenciales. Los inventarios de fenómenos de remoción en masa (Dallos Morantes y Niño Plazas, 2009), permiten la localización y evaluación de la susceptibilidad de riesgo de activación en la eventualidad de un sismo.

### 3.4 Metodología

La metodología desarrollada en el presente proyecto de investigación, consta de tres partes fundamentales: Recolección y procesamiento de datos e información primaria y secundaria con el fin de establecer la geodatabase Geotécnica, la definición de las variables geotécnicas a modelar en función de la disponibilidad de la información, la calidad de la misma y la dispersión

dentro del área de estudio y el análisis y generación de cartografía delimitando zonas homogéneas y la elaboración de modelos 3D requeridos por los expertos para el modelo piloto de la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja.

La primera figura presenta el flujograma con las actividades desarrolladas en el proceso metodológico de la presente investigación. El desarrollo del estudio requiere implementar diferentes herramientas SIG, por lo cual, fue necesario integrar información tipo *vector*, como *raster*, con bases de datos, con información tomada de diferentes fuentes de consulta. Así mismo, de herramientas 3D para la presentación de modelos y *ModelBuilder*, para la ejecución de rutinas y del modelo prototipo de microzonificación.

La metodología se fundamenta en las experiencias internacionales y en el proceso y uso de herramientas basado en las observaciones de diferentes autores de los últimos años, así mismo, en los resultados que se requieren obtener con la investigación.

Se inicia con la búsqueda de información secundaria en las diferentes entidades públicas y privadas que administren datos geográficos, como Curadurías Urbanas, Alcaldía Mayor de Tunja, Universidades y estudios previos sobre el tema en el área de estudio.

Para la creación de la base de datos geotécnica, se realizan las transformaciones necesarias a formatos vector y raster y las proyecciones a un mismo sistema coordenado.

Para el procesamiento y análisis de la información, se utilizan herramientas ArcGIS, principalmente interpolación espacial; se generan los *shapes* necesarios para cada variable a los diferentes intervalos de profundidad.

El modelo inicial planteado para la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja consiste en la inclusión de las siguientes variables, ponderadas a partir de la metodología de panel de expertos (Salcedo Patarroyo, Camilo Santiago, 2017):

- **Variables de clasificación geotécnicas:**
  - Índice de Consistencia (IC)
  - Cohesión o resistencia al corte (CU)
  - Límite Líquido (LL)
  - Índice Plástico (IP)
- **Variables geológicas**
  - Depósitos y formaciones geológicas

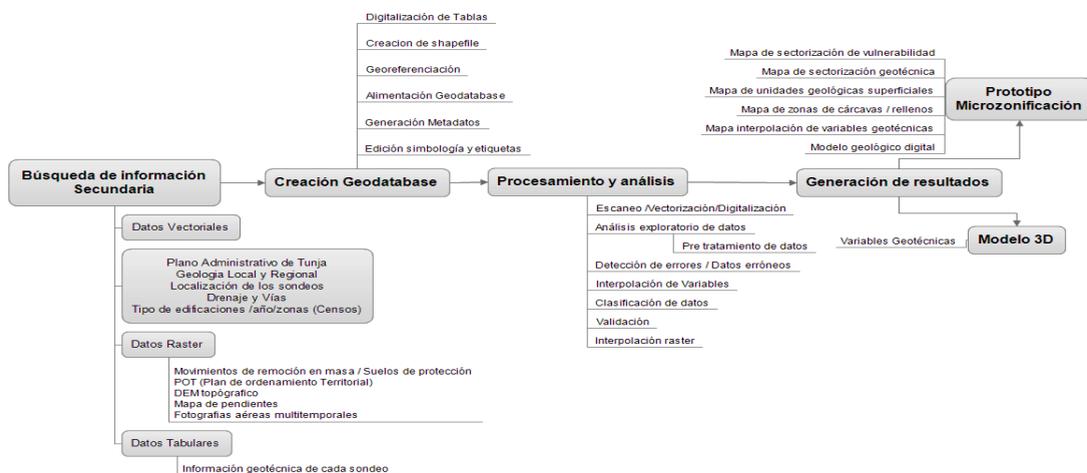
- **VARIABLES DINÁMICAS DEL SUELO**
  - Tipo de perfil de suelo a partir de correlaciones con Vs y SPT
- **VARIABLES USOS DEL SUELO**
  - Suelos de relleno
  - Suelos de cárcavas
  - Suelos sin intervención
- **VARIABLES TOPOGRÁFICAS**
  - Pendientes
  - Profundidad de sondeos

Los expertos consultados para la determinación de variables características y sus ponderaciones son profesionales de la Alcaldía Mayor de Tunja, UPTC y Universidad Santo Tomás, Sede Tunja.

El siguiente paso del modelo es la incorporación de la variable tipo de perfil de suelo en función de la Vs, con el fin de incluir los parámetros dinámicos en el prototipo.

Finalmente, para la elaboración de los modelos 3D de diferentes propiedades índice geotécnicas se emplean las herramientas ArcGIS de ArcScene, ArcHydro y la extensión AHGW.

**Figura 3-1** Actividades modelo inicial de microzonificación sísmica - Tunja.



Fuente: Autores.

### 3.5 Definición del área de estudio

Tunja es la capital del departamento de Boyacá. En la Figura 3.2 se observan los límites de la ciudad: Por el norte limita con los municipios de Motavita y Cóbbita, al oriente con los municipios de Oicatá, Chivatá, Soracá y Boyacá, por el sur con Ventaquemada y por el occidente con los municipios de Samacá, Cucaita y Sora. Registra 200 desarrollos urbanísticos en la zona urbana y 10 veredas en el sector rural: Barón Gallero, Barón Germania, Chorroblanco, El Porvenir, La Esperanza, La Hoya, La Lajita, Pirgua, Runta y Tras del Alto. Los ríos: Jordán que atraviesa a la ciudad de sur a norte y la Vega que va de occidente a oriente, se consideran sus principales fuentes hídricas. La ciudad de Tunja se encuentra ubicada sobre la cordillera Oriental, en la parte central del Departamento de Boyacá, localizado a  $05^{\circ}32'7''$  de latitud norte y  $73^{\circ}22'04''$  de longitud oeste, con alturas que van desde los 2.700 m.s.n.m. hasta 3.150 m.s.n.m., con una extensión de 121.4 Km<sup>2</sup>, y una temperatura de 13°C (Alcaldía Mayor de Tunja, s. f.).

**Figura 3-2** Panorámica sinclinal de Tunja.



*Fuente: Autores.*

## 3.6 Procesamiento de datos

### 3.6.1 Modelo Digital de elevación (MDE)

La Figura 3., muestra que la zona de estudio presenta alturas entre 2670 a 3030 m.s.n.m. Las elevaciones más bajas se encuentran en la zona del eje del sinclinal de Tunja, caracterizada por presentar una zona residencial de estratos 3 a 6; de los 2696 a 2780 m.s.n.m. sectores de la Fuente, Los Cristales, Ciudadela Comfaboy, La Granja, correspondientes a los flancos occidental del sinclinal y de los 2780 m.s.n.m. a los 3038 m.s.n.m. sectores de San Lázaro y San Rafael en los límites urbanos de la ciudad. El centro histórico y administrativo de la ciudad se encuentran entre los 2800 a 2750 m.s.n.m y al sur la zona residencial estratos 1 a 3 entre los 2750 y 2900 m.s.n.m.

### 3.6.2 Mapa de pendientes

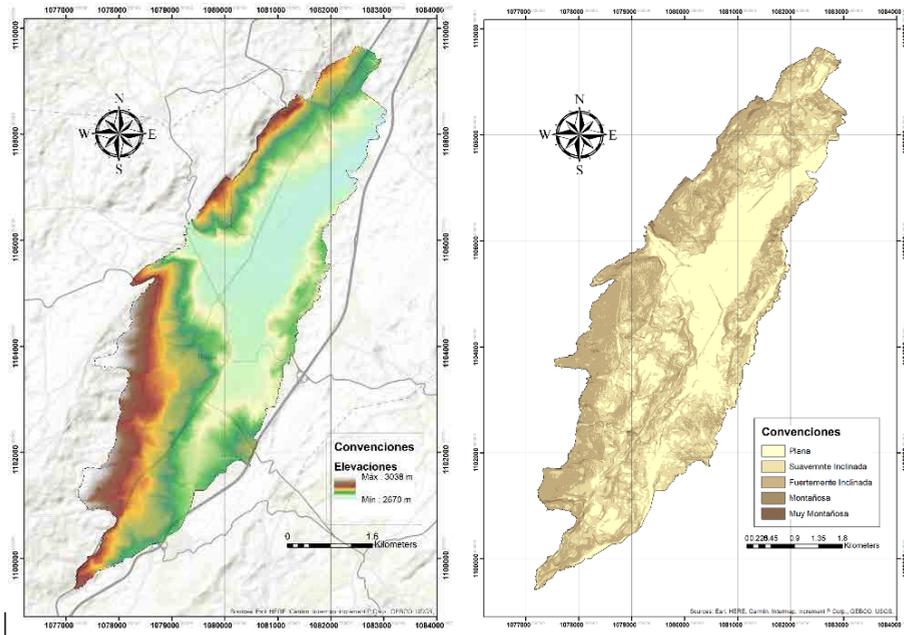
Se realizó la clasificación de las pendientes de acuerdo con la metodología presentada por Jiménez (2009), la cual aplica para proyectos de zonificación y susceptibilidad por eventos de remoción en masa.

En la Figura 3.3., se muestra el mapa de pendientes de la zona urbana de la ciudad de Tunja, las pendientes varían entre un 0% al 64%. En las zonas del eje del sinclinal correspondiente a los depósitos cuaternarios Fluvioacustre y Aluvial las pendientes son planas.

Al norte, el depósito Coluvial está caracterizado por pendientes suavemente a fuertemente inclinadas y la formación Bogotá, al occidente y sur son fuertemente inclinadas con zonas aisladas de pendientes montañosas.

La formación Tilatá al oriente de la ciudad presenta pendientes planas a suavemente inclinadas. En general, la zona urbana de Tunja, se encuentran en pendientes entre Plana a Fuertemente inclinadas.

**Figura 3-3** Modelo Digital de Elevación y pendientes de Tunja – Zona Urbana.



Fuente: Autores.

### 3.6.3 Interpolación espacial de parámetros geotécnicos

De acuerdo con la metodología planteada y la BDG, se caracteriza la variación espacial de las propiedades geotécnicas índice, como lo son: Contenido de  $W_n$  (%), LL, LP, IP, IC, e y una propiedad de resistencia,  $C_u$  (Kg/cm<sup>2</sup>), a diferentes profundidades.

Para la caracterización y evaluación de las variables geotécnicas espacialmente, se empleó el software ArcGIS 10.4, se interpoló mediante el método *kriging*, debido a que se obtienen interpretaciones más ajustadas a la realidad y con errores cuadráticos más bajos que los demás métodos de interpolación (Sun et al., 2008; Karimzadeh et al., 2014; Kienzle et al., 2006; Pokhrel et al., 2013).

De acuerdo a la identificación estratigráfica según las condiciones geotécnicas, se escogen 8 rangos de profundidad para ver el desarrollo y variabilidad de los parámetros geotécnicos del área de estudio, los cuales son: 0 a 3 metros, 3 a 5 metros, 5 a 7 metros, 7 a 9 metros, 9 a 11 metros, 11 a 15 metros 15 a 20 metros y mayores a 20 metros.

A partir de la metodología de panel de expertos, se establecen las siguientes variables geotécnicas como las más relevantes para el presente estudio, las cuales son empleadas para la generación de la interpolación espacial:

- Límite líquido (LL): Esta propiedad corresponde al contenido de agua expresado en porcentaje (%) con respecto al peso del suelo, donde el suelo pasa por una transición entre estado líquido y plástico. El análisis de dicha propiedad es importante ante un sismo, dado que las ondas vibratorias generarán recomodación de partículas de suelo generando un posible estado líquido con sus efectos de licuefacción.
- Índice de consistencia Relativa (IC): Se determina mediante la relación entre la diferencia del límite líquido y la humedad natural respecto al Índice Plástico (IP).
- Índice plástico (IP): Se determina mediante la diferencia entre LL y el límite plástico.
- Cohesión: Se utiliza para representar la resistencia al corte del suelo.
- Relación de vacíos: La relación de vacío de un suelo es el volumen de suelo no ocupado por partículas sólidas. Cuanto mayor sea la relación de vacío más suelto es el suelo.
- Suelo de fundación: Esta variable de la BDG, no es una propiedad del suelo natural, pero se incluye, dado que la ciudad de Tunja presenta en sus flancos oriental y occidental procesos de remoción en masa tipo cárcavas las cuales han sido rellenadas en grandes zonas a causa de la expansión urbana. La determinación de estas zonas, se realiza a partir de un análisis de fotografías áreas multitemporales. El intervalo de clasificación es cualitativo y se muestra en la Tabla 3.1.

**Tabla 3-1 Suelo de fundación.**

DESCRIPCION DEL SUELO
Suelo Natural (sin proceso de erosión)
Cárcava
Relleno antrópico

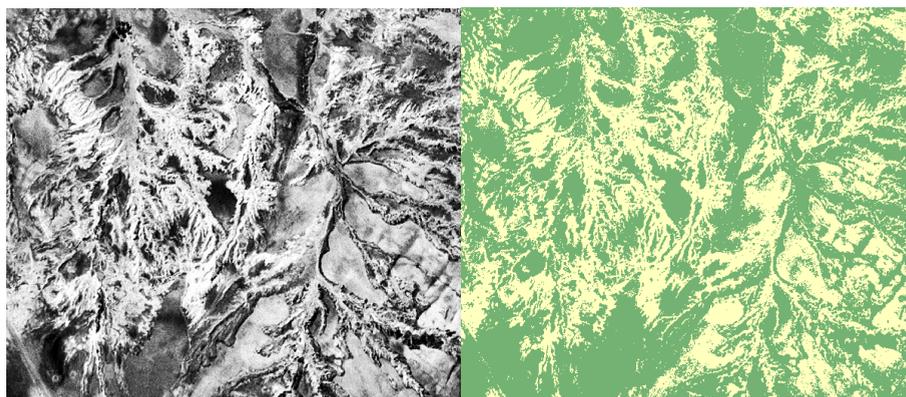
*Fuente: Autores.*

Con el fin de determinar las zonas de cárcavas y las zonas de cárcavas rellenadas a través del tiempo (rellenos antrópicos), se emplean fotografías áreas de los años 1939, 1945, 1957, 1960, 1978, 1984, 1992 y 2005 en formato *TIFF*, cada mosaico se *georreferencia* a partir de entre 7 a 13 puntos de control, con un error medio cuadrático promedio de 1.05. Luego de referenciado cada mosaico, se emplean las herramientas para la creación de las firmas espectrales y se aplica una clasificación supervisada. Por emplearse fotografías aéreas, los resultados deberán ser analizados cuidadosamente editando las zonas clasificadas a partir

de una inspección visual subjetiva. La Figura 3-4., muestra un ejemplo del resultado de la clasificación supervisada para la determinación de zonas de erosión en la zona sur este de la ciudad de Tunja para el año 1960. El color amarillo muestra las zonas de cárcavas. Con la comparación multitemporal y procesos de análisis espacial se determinan las zonas de rellenos antrópicos, es decir, cárcavas rellenadas para ser empleadas en proyectos de urbanización.

A partir del análisis de fotografías aéreas multitemporales, se observa en la Figura 3-5., que las zonas de cárcavas predominan hacia el flanco oriental del sinclinal, principalmente sobre la formación Tilatá, las cuales en un 40% han sido rellenadas para proyectos urbanísticos. En los barrios Cooservicios y San Antonio, se presentan los mayores porcentajes de cárcavas rellenadas. Por otro lado, en el flanco occidental del sinclinal, sobre la formación Bogotá, Cacho y el depósito Coluvial se muestran, en menor medida cárcavas rellenadas para uso residencial, principalmente en los barrios Altamira y la Fuente.

**Figura 3-4** Resultado clasificación supervisada, sector sur este – Tunja 1960.



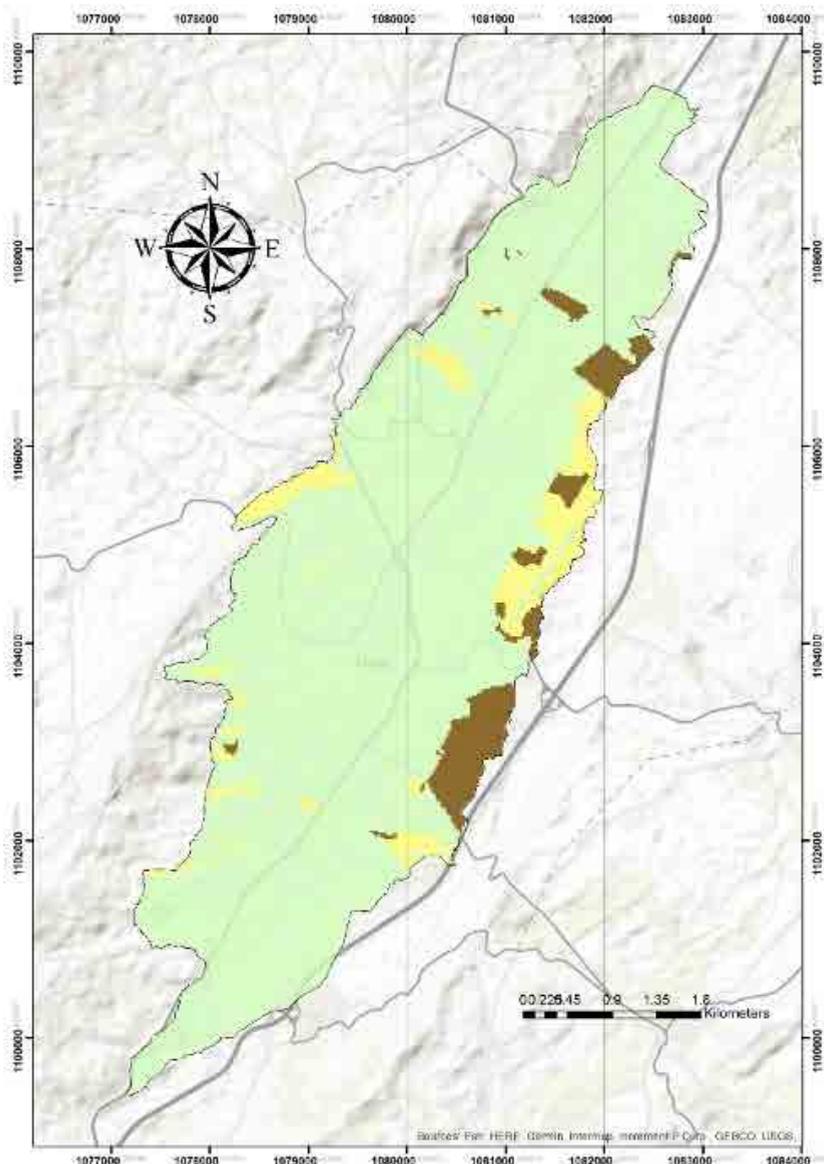
*Fuente: Autores.*

La Figura 3-5., muestra el resultado del tipo de suelo en función de relleno, cárcava o sin proceso de erosión.

- Litología: Este parámetro se emplea dentro de la BDG con el fin de integrar la litología dentro del modelo inicial de microzonificación.
- Velocidad de onda de corte ( $V_s$ ): Es el parámetro dinámico que permite determinar el comportamiento local del suelo ante la aplicación de cargas dinámicas y sísmicas. Ante la dificultad actual de contar con datos dinámicos para la ciudad de Tunja, se determina su valor a partir de correlaciones con ensayos de penetración estándar (SPT).
- Realizada la transformación a velocidad de onda de corte, se determina

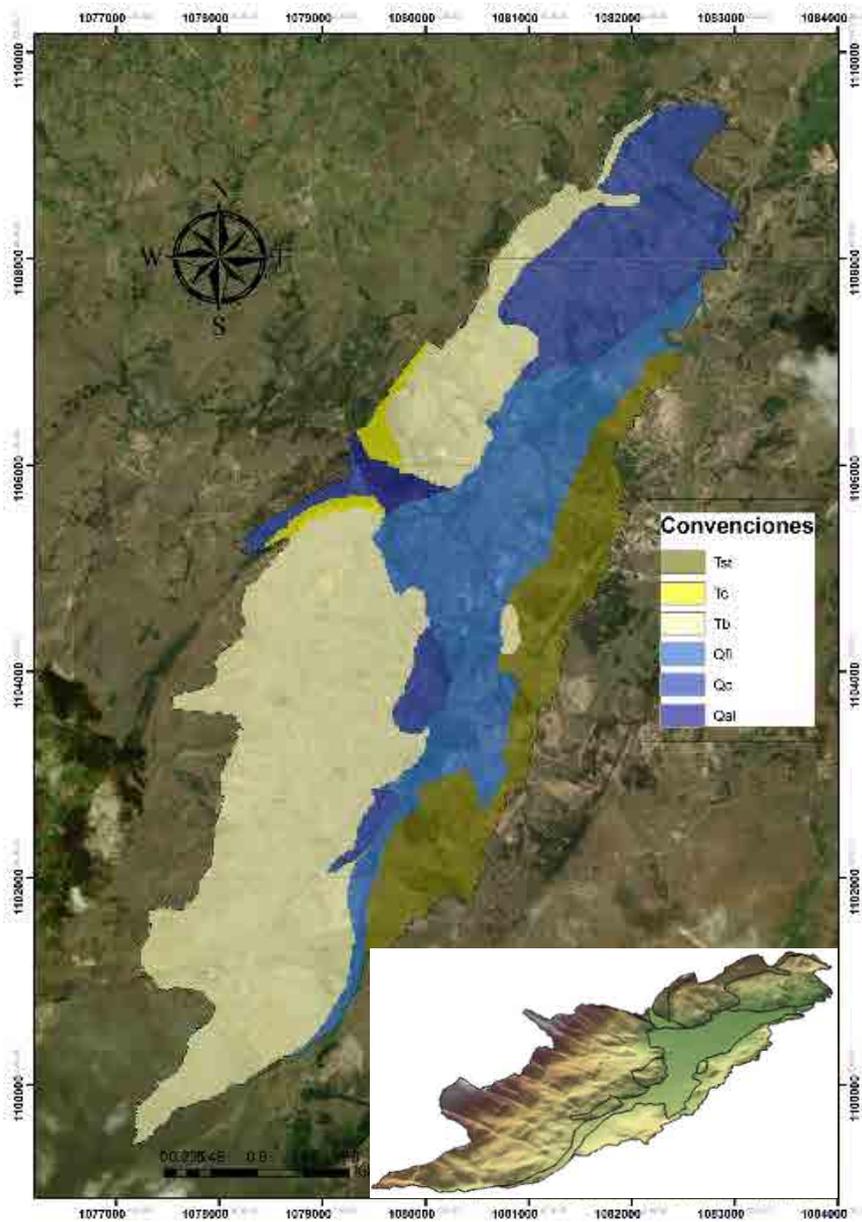
el tipo del perfil de suelo basado en la sección A.2.4.4 de la Norma de Construcción Sismo resistente de Colombia (NSR-10). La Figura 6., muestra el resultado del tipo de perfil de suelo a partir de la velocidad de onda de corte. En la ciudad de Tunja, predomina el tipo D, con zonas hacia los flancos del sinclinal con tipo de perfil de suelo C.

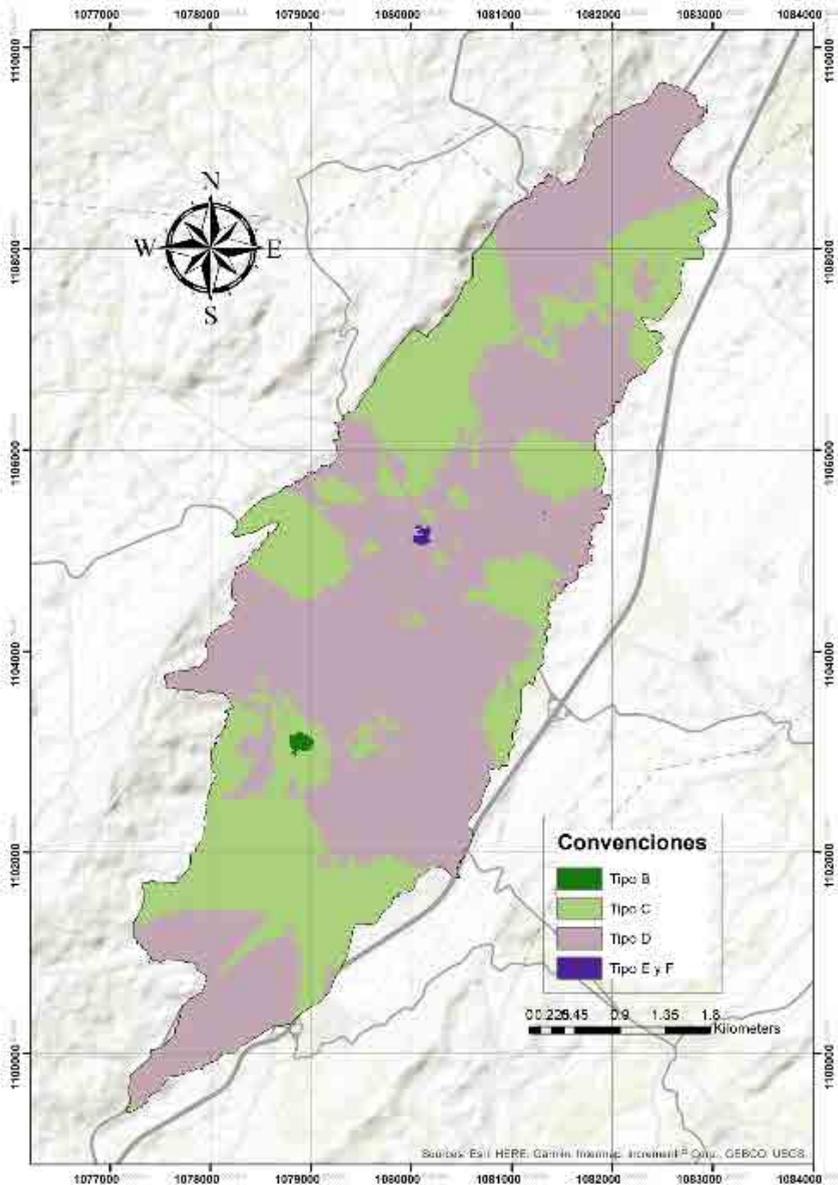
**Figura 3-5** Cárcavas y rellenos en Tunja.



*Fuente: Autores.*

**Figura 3-6** Geología y Tipo perfil de suelo en Tunja.





Fuente: Autores.

### 3.7 Modelo geoespacial para la microzonificación

El modelo inicial planteado para la microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja, consiste en la inclusión de las siguientes variables, ponderadas a partir de la metodología de panel de expertos:

- Variables de clasificación geotécnicas:
  - Índice de Consistencia (IC)
  - Cohesión o resistencia al corte (CU)
  - Límite Líquido (LL)
  - Índice Plástico (IP)
- Variables geológicas
  - Depósitos y formaciones geológicas
  - Variables dinámicas del suelo
  - Tipo de perfil de suelo a partir de correlaciones con Vs y SPT
- Variables usos del suelo
  - Suelos de relleno
  - Suelos de cárcavas
  - Suelos sin intervención
- Variables topográficas
  - Pendientes
  - Profundidad de sondeos

Los expertos consultados para la determinación de variables características y sus ponderaciones son profesionales de la Alcaldía Mayor de Tunja, UPTC y Universidad Santo Tomás, Sede Tunja.

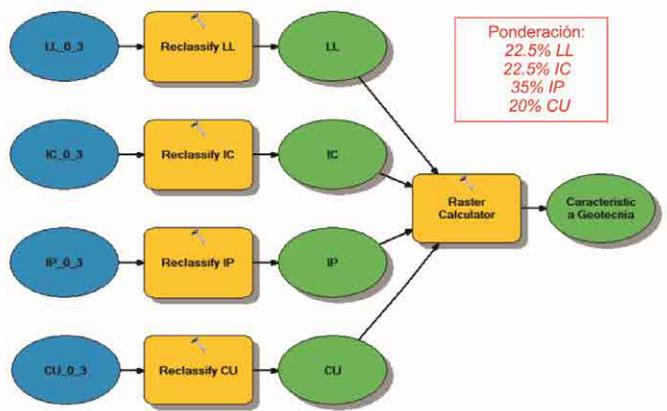
El prototipo para la microzonificación sísmica de Tunja, consiste en un modelo espacial donde inicialmente se genera un mapa de características geotécnicas incluyendo variables de clasificación ponderadas. La Figura 3-7., muestra el diagrama de flujo modelada para el intervalo de 0 a 3 metros en *ModelBuilder* de ArcGIS.

La segunda etapa del prototipo, consiste en la inclusión de las variables litológicas y de uso del suelo, en cada intervalo de profundidad establecido. La Figura 3- 8., muestra el siguiente paso en el modelo para el ejemplo de profundidad 0 a 3 metros.

Con los resultados de comportamiento geotécnico local en cada intervalo definido de profundidad, se realiza una superposición de cada *shapefile*, con el fin de obtener un único valor en cada pixel del *raster*. Se obtiene así el comportamiento total del suelo.

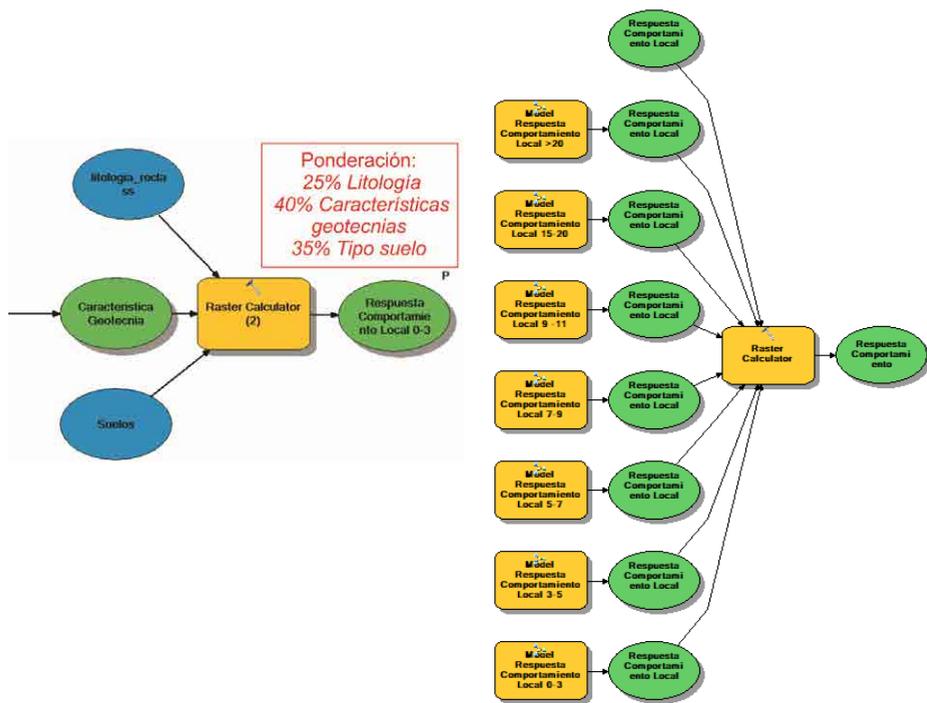
La Figura 3-8., presenta el *ModelBuilder* y la Figura 3-9., muestra el resultado total de la superposición de los diferentes intervalos de profundidad.

Figura 3-7 Diagrama de flujo mapa Características Geotécnicas.



Fuente: Autores.

Figura 3-8 Diagrama de flujo mapa Respuesta comportamiento Local.



Fuente: Autores.

En la Figura 3-9., se presenta el resultado final de la superposición de las variables geotécnicas a diferentes profundidades. Se indica que la zona de

mayor susceptibilidad geotécnica se encuentra en el eje del sinclinal sobre el depósito Fluviolacustre, en los barrios Mesopotamia, Santa Inés, La María, UPTC, Estadio, Batallón, Las Quintas y las zonas comerciales del Centro Comercial Unicentro y Viva; todos en la zona de estratos 4 a 6 de la ciudad. Así mismo, el flanco oriental del sinclinal presenta zonas de susceptibilidad Media –Alta principalmente en las zonas de cárcavas rellenas para proyector urbanísticos residenciales.

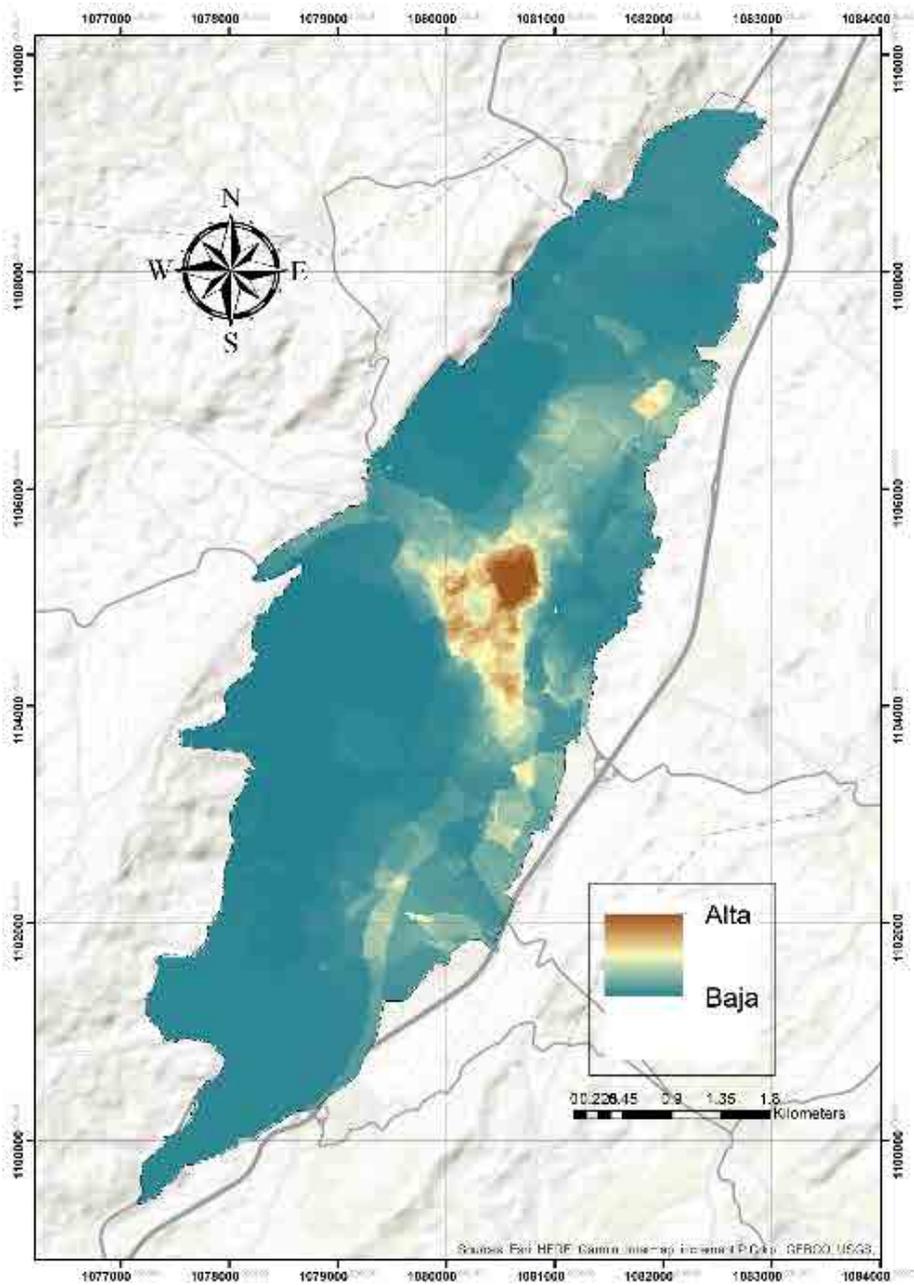
El siguiente paso del modelo es la incorporación de la variable tipo de perfil de suelo en función de la  $V_s$ , con el fin de incluir los parámetros dinámicos en el prototipo. La Figura 3-10., muestra que al incluir la variable dinámica del suelo (Tipo de perfil de suelo), las zonas críticas de susceptibilidad por evento sísmico son:

#### **Hacia el Norte:**

- Uso residencial: Mesopotamia, La María, Urbanización Hayuelos (en construcción), Edificio Inaltezza (edificación de 30 pisos), Altagracia.
- Uso comercial: Centro comercial Viva (en construcción), Centro Empresarial Green Hills, Centro Comercial Unicentro, Centro Comercial Verano Mall (en construcción).
- Uso educativo: UPTC, Campus Universidad Santo Tomás, (en construcción edificio de aulas).
- Uso médico: Clínica Medimas, Centro médico y empresarial Da Vinci.
- Otra infraestructura: Estadio la Independencia y Nuevo Terminal de transporte terrestre (en construcción).

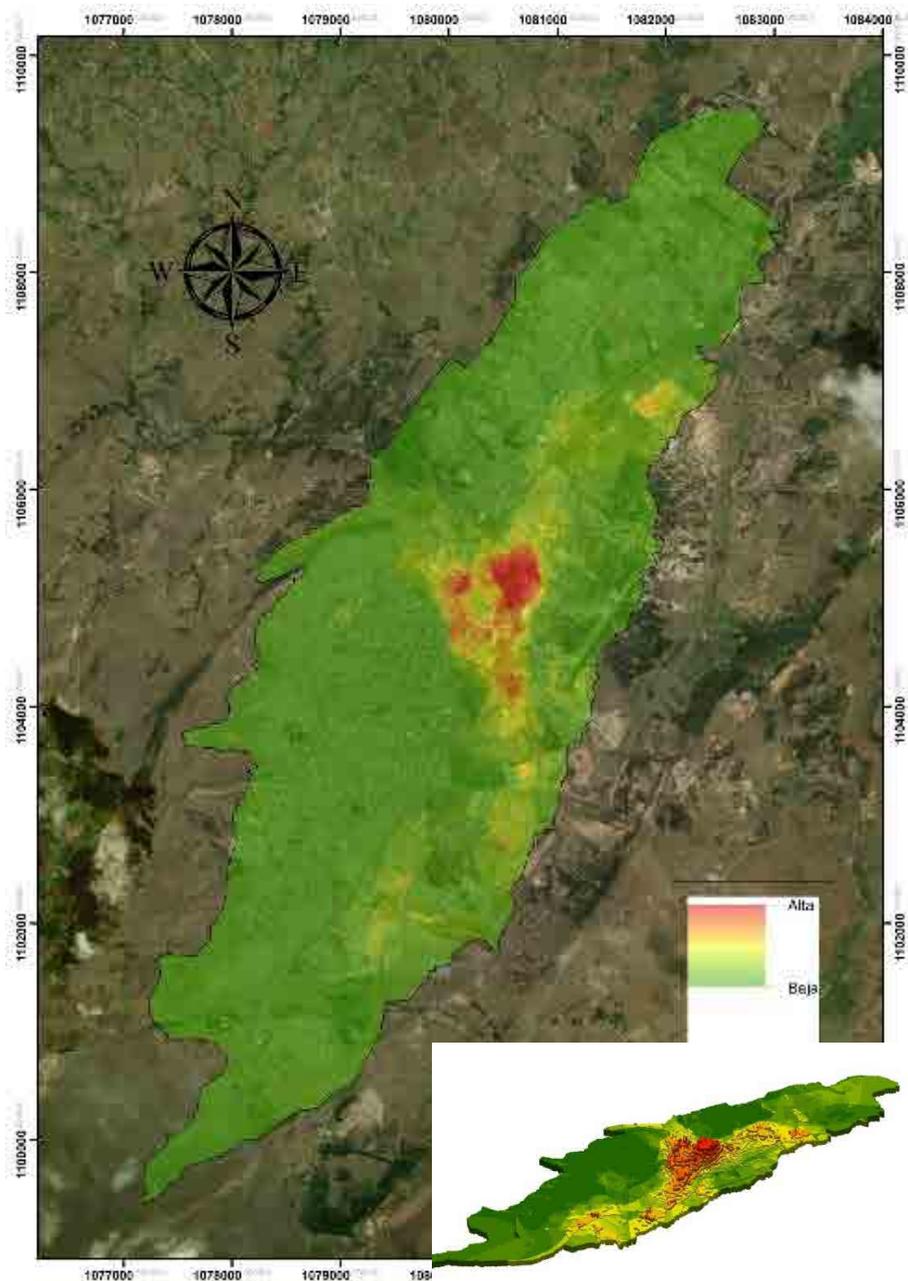
La característica predominante de las zonas anteriormente mencionadas, es que se presenta en estratos 4 a 6, áreas de gran concentración de habitantes (Universidades, Centros comerciales, empresariales y médicos), y nuevos desarrollos urbanísticos de carácter residencial con alturas importantes en las edificaciones. Adicionalmente, son zonas susceptibles a inundación según registros históricos de la ciudad.

Figura 3-9 Mapa resultado superposición de intervalos de profundidad.



Fuente: Autores.

**Figura 3-10** Mapa final de susceptibilidad del suelo por evento sísmico.



*Fuente: Autores.*

Hacia el este de la ciudad:

- Uso residencial: Los Patriotas, Curubal, Barrio Batallón, Prados de Alcalá, Terranova Coral (en construcción torres de 12 pisos).
- Uso educativo: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Algunas zonas de susceptibilidad media son:

- Barrio San Antonio.
- MultiParque Centenario.
- Barrio Villa Bachué.
- San Ricardo.
- Barrio Santa Ana.
- Plaza de mercado del Norte.
- Las Quintas.
- Santa Inés.

### 3.8 Discusión

Los SIG, actualmente tienen un gran potencial y desarrollo dentro de la ingeniería geotécnica, en especial, para la realización de estudios de microzonificación sísmica de ciudades, principalmente por la flexibilidad en el manejo de datos, la diversidad en los análisis espaciales y la visualización de los resultados en modelos 2D y 3D.

Aunque en la actualidad las investigaciones sobre ingeniería geotécnica se presentan en casos específicos, existen investigaciones que abarcan una extensión espacial muy grande, en este tipo de estudios, donde los componentes de análisis espacial son muy densos, los SIG, han surgido como ayuda fundamental; sin embargo, el avance científico de los SIG se ha enfocado con más rigurosidad en disciplinas tales como: Ingeniería ambiental, ordenamiento territorial, cartografía y ciencias agropecuarias. Este hecho muestra que, aunque existen avances de SIG en geotecnia, estos avances han sido lentos y no han llamado la suficiente atención de los desarrolladores de software para SIG, lo que permitiría avances más rápidos y accesibles a toda la comunidad en temáticas específicas como la modelación en 3D.

En el presente proyecto, se adaptaron metodologías encontradas en diversas partes del mundo, por ejemplo, se elaboró una base de datos geotécnica con más de 400 registros de sondeos a diferentes profundidades, las cuales permitieron generar los modelos 3D de algunas propiedades índice del suelo. Para la elaboración de los modelos 3D de diferentes propiedades, índice

geotécnicas, se emplean las herramientas *ArcGIS* de *ArcScene*, *ArcHydro* y la extensión *AHGW*, mostrando su versatilidad y eficiencia en la generación de modelos 3D.

La recolección de datos primarios para el modelo (propiedades índices del suelo, estratigrafía y datos dinámicos), fueron un gran inconveniente en el proyecto, debido principalmente a las diferentes fuentes de información; en ocasiones, los trámites administrativos demoraban la respuesta varios meses y en otras, los datos debieron ser corregidos y validados. La gran cantidad de datos generó que la etapa de procesamiento para obtener la información requerida fuera muy dispendiosa.

Así mismo, en el modelo inicial no se pudo tener en cuenta el parámetro relación de vacíos ( $e$ ) dado que se presentaron muy pocos datos en la base de datos BDG y al realizar los procesos de interpolación, en los límites espaciales los datos no eran coherentes.

El modelo inicial de microzonificación permite reajustar las ponderaciones o pesos de cada una de las variables, una de ellas, es la pendiente relacionada con el tipo de litología presente, dado que en depósitos cuaternarios las pendientes bajas, serán indicadores de mayor grado de susceptibilidad y en formaciones terciarias pendientes fuertes, presentarán efectos de borde amplificando las ondas sísmicas.

La expansión urbana de los últimos 20 años se ha desarrollado principalmente en la parte oriental, sobre los depósitos aluvial y fluvio-lacustre, sobre el eje del sinclinal. Esta zona tiene el más alto indicador de susceptibilidad del suelo y los más altos estratos socioeconómicos de la ciudad.

En su expansión urbana, la ciudad se ha desarrollado en menor medida en el flanco occidental, sobre la formación Bogotá y en pendientes clasificadas como fuertemente inclinadas; adicionalmente, existen zonas de erosión por cárcavas y otras áreas de cárcavas que han sido rellenadas para desarrollos habitacionales. Dicha zona, tiene una susceptibilidad media baja, pero no se deberá desconocer el efecto de amplificación de ondas por efecto de borde y por los rellenos antrópicos en la evaluación estructural de futuras edificaciones.

Los resultados muestran que se requiere hacer una zonificación de usos del suelo y limitar la expansión urbana hacia la zona plana de la ciudad, así de la delimitación de zonas protegidas por cárcavas para evitar rellenos en uso residencial.

Se resalta que los resultados obtenidos en este proyecto son preliminares por la falta de información. La mayoría de datos encontrados correspondían a la parte central de la ciudad de Tunja, mientras que hacia los límites urbanos, fueron muy pocos los datos que se encontraron y esto pudo haber influenciado los resultados.

El análisis multitemporal de fotografías aéreas permite establecer los cambios en los usos del suelo de la ciudad, así mismo, evaluar la expansión urbana y determinar áreas influenciada por rellenos antrópicos, con el fin de establecer zonas homogéneas para el comportamiento geotécnico del suelo.

### 3.9 Conclusiones

- El modelo inicial de microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja, presenta una base metodológica para la representación del comportamiento del suelo a partir de variables índice y clasificación a partir de ponderación por expertos.
- Se construyó un modelo de Sistemas de Información Geográfica (SIG), con software especializado, que permitió la organización, análisis y presentación de información de manera gráfica y alfanumérica como soporte del proyecto de microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja.
- Las variables geotécnicas que se definieron en el estudio fueron: propiedades índices, cohesión, estratigrafía, zonas de cárcavas, pendientes y correlaciones con Vs y SPT, dado que eran los datos de fuentes confiables y presentaban una dispersión adecuada dentro del área de estudio; el panel de experto avaló la selección de dichas variables. La propiedad relación de vacíos es necesaria incluirla dentro del modelo, se requiere realizar más ensayos de laboratorio para contar con mayor cantidad de datos dentro de toda la ciudad.
- La presencia de un depósito cuaternario en el valle del sinclinal de Tunja, genera una zona de susceptibilidad alta y media del suelo ante eventos sísmico. Dicha zona corresponde a proyectos urbanísticos de estratos 4, 5 y 6 de la ciudad.
- Los mayores indicadores de susceptibilidad se encuentran sobre el depósito fluvio-lacustre, en pendientes muy planas, por tales razones se hace necesario evaluar efectos locales por licuación de suelos.
- En los análisis geotécnicos se evidencio una zona crítica entre la glorieta y los barrios Mesopotamia, Rincón de la Pradera, Saucos de la Pradera, Santa Inés, El Estadio, donde se presentan materiales con las siguientes características, contenido de agua mayores a 60%, límites líquidos entre 35 a 70 %, límites plásticos entre 20 a 50%, índice plástico de 10 a mayores de 40%, índice que liquidez entre 0

y mayores a 1, cohesión entre 0,255 a 2,04 Kg/cm<sup>2</sup>, peso unitario de menores a 1,4 a 2 T/m<sup>3</sup>, suelos de consistencia baja, plasticidades altas a extremadamente altas, con comportamientos de un líquido lo que podría tratarse de turbas y materiales orgánicos entre profundidades de 3 a 9 metros.

- La ciudad de Tunja se encuentra, en su gran mayoría, sobre un perfil de suelo tipo D y algunas zonas al sur de la formación Bogotá y en los flancos oriental y occidental del sinclinal un perfil de suelo tipo C. La sismicidad de la zona es intermedia, por lo cual, se requiere con urgencia realizar ensayos dinámicos con el fin de avanzar en el estudio de microzonificación definitiva y demás estudios derivados de él.
- En la ciudad de Tunja, las pendientes varían entre un 0% al 64%. En las zonas correspondiente a los depósitos cuaternarios Fluvioacustre y Aluvial las pendientes son planas. Al norte, el depósito Coluvial está caracterizado por pendientes suavemente a fuertemente inclinadas y la formación Bogotá, al occidente y sur son fuertemente inclinadas con zonas aisladas de pendientes montañosas. La formación Tilotá al oriente de la ciudad, presenta pendientes planas a suavemente inclinadas.
- Las zonas de cárcavas predominan hacia el flanco oriental del sinclinal, principalmente sobre la formación Tilotá, las cuales en un 40% han sido rellenadas para proyectos urbanísticos. En los barrios Cooservicios y San Antonio, se presentan los mayores porcentajes de cárcavas rellenas. Por otro lado, en el flanco occidental del sinclinal, sobre la formación Bogotá, Cacho y el depósito Coluvial se presentan, en menor medida cárcavas rellenas para uso residencial, principalmente en los barrios Altamira y la Fuente.
- La zona de mayor susceptibilidad geotécnica se encuentra en el eje del sinclinal sobre el depósito Fluvioacustre, en los barrios Mesopotamia, Santa Inés, La María, UPTC, Estadio, Batallón, Las Quintas y las zonas comerciales del Centro Comercial Unicentro y Viva; todas estas zonas corresponden a estratos 4 a 6 de la ciudad. Así mismo, el flanco oriental del sinclinal, presenta zonas de susceptibilidad Media – Alta principalmente en las zonas de cárcavas rellenas para proyectos urbanísticos residenciales. La característica predominante de las zonas anteriormente mencionadas, es que se presenta en los estratos 4 a 6, áreas de gran concentración de habitantes (Universidades, Centros comerciales, empresariales y médicos) y nuevos desarrollos urbanísticos de carácter residencial con alturas importantes en las edificaciones. Adicionalmente, son zonas susceptibles a inundación según registros históricos de la ciudad.
- La expansión y desarrollo urbano de la ciudad de Tunja, en los últimos años se ha incrementado en el flanco oriental del sinclinal y sobre la zona plana de los depósitos cuaternarios, existen zonas de carácter

residencial construidas sobre cárcavas rellenadas. Dicha zona tiene una susceptibilidad media a alta, por lo cual se deberá conocer el efecto de amplificación de ondas por efecto de borde y por los rellenos antrópicos en la evaluación estructural de futuras edificaciones.

### 3.10 Recomendaciones

- Se recomienda actualizar constantemente la geodatabase con información primaria, y aumentar el volumen de información secundaria para mejorar las estimaciones de los modelos y cubrir en su totalidad la ciudad de Tunja. También, se recomienda validar la caracterización con la construcción de perfiles geotécnicos y así tener un acercamiento a una modelación en 3D del suelo de la ciudad.
- En las fases de recolección de información en campo, se hace necesaria la ejecución de ensayos de tipo dinámico, especialmente, aquellos que permitan determinar la velocidad de onda promedio a 30 m, la UPTC, con sede en Tunja, ha adquirido un sismógrafo que permitirá ejecutar dichos ensayos y recolectar los datos de forma sistemática, retroalimentando así la BDG y ejecutando nuevos análisis espaciales.
- Es necesario evaluar lo más pronto posible, el efecto sísmico sobre las zonas de susceptibilidad geotécnica Alta y Media, dado que es, precisamente en estas zonas, donde la expansión urbana se ha estado direccionando en los últimos años. Los nuevos proyectos urbanísticos de tipo residencial y comercial que se están desarrollando en las zonas de mayor susceptibilidad, son proyectos de ocupación especial como son centros comerciales y edificaciones habitacionales que supera los 15 pisos de altura.
- Se recomienda realizar un inventario de afloramientos rocosos a lo largo de la formación Bogotá, Tilatá y Cacho, ya que, ante la eventualidad de ondas sísmicas, el efecto de borde modifica el comportamiento de estas zonas.



# 4. IDENTIFICACIÓN DE TRAMOS DE TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE LÍQUIDOS PELIGROSOS CON POSIBLE AFECTACIÓN A ÁREAS SENSIBLES

Omar Javier Daza-Leguizamón  
Enrique Vera-López

## 4.1 Introducción

La importancia de los Sistemas de Información Geográfica, radica en su capacidad para soportar procesos de análisis y modelizado espacial para mejorar la toma de decisiones de problemáticas de índole espacial. En este capítulo se presenta el desarrollo metodológico adelantado al interior del Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de los Materiales, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, para identificar tramos de tuberías de transporte de líquidos peligrosos, con afectación a áreas de alta consecuencia. Los procedimientos de análisis descritos tienen como objetivo aportar información que permita implementar métodos de análisis de riesgo dentro de programas de gestión de integridad de tuberías de transporte de líquidos peligrosos.

### 4.1.1 Sistemas de Gestión de Integridad de Tuberías - SGIT

La norma técnica colombiana define los SGIT como un “Conjunto de procesos de mejoramiento continuo liderados por la alta dirección de una compañía operadora, orientados a garantizar la integridad del sistema de transporte de líquidos peligrosos por tuberías, teniendo como base el Programa de Gestión de Integridad (PGI), con el fin de preservar en todo momento la vida de las personas y el medio ambiente” (ICONTEC, 2012, p. 9). Los procesos asociados con estos sistemas incluyen la dirección, planeación, verificación, medición de la integridad de la tubería (Mora, Hopkins, Cote, & Shie, 2016, p. 3), y sirven como marco de referencia para ejecutar una efectiva gestión de la integridad (Goodfellow & Jonson, 2018, p. 5). Desde el punto de vista operacional, un SGIT, sigue los principios de un sistema de gestión, por lo tanto, puede representarse mediante el ciclo de Deming (LeBlanc, Kresic, Keane, & Munro, 2016; Mora et al., 2016; Rees, 2009). Este mismo enfoque del ciclo Planear-Implementar-Chequeo-Ejecución, es presentado en detalle

por Goodfellow y Jonson (2018). Uno de los componentes centrales de un SGIT, es la evaluación del riesgo como metodología para la priorización de las acciones que permitan la adecuada gestión de la integridad de una tubería.

La estimación del riesgo puede expresarse matemáticamente como el producto entre la frecuencia de falla y las consecuencias. Lo cual conduce a que un incremento en cualquiera de los dos factores, o los dos a la vez, conlleva un incremento en el valor del riesgo. La estimación se suele hacer utilizando diferentes métodos que varían dependiendo de la forma en la que se valoran o calculan la frecuencia de falla, la consecuencia y el riesgo; los métodos se clasifican en cuantitativos, semicuantitativos, cuantitativos y cualitativos (Dziubinski, Fraczak, & S., 2006, p. 399; Mora et al., 2016, p. 144). Los métodos cualitativos dependen, principalmente, de las experiencias de los expertos, quienes, con base en su conocimiento del sistema y de las posibles consecuencias, pueden establecer clasificaciones de la tubería asignar índices y valorar el riesgo (American Petroleum Institute, 2013, p. 23; Mora et al., 2016, p. 144). Los métodos cuantitativos cubren todas aquellas técnicas que calculan el riesgo como una función matemática, que involucra el análisis de probabilidades de falla y cuantificación de los costos asociados con esta (American Petroleum Institute, 2013, p. 24; Cunha, 2016; ICONTEC, 2012, p. 46). En el medio de los métodos descritos están los métodos semicuantitativos, los cuales requieren del uso de una función matemática para calcular el riesgo, aunque, la estimación de la frecuencia de falla y las consecuencias pueden ser obtenidas a partir de clasificaciones y valoraciones relativas a partir de índices. Las metodologías propuestas e implementadas en este capítulo, se clasifican en este último grupo.

#### **4.1.2 Consecuencias espaciales como componente de estimación del riesgo**

Las consecuencias causadas por el derrame del líquido peligroso transportado por una tubería, pueden ser clasificadas dependiendo de si tienen, o no, un componente espacial. Las consecuencias a la seguridad, regulatorias financieras y al negocio, por ejemplo, no tienen un componente espacial y su magnitud no dependerá directamente de la localización de la tubería. Por otro lado, las consecuencias a la salud, al ambiente y a la comunidad dependen de su proximidad a la tubería, además de la ruta de derrame de un posible derrame hasta cada una de ellas. Dentro de esta última categoría, surgen los términos de “áreas de consecuencia”, “áreas de alta consecuencia” y “ubicaciones críticas”. Las ubicaciones críticas incluyen, según el RP API 1160, áreas pobladas, cuerpos de agua con navegación comercial, recursos de agua

para consumo humano o áreas ambientalmente sensibles. Estas ubicaciones críticas, coinciden con las estipuladas, como áreas de alta consecuencia, en el 49 CFR 195.450, y, por lo tanto, se concluye que estos términos se pueden adoptar como sinónimos. En cuanto a las áreas de consecuencia, definidas por la NTC 5901, incluye además de la categoría de alta consecuencia, las de media y baja consecuencia. De aquí en adelante, cada vez que se mencionen en este documento las áreas de consecuencias, se estará haciendo referencia a aquellas que tienen un componente espacial.

Las consecuencias dependen de la estructura y la dinámica espacial del territorio, por consiguiente, pueden incrementarse o reducirse dependiendo de los cambios de los elementos y de las interacciones entre ellos. Además, se deben considerar las características y propiedades de la tubería y del líquido transportado, junto con la estimación del volumen de líquido liberado, porque de ese depende el nivel de consecuencia (Cunha, 2016). Los principales aspectos a tener en cuenta durante el análisis de consecuencias son (Mora et al., 2016, p. 115):

- Tipo de fluido y propiedades.
- Características de la tubería y del flujo.
- Características del medio ambiente.
- Sensibilidad y proximidad de los receptores.

La selección de los elementos geográficos se puede hacer siguiendo los lineamientos establecidos por el código 49 CFR 195.450, y la norma NTC 5901. A continuación, se presenta la clasificación de áreas de alta consecuencia establecidas en el Código Federal de Regulaciones de los Estados Unidos, y el listado de aspectos a considerar para seleccionar las áreas de alta, media y baja consecuencia según la NTC colombiana. Las áreas de alta consecuencias están conformadas por:

- Cuerpo de agua con navegación comercial: cuerpo de agua en el cual existe alguna probabilidad de presentarse navegación comercial.
- Áreas densamente pobladas: áreas urbanizadas, de acuerdo con la definición y delimitación de la Oficina de Censo de los Estados Unidos (EU), que contenga 50.000 o más habitantes y que tenga una densidad de al menos 1.000 personas por milla cuadrada (386 personas por kilómetro cuadrado).
- Otras áreas pobladas: es un lugar, de acuerdo con la definición y delimitación de la oficina de censo de los EU, que contiene población concentrada, tales como una ciudad, pueblo villa, u otra área residencial o comercial designada, ya sean incorporadas o no incorporadas.
- Área inusualmente sensible: Están definidos en el 49 CFR 195.6 y se

mencionan las captaciones de agua para consumo humano, las áreas de protección de las fuentes de agua para consumo humano y las zonas de recarga de acuíferos.

Los aspectos por considerar para identificar las áreas de consecuencia (alta, media y baja), según la NTC son:

- a) “La densidad de población,
- b) Número de unidades habitacionales,
- c) Áreas recreativas y lugares públicos,
- d) La cantidad y calidad de los recursos naturales (áreas ambientalmente sensibles, áreas con especies en peligro de extinción, entre otras).
- e) Boca tomas y pozos de acueductos utilizados para consumo humano
- f) Planes de ordenamiento territorial
- g) Instalaciones industriales
- h) La(s) licencia(s) ambiental(es)
- i) Requisitos y prescripciones establecidas por las entidades competentes y regulaciones nacionales vigentes.
- j) Vías navegables, vías férreas, autopistas, carreteras nacionales”

El proceso para determinar la afectación causada por un derrame desde la tubería, requiere del procesamiento y análisis de datos espaciales de cada una de las áreas de consecuencia. En este contexto, los sistemas de información geográfica, han sido una herramienta de uso obligado cuando se presentan estudios para identificar y evaluar la afectación a elementos geográficos con diferentes niveles de vulnerabilidad.

En cuanto a los efectos negativos causados por un derrame sobre las áreas de alta consecuencia, existen varios estudios que los reportan. Estos efectos son muy variados y en este párrafo se describen algunos ejemplos. Laffon y otros (2016), realizaron una revisión de estudios en los que se clasificaron los efectos sobre la salud humana como efectos sobre la salud mental, efectos físicos o fisiológicos, y genotóxico, inmunotóxico y toxicidad endocrina. Las consecuencias también están asociadas a factores sociales, como se describe en la revisión hecha por Chang y otros (2014), existiendo un espectro completo de pérdidas socioculturales que puede tener un impacto en la estructura social y la estabilidad de la comunidad y erosionar aún más la productividad y la participación económica. Además, las poblaciones rurales o indígenas se pueden ver afectadas por el daño del entorno natural, del cual depende su subsistencia o sus actividades socioculturales. Desde el punto de vista del uso agrícola, los productos refinados del petróleo, pueden producir cambios en las características fisicoquímicas del suelo (Obire & Nwaubeta, 2002), situación

que logra implicar baja fertilidad del suelo y en consecuencia, reducción de la productividad agrícola (Osuji & Nwoye, 2007). Los efectos en ecosistemas acuáticos, pueden ser efímeros o duraderos. Algunos componentes químicos se disuelven en el agua y matan a las criaturas acuáticas, mientras que otros, por ejemplo, los hidrocarburos aromáticos policíclicos, pueden persistir en el agua y causar efectos crónicos sobre la salud de las especies acuáticas (Lee et al., 2015). La afectación de cuerpos de agua superficiales o subterráneos, desde los cuales se extrae agua para consumo humano, tiene una afectación sobre la continuidad de la distribución del recurso hídrico a las comunidades asociadas. Lo cual conlleva a efectos sobre la salud y calidad de vida de la población que sufre el desabastecimiento. En la revisión bibliográfica hecha por Chang y otros (2014), encontraron que las vías de toxicidad en diferentes especies son innumerables, y algunos ejemplos, pueden incluir la ingestión con petróleo, la acumulación de contaminantes en los tejidos, el daño al ADN, la disfunción cardíaca, la mortalidad masiva de huevos y larvas. En peces, la pérdida de flotabilidad y en aves, el aislamiento y la inhalación de vapores.

### **4.1.3 Análisis espacial**

El análisis espacial es un término utilizado para agrupar las transformaciones, manipulaciones y métodos aplicados a datos espaciales, o geográficos, para crear nuevos datos, agregarles valor, revelar patrones y anomalías, mejorar nuestro entendimiento del fenómeno representado y soportar decisiones (Blyth et al., 2007, p. 40; Huisman & de By, 2009, p. 56; Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2015, p. 291). El término hace referencia al uso de datos localizados en el espacio, por lo que, en principio, se supone que su aplicación no es exclusiva a datos geográficos; sin embargo, los referentes bibliográficos citados en esta definición, están enmarcados en aplicaciones de sistemas de información geográfica y de la ciencia de la información geográfica. Estos datos geográficos son representaciones digitales de elementos o fenómenos, localizados en la superficie terrestre, a través de modelos de datos raster y vector. Los métodos, manipulaciones y transformaciones, son un vasto conjunto de algoritmos implementados en una gran diversidad de programas de computador y su uso depende del tipo de dato geográfico a ser analizado. A pesar de que el análisis espacial no está exclusivamente relacionado con el uso de computadores (también se pueden aplicar manipulaciones con datos y métodos análogos), hoy en día, es la forma más popular para procesar datos, gracias a los acelerados avances de las ciencias informáticas.

El término análisis espacial, también es ampliamente utilizado para referirse a la aplicación de métodos estadísticos, matemáticos o computacionales para describir, caracterizar, entender, crear y visualizar el orden, el patrón y la estructura de fenómenos geográficos (Wolf & Murray, 2017). En este contexto, se considera que la localización les confiere a los datos las propiedades de dependencia y heterogeneidad espacial (Anselin, 1992, p. 4; Anselin, Murray, & Rey, 2013), por lo que centra su aplicación a datos representados como patrones de puntos, datos geoestadísticos y datos reticulares (Cressie, 1993). Los datos de elementos discretos localizados en el espacio se representan por patrones de punto, los datos geoestadísticos, corresponden con valores muestreados de una variable continua en el espacio y los datos reticulares son valores asociados a áreas de forma regular o irregular. Este tipo de análisis espacial resalta la importancia de la integración de la localización y los atributos de los datos espaciales, considerando que la localización le aporta información valiosa adicional al dato, sin el componente de ubicación. Los métodos de análisis espacial, en este caso, incluyen el análisis exploratorio de datos espaciales, la regresión espacial, la optimización espacial y la geosimulación (Wolf & Murray, 2017).

#### **4.1.4 Análisis espacial y áreas de alta consecuencia**

Los sistemas de tuberías son generosamente utilizados para el transporte de hidrocarburos desde su lugar de explotación, o procesamiento, hasta el lugar de distribución. Las tuberías pasan por zonas con variadas características que pueden afectar tanto su integridad, como las consecuencias asociadas a fallas. Para minimizar los impactos ambientales negativos causados por la ruptura de estos sistemas, se implementan acciones que reduzcan los eventos de derrame y las consecuencias sobre el medio ambiente y la población. Para controlar las consecuencias, es necesario conocer la integridad de la tubería, así, como simular los derrames para identificar las áreas que podrían verse afectadas. Para la realización de estos estudios es recomendable considerar aspectos como la normatividad vigente, las metodologías a ser aplicadas y la disponibilidad de información. Para alcanzar estos objetivos, los operadores de la infraestructura de transporte de hidrocarburos han incluido, dentro de sus sistemas de gestión de ductos, métodos para la priorización de sus tareas de mantenimiento que involucren estos posibles impactos negativos. Para lo cual, se han implementado metodologías, que centradas en la gestión basada en el análisis del riesgo (Bertolini, Bevilacqua, Ciarapica, & Giacchetta, 2009), identifican la probabilidad de falla y la consecuencia ante una pérdida de líquido en la tubería. Finalmente, estas metodologías evalúan el riesgo para la

implementación y priorización de medidas de mitigación y de mantenimiento, con el fin de reducir la consecuencia o la probabilidad de falla.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son una herramienta para la toma de decisiones. Estos integran la información espacial y alfanumérica en un mismo entorno, facilitando el análisis de las relaciones espaciales de elementos del medio ambiente. De ahí, que, en la gestión de obras de infraestructura lineal se estén, desde hace más de una década, implementando sistemas de gestión basados en SIG. La gestión de oleoductos, por ejemplo, debe considerar información relacionada con la integridad de la tubería (Perich, Van Oostendorp, Puente, & Strike, 2003), las áreas de alta consecuencia (AAC), los costos de mantenimiento (Garaci, Sutherland, & Mergelas, 2002), la evaluación de riesgos y los planes de respuesta a emergencias (Palmer, 2004); información que al ser integrada, facilita el análisis en tiempos más cortos y de forma más precisa y confiable durante el ciclo de vida de la infraestructura (Dueñas Vaca, Sepulveda Hurtado, Vera López, Pineda Triana, & Africano Higuera, 2007; Kennedy, 2002). Un importante aporte de los SIG, a la gestión de integridad de oleoductos, está relacionado con la implementación de operaciones de análisis espacial para la identificación y cuantificación objetiva de los tramos de la tubería que pueden afectar un área de alta consecuencia. Esta identificación es insumo para la posterior evaluación del riesgo en la tubería y, en consecuencia, para la elaboración de planes de mantenimiento más efectivos.

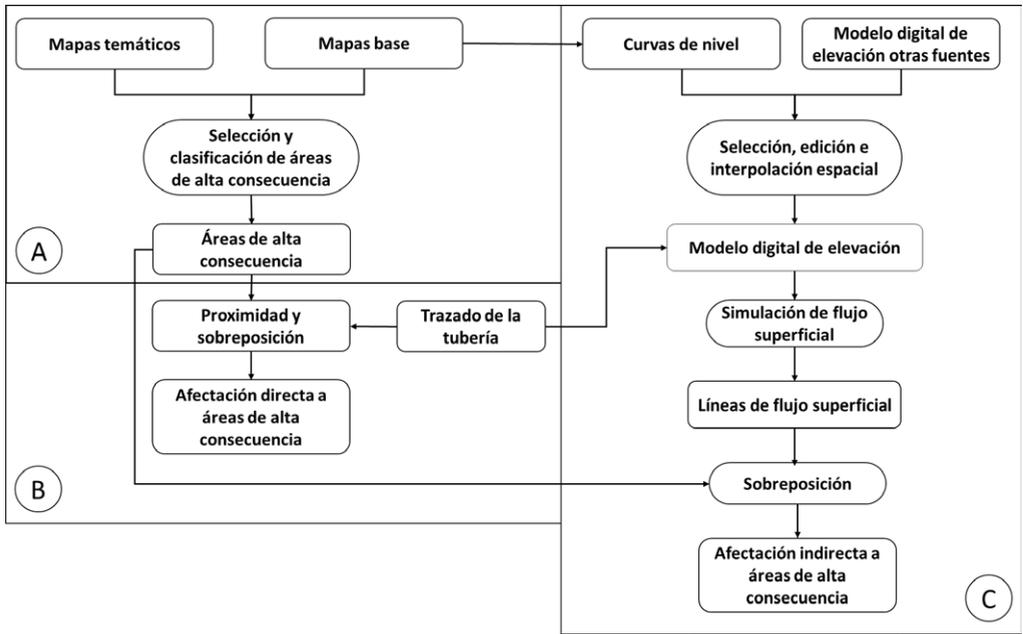
La identificación de tramos o puntos de la tubería, que pueden afectar áreas de alta consecuencia, debe considerar los casos en que el impacto es directo e indirecto con relación a su localización espacial (Odegard & Humber, 2005). En las AAC impactadas directamente, la tubería atraviesa el área y su identificación es sencilla, utilizando operaciones de análisis de sobreposición. En las áreas de alta consecuencia impactadas indirectamente, la tubería se encuentra a una proximidad determinada, y el derrame puede alcanzarla a través de transporte sobre la superficie de la tierra o a través de transporte por canales, por lo que los análisis a realizar suelen ser más complejos (Odegard & Humber, 2005; Paige, Park, & Posner, 2003). En general las herramientas para la modelación de derrames y determinación de impacto ambiental, tienen en cuenta tres fuentes de información principales: el trazado de la tubería, la localización de los elementos ambientalmente sensibles y los datos para la modelación del flujo superficial (Bertolini et al., 2009). Los requerimientos de información para la implementación de análisis exhaustivos, son el modelo digital de elevación, la localización del derrame, las características del derrame, el tipo de flujo, las propiedades del fluido y

las condiciones ambientales (Denby & Humber, 2004; Jia, Feng, Zhou, & Yu, 2009; Meehl, 2004; Odegard & Humber, 2005; Paige et al., 2003). En cuanto a la precisión de los datos espaciales ingresados en los análisis, se ha utilizado cartografía 1:50.000 (Jia et al., 2009), mientras que la información de más fácil adquisición puede variar de 1:100.000 a 1:500.000, situación que debe ser estudiada debido a la incidencia de la escala en la identificación de áreas a ser impactadas ambientalmente (Joao, 2002).

## **4.2 Metodología para la identificación de tramos**

A continuación, se presenta una metodología, basada en análisis espacial con sistemas de información geográfica, para la determinación de tramos de tubería con afectación directa e indirecta, a áreas de alta consecuencia en sistemas de transporte de líquidos peligrosos. Los procesos de análisis implementados tienen en cuenta estudios adelantados internacionalmente y la experiencia que el Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de los Materiales, ha acumulado en los últimos años, prestando servicios de consultorio en esta área. El desarrollo metodológico tuvo en cuenta la norma técnica NTC-5901 (ICONTEC, 2012), el estándar API 1160 (American Petroleum Institute, 2001) y el Decreto 49 CFR 195 de los Estados Unidos. La metodología tiene tres componentes principales; en el primero, se realizó la identificación y selección de áreas de alta consecuencia a partir de información primaria y secundaria (Figura 4-1- A). En el segundo, se identificaron los tramos de la tubería que podrían afectar inmediatamente a las áreas de alta consecuencia (Figura 4-1- B). En el tercero, se identificaron de áreas de alta consecuencia afectadas después de presentarse un transporte del derrame por la superficie del terreno y por la red hídrica (Figura 4-1- C).

**Figura 4-1** Metodología para identificar la afectación de derrames.



Fuente: Autores

Adicional a la identificación de tramos de afectación, se desarrolló una herramienta que permite simular el área afectada por el derrame, la cual fue complementaria a las desarrolladas con los componentes B y C de la figura. Teniendo en cuenta que el proceso de simulación del derrame para delimitar el área afectada requirió mayor tiempo de procesamiento en computador, se pretendió que esta herramienta sirviera para analizar con mejor detalle de zonas particulares con alta complejidad en su estructura y dinámica espacial. Sin embargo, la simulación no incluyó todos los fenómenos físicos asociados con el flujo superficial, por lo tanto, su uso se limitó al estudio de identificación de áreas de alta consecuencia.

#### 4.2.1 Áreas de alta consecuencia y fuentes de información

La selección y definición de las áreas de alta consecuencia, se hizo utilizando como base la normatividad de los Estados Unidos y la norma técnica colombiana NTC 5901. Las áreas de alta consecuencia se dividieron en afectación a la población, afectación el medio ambiente y afectación a la infraestructura de transporte. En el primer grupo, se clasificaron las zonas urbanas y otras áreas con concentraciones de población. El segundo grupo, estuvo conformado por

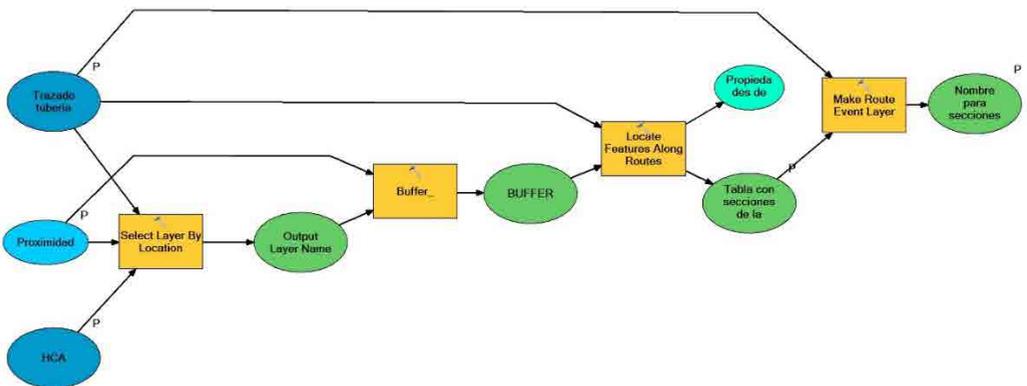
las áreas naturales protegidas, las corrientes hídricas, los puntos de captación de agua y las áreas de importancia ecológica. El tercer grupo, lo conformaron las corrientes hídricas navegables, las carreteras primarias y la red férrea. Las áreas con concentración de población como: iglesias, coliseos, cementerios, establecimientos educativos y hoteles. Las áreas protegidas incluyeron los parques nacionales naturales, las reservas forestales protectoras, los parques naturales regionales, los distritos de manejo integrado, los distritos de conservación de suelos y las áreas de recreación (Decreto 2372 de 2010). En las áreas de importancia ecológica se sobrepusieron las áreas de importancia para la conservación de aves, las áreas con bosque tropical seco, los complejos de páramos y los humedales Ramsar. Los cuerpos de agua navegables estuvieron conformados por todos aquellos ríos y cuerpos de agua en los que hay alguna posibilidad de transporte de forma permanente o en temporadas del año (ARCADIS Nederland BV & JESYCA S.A.S., 2015). Las carreteras nacionales incluyeron la red de carreteras que comunican a las capitales de los departamentos del país, y por las cuales se transportan los mayores volúmenes de carga. Las vías férreas, aunque son casi exclusivamente utilizadas para el transporte de carbón (Márquez, 2017), siguen siendo de gran importancia económica para el país.

La adquisición de datos espaciales de las áreas de alta consecuencia es relativamente sencilla hoy en día. El constante desarrollo de infraestructuras de datos espaciales facilita la distribución de datos, espaciales y no espaciales a través de servicios web, haciéndola asequible a cualquier usuario con acceso a internet. Las fuentes de datos para las áreas de alta consecuencia, fueron principalmente las entidades del estado que publican la información espacial a través de portales en internet. Los datos sobre distribución de la población se extrajeron directamente de la cartografía base, producida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC y fueron descargados de la página <https://geoportal.igac.gov.co/>. Los datos del segundo grupo, el componente ambiental, fueron descargados del portal del Sistema de información ambiental de Colombia, <http://www.siac.gov.co/>. Las carreteras, vías férreas y corrientes hídricas navegables se extrajeron de la cartografía base del IGAC, siendo necesaria la clasificación de las carreteras utilizando los tipos establecidos por el Instituto Nacional de Vías (Invias, 2008). En cuanto a los modelos digitales de elevación requeridos para simular el flujo superficial, se obtuvieron mediante interpolación espacial de curvas de nivel de la cartografía base del IGAC y de descargas del sitio de *Alaska Satellite Facility* (ASF DAAC, 2015), de productos obtenidos a partir de imágenes de la misión ALOS PALSAR con tamaño de pixel 12.5 metros.

### 4.2.2 Identificación de tramos con afectación directa a AAC

Para la identificación de los tramos de tubería relacionados con impactos directos a AAC, se implementó un modelo basado en los desarrollos (Meehl, 2004; Gamarra, 2011; Jia, Feng, Zhou, & Yu, 2009), que utilizó herramientas de referencia lineal (Figura 2). El ducto se representó mediante modelos de datos vector con geometría línea, la cual estuvo compuesta por nodos y segmentos de líneas entre estos. Cada uno de los nodos estaba almacenado a partir de su localización con coordenadas en los ejes cartesianos X, Y y Z. Adicionalmente, se pudo complementar una característica anexa para cada nodo, la cual correspondió a la distancia medida desde el punto inicial de la tubería. La utilidad de esta característica adicional, radicó en que en la práctica la ubicación sobre elementos lineales se realizó con base en la medición de su longitud. Para el caso de la tubería, por ejemplo, una válvula se puede ubicar en la abscisa 45+500, es decir, a 45500 metros desde su inicio, y de igual forma, cada tramo con afectación a áreas de alta consecuencia, se puede expresar mediante su ubicación mediante referencia lineal.

**Figura 4-2** Metodología para identificar la afectación inmediata de derrames.



Fuente: Autores

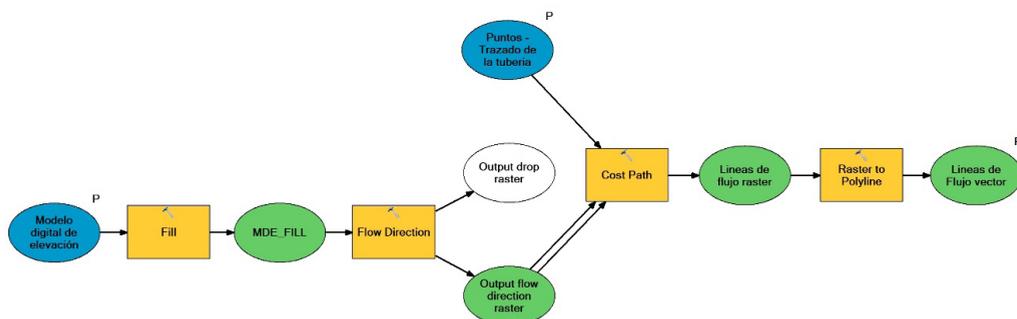
En los modelos generados con la herramienta *Model Builder* de ArcMap, los datos de entrada se representan de color azul, las herramientas de color amarillo y los datos intermedios y finales de color verde. Los datos de entrada, fueron el área de alta consecuencia (representada en geometría punto, línea o polígono), el trazado de la tubería (con el atributo adicional para poder realizar la referencia lineal) y la proximidad de análisis. Los valores de proximidad utilizados fueron de 265 metros para la afectación a población, 200 metros para

áreas ambientalmente sensibles, 100 metros corrientes hídricas navegables y 50 metros para carreteras y vías férreas. En el primer paso, se seleccionaron los elementos que pueden ser afectados directamente en la capa correspondiente. Esta selección se realizó para reducir el tiempo de ejecución de la herramienta, ya que los procesos siguientes solo se realizaban sobre los elementos seleccionados. La consecutiva operación de análisis, fue la delimitación de un área de proximidad alrededor del área de alta consecuencia. En este primer paso, se obtuvo un polígono que representó el AAC y su área de afectación inmediata. Partiendo del anterior resultado y del trazado del ducto calibrado, se implementó una sobreposición que permitió determinar las distancias (a lo largo del trazado) del punto inicial y final del tramo, con afectación inmediata a áreas de alta consecuencia. Este resultado se almacenó en una tabla que puede ser visualizada espacialmente mediante segmentación dinámica.

#### **4.2.3 Identificación de tramos con afectación después de transporte a AAC.**

Para la determinación de tramos de tubería con afectación por transporte del derrame a áreas de alta consecuencia, se requirió de un modelo digital de elevación para modelar el flujo superficial desde cualquier punto en el trazado de la tubería. Los datos de entrada al proceso de análisis, fueron, el modelo digital de elevación y los puntos equidistantes sobre el trazado de la tubería. El modelo digital de elevación utilizado, tiene una resolución espacial de 30 metros y fue obtenido mediante interpolación espacial, por medio del uso de la herramienta *Topo To Raster* de ArcGIS. La obtención de puntos equidistantes se realizó utilizando las herramientas de referencia lineal, creando una tabla en la que se ingresaron las distancias equidistantes sobre la ruta en cada fila, cada una de las filas de la tabla, fue representada espacialmente de acuerdo con valor de distancia almacenado. Esta representación era temporal por lo que, finalmente, se exportaron los puntos a una nueva capa.

**Figura 4-3** Proceso de análisis espacial para representar líneas de flujo superficial.



Fuente: Autores

El modelo de la Figura 4-4., utilizó herramientas de análisis espacial para datos raster, y tuvo por objetivo, representar las líneas de flujo utilizando como criterio para su identificación la máxima pendiente del terreno. Tomando el MDE, se calculó la capa de dirección flujo, en la cual se representaron la dirección del flujo para una ventana móvil de 3x3 píxeles desde el píxel central hacia el píxel con mayor diferencia de elevación. En el raster de dirección de flujo, se almacenaron los valores de 1 para dirección este, 2 para dirección sur este, 4 para dirección sur, 8 para dirección sur oeste, 16 para dirección oeste, 32 para dirección noroeste, 64 para dirección norte y 128 para dirección noreste. Antes de calcular la dirección de flujo se debía tener un modelo digital de elevación sin sumideros, por lo que se aplicó el llenado de estos sectores con la herramienta *Fill*. Para la modelación del flujo superficial, se utilizaron herramientas de ruta más corta, que permitieron representar el camino predominante que seguiría un eventual derrame. El último paso del modelo, fue la transformación de las líneas de flujo de modelo de datos raster a vector.

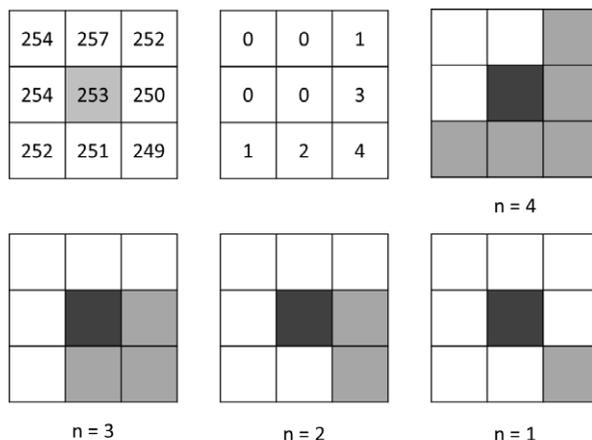
#### 4.2.4 Representación del área afectada por un derrame

En los procesos anteriores, el objetivo fue identificar tramos con afectación directa e indirecta. En este apartado se muestra un ejemplo de cómo se logró una representación más detallada del fenómeno de derrame. Para esto, se hizo uso del modelo digital de elevación, para distribuir el derrame desde un píxel de origen hacia los píxeles de menor elevación. Un ejemplo de este tipo de representación de derrames, se puede encontrar en el trabajo publicado por Daza-Leguizamón y otros (Daza-Leguizamón, Vera-López, & Riaño-Cano, 2016). En ese estudio se tuvieron como datos de entrada, en el proceso de análisis espacial, el origen del derrame, el volumen del derrame y los

parámetros de la ecuación de Manning. En la primera iteración, el volumen se distribuyó, proporcionalmente a la diferencia de elevación, hacia las celdas vecinas de menor altura en una ventana de vecindad de 3x3. Este enfoque tuvo como principal limitante, que su aplicación con modelos digitales de elevación de media o baja resolución espacial, suele sobreestimar el área afectada, además de que por la pérdida de detalles del terreno el flujo no siguió la dirección correcta.

La propuesta presentada aquí, tiene el mismo principio utilizado en el estudio descrito, con la diferencia de que no se utilizó un volumen inicial de derrame ni la ecuación de Manning. El objetivo del proceso de análisis espacial fue identificar los pixeles que podrían ser afectados por el derrame. En esta propuesta, inicialmente se identificaron las diferencias de elevación en los pixeles vecinos, luego, se listan estas diferencias de menor a mayor, teniendo un máximo de 8 valores, para el caso en el que los pixeles vecinos tuvieran valores diferentes y fueran de menor elevación del píxel central, y un mínimo de 1. El número de pixeles afectados en la primera iteración, estuvo determinado por el parámetro  $n$ , el cual es el número de diferencias de elevación a considerar. El funcionamiento del algoritmo implementado como un *script* de Python para ArcGIS Desktop, se representa en la Figura 4-4. Para el caso de un  $n = 4$  se consideraron las cuatro diferencias de elevación (1, 2, 3 y 4) con afectación a cinco pixeles, en el caso de  $n = 3$ , se tomaron tres diferencias de elevación con afectación a tres pixeles y de igual forma, para los valores de  $n$  iguales a 2 y 1, como se puede ver en la figura. El proceso descrito muestra la primera iteración, en las siguientes iteraciones los pixeles centrales fueron aquellos que se marcaron como afectados en la iteración anterior.

**Figura 4-4** Distribución del derrame en una vecindad de 3x3 pixeles.



Fuente: Autores

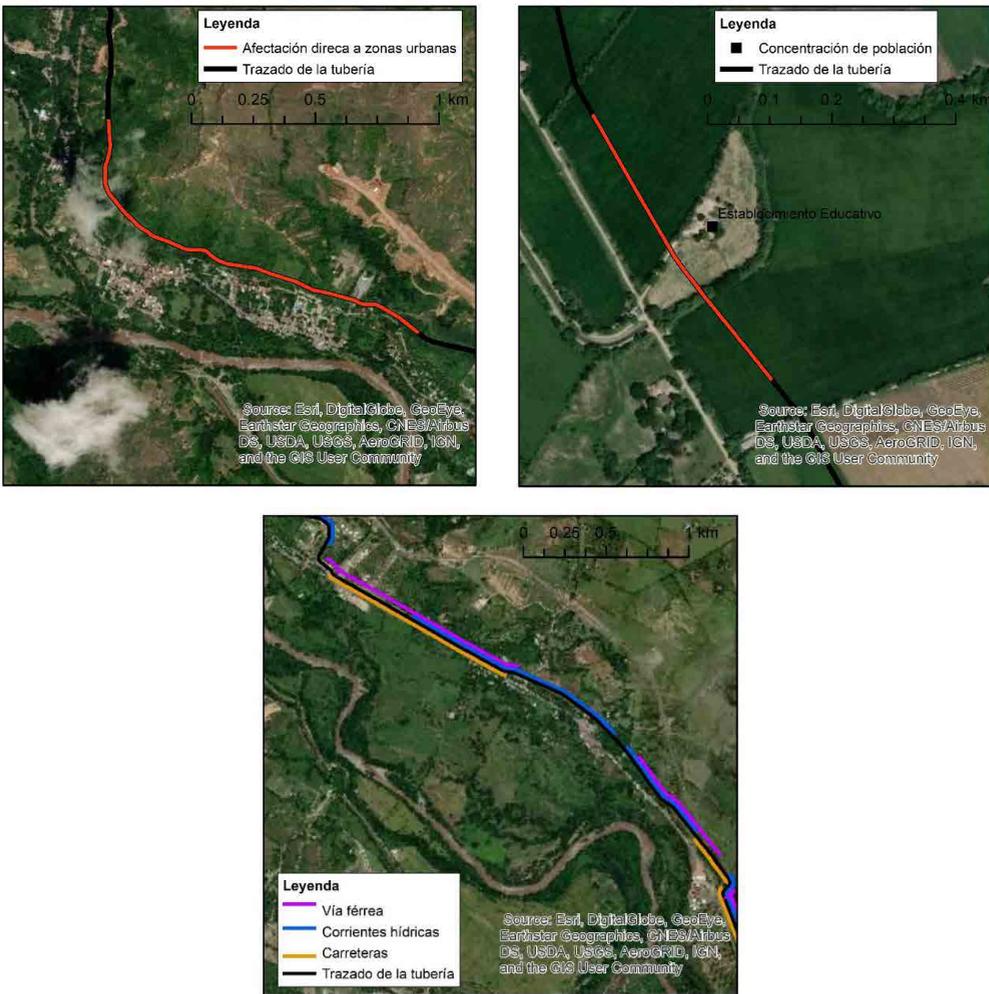
Este enfoque permitió controlar el área afectada, dependiendo de la resolución espacial del modelo digital de elevación. Se supuso que, para modelos de baja resolución espacial, se utilizaría un valor de  $n$  pequeño, para resoluciones espaciales medias valores medios y para modelos de alta resolución espacial valores altos. Es importante notar, que el caso de  $n = 1$  el resultado será diferente al obtenido en la Figura 4-3., porque se tiene la posibilidad de afectar a más de un píxel; más adelante se presenta un ejemplo comparativo con diferentes valores de  $n$ . También es claro, que, al introducir un valor de  $n$  constante, el número de pixeles afectados en las siguientes iteraciones fue diferente al número de pixeles afectados en la primera iteración.

### 4.3 Aplicación de la metodología

La implementación de los procesos de análisis propuestos, permitió un análisis más apropiado de la interacción de la tubería con el medio. Para la identificación de tramos con afectación directa e indirecta, se eligió un tramo de aproximadamente 100 kilómetros de un poliducto ubicado en la vertiente occidental del del Río Magdalena. El área de afectación frente a eventos de derrames, se encuentra ubicada entre el trazado de la tubería y el mencionado río. En esta franja, se encontraron quince zonas urbanas, alrededor de 400 puntos con concentraciones de población, zonas de bosque seco, cuatro captaciones de agua superficial, una densa red de corrientes hídricas que vierten al Río Magdalena, carreteras nacionales y parte de la red férrea nacional. El trazado de la tubería fue obtenido del portal en internet de Sistema de Información Ambiental de Colombia.

A continuación, se muestran algunos ejemplos ilustrativos de los resultados de la aplicación de la metodología. Los resultados fueron presentados por medio de mapas que representan el trazado de la tubería y los tramos con afectación a cada uno de los elementos, permitiendo la identificación visual de los sectores con mayor posibilidad de ser afectados por el derrame. Los resultados también fueron presentados en forma de tablas, en las cuales se resumen los tramos, indicando su abscisa de inicio y finalización. Los datos tabulares podrían ser exportados para ser utilizados en otros softwares para la evaluación del riesgo dentro de los programas de gestión de integridad.

**Figura 4-5** Ejemplo afectación directa a una zona poblada.



Fuente: Autores

En la Figura 4-5., se puede ver un ejemplo de un tramo con posible afectación a una zona poblada y a un establecimiento educativo. Las líneas rojas representan la longitud de la tubería que se encuentra a 265 metros o menos de cada elemento. La longitud con afectación a la zona urbana es de 1.7 kilómetros y 518 metros, al establecimiento educativo. De forma similar, se pudieron representar los resultados para las otras áreas de alta consecuencia. En este primer resultado no se tuvieron en cuenta las características del relieve, por lo que se asumió que la afectación directa se presentaría de forma independiente a la dirección que tome el fluido una vez liberado. En esta misma figura se puede ver un sector del ducto que presenta afectación a más de un área de alta consecuencia. El análisis visual es un gran aporte para la toma de decisiones, aunque estos resultados podrían ser sintetizados para identificar los tramos con afectación a varias áreas sensibles.

Un ejemplo de los resultados en forma tabular, se puede ver en la siguiente figura, donde se presentan los tramos con afectación directa a áreas de bosque seco. En total, se encontraron 14 tramos que suman aproximadamente 12 kilómetros de tubería, con posible afectación a esta área de alta consecuencia. El tramo de menor longitud tuvo 484.5 metros, el de mayor longitud 1846.4 metros y el promedio de longitud para los tramos fue de 861.5 metros.

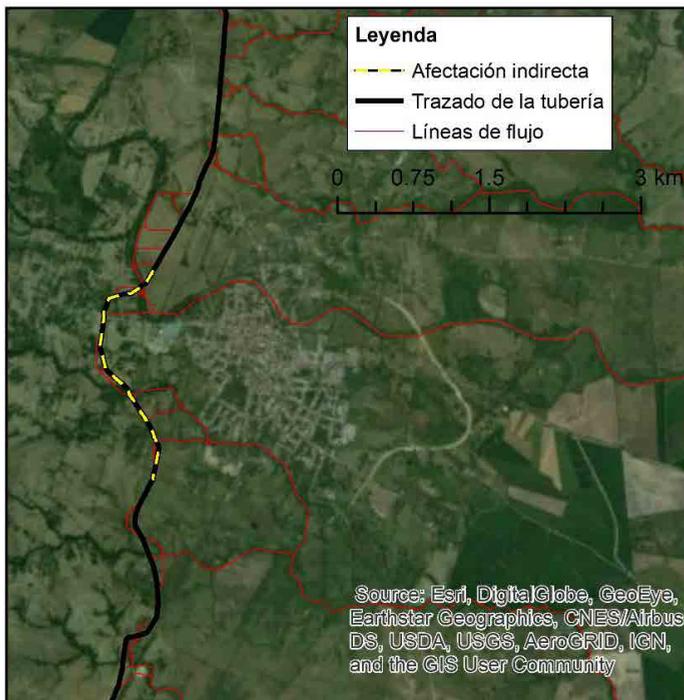
**Figura 4-6** Tabla con tramos de afectación a bosque seco.

OBJECTID *	RID	FMEAS	TMEAS	Longitud
1	1	1403.0837	2597.5485	1194.4648
2	1	2986.7855	4498.7814	1511.9959
3	1	5943.7117	7790.1435	1846.4318
4	1	7997.7826	9075.5267	1077.7441
5	1	9319.8052	9925.8379	606.0327
6	1	10566.9117	11221.8233	654.9116
7	1	11801.4557	12368.6837	567.228
8	1	14172.2377	14722.7439	550.5062
9	1	16047.6803	16533.6946	486.0143
10	1	16542.3829	17026.8695	484.4866
11	1	18881.9405	19503.9028	621.9623
12	1	20133.6408	21415.6945	1282.0537
13	1	37684.9653	38361.9019	676.9366
14	1	91368.7839	91869.3756	500.5917

Fuente: Autores

La implementación del proceso para identificar la afectación indirecta a áreas de alta consecuencia, se inició con la conversión del trazado de la tubería, en geometría línea, a puntos equidistantes. Para este caso, se eligió una distancia de 200 metros entre puntos consecutivos. En la Figura 4-7., se muestra un ejemplo de un tramo con afectación indirecta a una zona urbana. El tramo identificado tenía una longitud de 2540 metros, desde los cuales inician las líneas de flujo, que convergieron a dos corrientes hídricas, que pasan a lado y lado de la zona urbana. Las líneas de flujo representadas, dieron un indicativo de la ruta principal seguida por el derrame, por lo tanto, no cuantificaron el área total afectada. Además, la propuesta presentada aquí, puede ser mejorada incluyendo simulaciones que consideren el tiempo de avance del derrame, el volumen infiltrado y el volumen evaporado. Para los propósitos de identificación de tramos con afectación el proceso de la Figura 4-3 se considera aceptable y eficiente.

**Figura 4-7** Ejemplo afectación indirecta a una zona poblada.

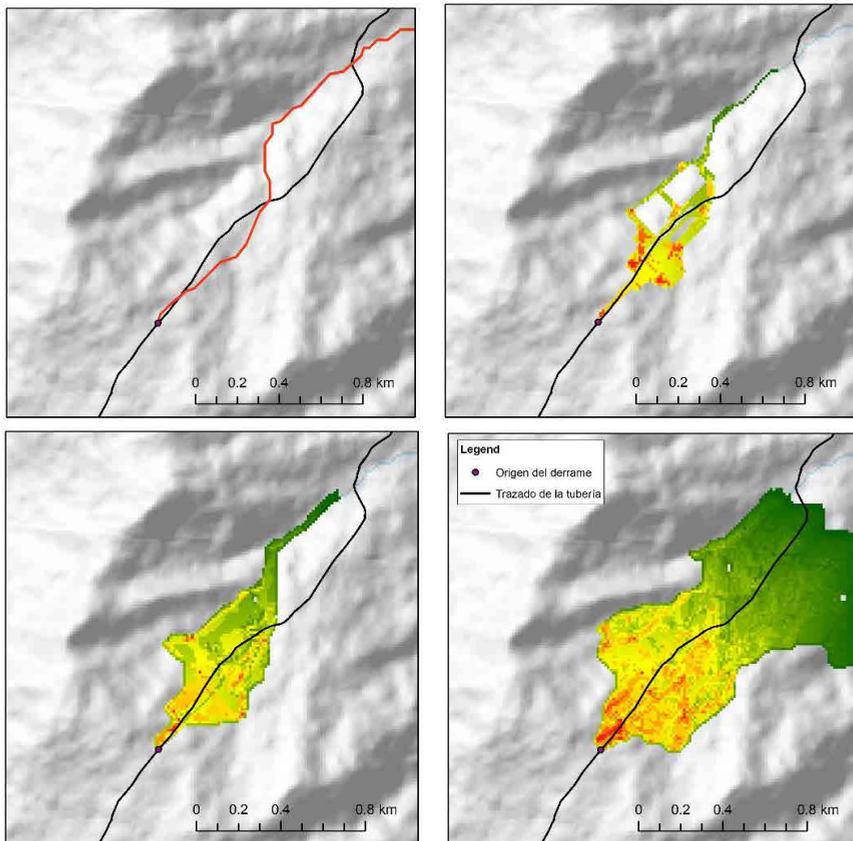


*Fuente: Autores*

Finalmente, la implementación del análisis espacial para simular el área afectada por el derrame, se aplicó para un modelo digital de elevación de 12.5

metros de resolución espacial. En la Figura 4-8.,Figura 4-8 están los resultados de la línea de flujo (superior izquierda), de la simulación del derrame con  $n=1$  (superior derecha), con  $n=2$  (inferior izquierda) y con  $n=3$  (inferior derecha). Se aprecia la diferencia en el área total afectada en cada caso; en el primero, la línea de flujo, con una afectación mínima, fue insuficiente para estimar el área afectada; en el segundo; se logró un mayor ancho en la mancha del derrame y las posibles rutas que podría seguir; en el tercero, el área de la macha fue mucho mayor y para la resolución espacial, podría pensarse que está sobre estimada; finalmente, en el cuarto caso, la zona afectada muestra una magnitud muy superior a lo que posiblemente se pueda presentar en la realidad. A pesar de que no se tiene un derrame real para poder validar los resultados obtenidos, se podría utilizar la herramienta para analizar diferentes situaciones y poder tomar decisiones con base en los escenarios disponibles.

**Figura 4-8** Ejemplo de simulación del área afectada por un derrame.



Fuente: Autores

## 4.4 Conclusiones y comentarios

La identificación de tramos de ductos de transporte de líquidos peligrosos, asociados a zonas de alta vulnerabilidad ambiental, realizada mediante la implementación de operaciones de análisis espacial en software de SIG, resultó ser una herramienta muy valiosa para aportar información que facilite la adecuada valoración del riesgo en el manejo de integridad de ductos. Los resultados obtenidos tienen como ventaja que involucran todas las variables de interés del medio ambiente. Además, la creación de herramientas ya sea modelos con *Model Builder* o mediante *scripts*, permite agilizar los procesos de identificación de áreas de alta consecuencia y tramos de la tubería que las puedan afectar.

Los modelos para la simulación de derrames y para la identificación de tramos con afectación (directa e indirecta), a áreas de alta consecuencia son satisfactorios. A pesar de la necesidad de validación de la herramienta basada en sistemas de información geográfica, si se puede asegurar la adquisición de datos de suficiente calidad y nivel de detalle, los resultados tendrán validez suficiente para afrontar un estudio de análisis de riesgo como parte de la gestión de integridad de ductos de transporte de líquidos peligrosos, y cumpliendo con los requerimientos de normas como el API 1160 y la NTC 5901.

Los modelos propuestos dependieron en gran medida en la experiencia de los autores y de los trabajos realizados al interior del Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de los Materiales. Como se ha mostrado en este capítulo, la solución a problemáticas espaciales con el uso de los SIG, es un proceso creativo, ya que este mismo problema puede tener diferentes enfoques con variaciones en los tipos de modelos de análisis propuestos y con diferentes niveles de complejidad de estos.

La información obtenida se puede interpretar directamente en el software de sistemas de información geográfica, o pueden ser exportados a otros programas diseñados para la gestión de integridad de ductos. Alternativamente, los resultados del análisis de probabilidad de falla del ducto pueden ser importados para realizar el análisis del riesgo directamente en el software de SIG, y presentar los resultados espacialmente, lo que permite la interpretación de dichos resultados de forma integrada con la modelación medio natural en el que se enmarca el ducto.

Los procesos de análisis presentados en este documento son susceptibles de mejora, ya que se pueden incluir simulaciones más exhaustivas que

involucren modelos físicos para involucrar procesos como la evaporación, la infiltración y la velocidad del flujo. En etapas posteriores de desarrollo, se pueden aplicar métodos como diferencias finitas o autómatas celulares para aproximar soluciones de las ecuaciones de flujo de aguas someras. Sin dejar de lado el desarrollo experimental para determinar parámetros como la conductividad hidráulica del suelo, la rugosidad de la superficie del suelo y la tasa de evaporación de los líquidos transportados.

El análisis espacial y el modelamiento con software SIG, permite mejorar la toma de decisiones para la gestión de integridad de ductos. Como se mostró en este capítulo, las herramientas de análisis facilitan las tareas de identificación con tramos de afectación a áreas de alta consecuencia y, por lo tanto, mejorar los tiempos de análisis para ductos de grandes longitudes. La automatización de los procesos de análisis y modelación resultan convenientes para abordar este tipo de problemáticas al permitir la estandarización de procesos y la comparación de resultados entre diferentes sistemas de ductos.



## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Bosque, J., & García, R. C. (2000). El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial. *Anuales de la Universidad Complutense*, 49-67.
- Corzo Ramírez, L., Jerena, E., & Rubio Mendoza, R. (2012). La potencialidad del territorio en la restauración ecológica. *Revista Gestión y Ambiente*, 39\_50.
- Moreno Mojica, R. A., Rodríguez Forero, R. H., & López Díez, J. C. (2018). Empresarios del sector privado de la construcción dentro del proceso de urbanización en el municipio de Tunja, 1974 – 2014. In *Vestigium Ire*, 1(11), 52-69.
- Da Silva, C., & Cardozo, O. (2011). Evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica aplicados a la definición de espacios potenciales para uso de suelo residencial en Resistencia (Argentina). *Revista internacional de ciencia y tecnología de la información geográfica*, 23-40.
- De Pietri, D., Dietrich, P., & Mayo, P. (2011). Evaluación multicriterio de la exposición al riesgo ambiental mediante un sistema de información geográfica en Argentina. *Panam Salud Pública*, 377-387.
- Gutiérrez Ossa, J. A., & Urrego Estrada, G. A. (2011). Los sistemas de información geográfica y los planes de ordenamiento territorial en Colombia. *Perspectiva geográfica*, 247-266.
- Morelo, E., Grindla, A., & Asenso, J. (2007). Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. *Revista internacional de ciencia y tecnología de información geográfica*, 120-147.
- Ordoñez, P., & Cabrera, P. (2011-2012). *Lección 6. Evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica*. Colombia: UNGIS.
- Osorio Gómez, J. C., & Orejuela Cabrera, J. P. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia Et Technica*, 247-252.

- Patiño, H., León, A., & Ávila, M. (2016). Análisis de idoneidad del suelo para construcción de colegios públicos integrando SIG y PAJ en el área urbana de Bogotá. *Redes de Ingeniería*, 145.
- Santos Preciado, J. M. (1997). El planteamiento teórico multiobjetivo/multicriterio y su aplicación a la resolución de problemas medioambientales y territoriales, mediante los SIG ráster. *Espacio, tiempo y forma, serie VI Geografía* , 129-151.
- Wenrui, Y., Feng, L., Rusong, W., & Dan, H. (2011). Ecological benefits assessment and spatial modeling of urban ecosystem for controlling urban sprawl in eastern Beijing, China. *Ecological Complexity*, 153-160.
- Goepel, K. (2017). Correccion of AHP consensus calculation. *BPMSG*, 1.
- Ramírez, A. (2016). El ordenamiento ecológico territorial instrumento de política ambiental para el desarrollo local. *Estudios sociales*, 71-99.
- Saaty, T. (2008). *Decision making with the analytic hierarchy process*. S/N: International journal of services sciences.
- Tunja, M. d. (2014). *Decreto 241 de 2014. Plan de ordenamiento territorial*. Tunja: Alcaldía de Tunja.
- Vías, I. n. (2008). *Manual de diseño geométrico de carreteras*. Bogotá: Ministerio de Transporte.
- Abulizi, N., Kawamura, A., Tomiyama, K., & Fujita, S. (2016). Measuring and evaluating of road roughness conditions with a compact road profiler and ArcGIS. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(5), 398–411. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.09.004>
- Adeleke, O., Stephen, K., Odumosu, J., & Abdulrahman, H. S. (2015). Application of GIS as Support Tool for Pavement Maintenance Strategy Selection, (October), 0–13. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/282643833\\_Application\\_of\\_GIS\\_as\\_Support\\_Tool\\_for\\_Pavement\\_Maintenance\\_Strategy\\_Selection](https://www.researchgate.net/publication/282643833_Application_of_GIS_as_Support_Tool_for_Pavement_Maintenance_Strategy_Selection)
- ALFAR, E. (2016). *GIS-BASED PAVEMENT MAINTENANCE MANAGEMENT MODEL FOR LOCAL ROADS IN THE UK*. Salford. Retrieved from [http://usir.salford.ac.uk/39679/1/F\\_Final Version of Emad Alfar PhD Thesis\\_Emad Alfar PhD Thesis 1.pdf](http://usir.salford.ac.uk/39679/1/F_Final%20Version%20of%20Emad%20Alfar%20PhD%20Thesis_Emad%20Alfar%20PhD%20Thesis%201.pdf)

- Amador-Jimenez, L., & Pooyan Afghari, A. (2015). Road Safety and Pavement Management: a case study of Tanzania. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 10(2), 132–140. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.17>
- Armas, E. V. (2012). Oportuna toma de decisiones en la gestión de conservación de la carretera. *Rev. de Investigación de La Fac. de Ciencias Administrativas*, 15, 43–50.
- Babashamsi, P., Izzi, N., Ceylan, H., & Ghani, N. (2016). Evaluation of pavement life cycle cost analysis : Review and analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4), 241–254. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.004>
- Bazlamit, S. M., Ahmad, H. S., & Al-suleiman, T. I. (2017). Pavement Maintenance Applications using Geographic Information Systems. *Procedia Engineering*, 182, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.123>
- Bonifacio R, P. (2015). Road Surface Structure Monitoring and Analysis Using High Precision Gps Mobile Measurement Systems (MMs). Pasig: PASCO Philippines Corporation. Retrieved from [http://a-a-r-s.org/acrs/administrator/components/com\\_jresearch/files/publications/WE2-4-3.pdf](http://a-a-r-s.org/acrs/administrator/components/com_jresearch/files/publications/WE2-4-3.pdf)
- Borja, M. (2012). *Metodología de la Investigación Científica para Ingenieros*. Chiclayo.
- Carlos H, Higuera S. (2007). *Mecánica de pavimentos principios básicos* (1st ed.). Editorial UPTC.
- Carlos H, Higuera S. (2015). *Nociones sobre evaluación y rehabilitación de estructuras de pavimentos*. (Segunda Edición). Tunja: Editorial UPTC.
- CERÓN-BERMÚDEZ, V. (2006). *Evaluación y comparación de metodologías vizir y PCI sobre el tramo de vía en pavimento flexible y rígido de la vía: Museo Quimbaya – CRQ Armenia Quindío (pr 00+000 – pr 02+600) universidad*. Universidad Nacional de Colombia.
- Chen, C., Zhang, S., Zhang, G., Bogus, S. M., & Valentin, V. (2014). Discovering temporal and spatial patterns and characteristics of pavement distress condition data on major corridors in New Mexico. *JOURNAL OF TRANSPORT OF GEOGRAPHY*, 38, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.06.005>

- Díaz-vilariño, L., González-Jorge, H., Bueno, M., Arias, P., & Puente, I. (2016). Automatic classification of urban pavements using mobile LiDAR data and roughness descriptors. *Construction and Building MATERIALS*, 102, 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.199>
- Dungana, N., Dubjur, T., Choden, Y., Dorji, T., & Dema, T. (2016). *PAVEMENT ASSESSMENT OF FARM ROADS IN BHUTAN*. COLLEGE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY.
- Fernández Seoane, L., Gómez Frías, V., González, G., Millán, C., & Sánchez, M. (2006). SIG PARA LA GESTIÓN DE FIRMES. In *XII congreso nacional de tecnologías de la información geográfica* (pp. 1493–1508). Retrieved from [http://www.age-geografia.es/tig/docs/XII\\_3/110 - Fernandez Seoane et al.pdf](http://www.age-geografia.es/tig/docs/XII_3/110 - Fernandez Seoane et al.pdf)
- Ghazi, K., Mustafa, S., Kokkas, N., & Smith, M. (2014). An Approach to Produce a GIS Database for Road Surface Monitoring. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 9 (December), 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.01.042>
- Gobernación de Boyacá. (2009). *Plan Vial Regional*. Tunja.
- Plan Departamental de Desarrollo de Boyacá para el periodo 2016-2019 denominado “Creemos en Boyacá, tierra de paz y libertad, 2016-2019”.
- Plan Departamental de Desarrollo de Boyacá - Pacto social por Boyacá: Tierra que sigue avanzando -2020-2023, ordenanza 006 (2020), páginas 280-285.
- Hafez, M., Ksaibati, K., & Atadero, R. (2017). Best practices to support and improve pavement management systems for low-volume paved roads. *International Journal of Pavement Engineering*, (May), 1–8. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1316648>
- Hong, F., Perrone, E., Mikhail, M., & Eltahan, A. (2001). Planning Pavement Maintenance and Rehabilitation Projects in the New Pavement Management System in Texas, 1–22. Retrieved from <http://docs.trb.org/prp/17-02001.pdf>
- Huisman, O., & A., R. (2009). *Principles of Geographic Information Systems An introductory textbook*. (O. Huisman & R. A., Eds.) (Fourth). The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Hengelosestraat 99, P.O. Box 6, 7500 AA

- Enschede, The Netherlands CIP-GEGEVENS. Retrieved from [https://www.itc.nl/library/papers\\_2009/general/principlesgis.pdf](https://www.itc.nl/library/papers_2009/general/principlesgis.pdf)
- Ibraheem, A. T., & Al-Razzaq, D. A. (2012). Applying Geographic Information System (GIS) for Maintenance Strategy Selection. *Engineering*, 04(01), 44–54. <https://doi.org/10.4236/eng.2012.41007>
- Ibraheem, A. T., & Falih, A. A. (2012). Applying Geographic Information System ( GIS ) for Maintenance Strategy Selection. *Engineering*, 2012(January), 44–54. Retrieved from [http://file.scirp.org/pdf/ENG20120100006\\_54343085.pdf](http://file.scirp.org/pdf/ENG20120100006_54343085.pdf)
- Iliya Yut, James Mahoney and Donald A. Larsen, P. E. (2017). *Preparation of the Implementation Plan of AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide ( M-EPDG ) in Connecticut : Phase II – Expanded Sensitivity Analysis and Validation with Pavement Management Data*. Connecticut. Retrieved from <http://www.ct.gov/dot/lib/dot/documents/dresearch/CT-2293-F-17-1.pdf>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Resolución 068 de 2005: Marco Geocéntrico Nacional de Referencia: MAGNA-SIRGAS, 92 § (2005). Retrieved from [http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17691604%0Afile:///C:/Users/Mauricio/AppData/Local/Mendeley Ltd./Mendeley Desktop/Downloaded/General et al. - 2005 - DIARIO OFICIAL 45 . 812 por la cual se adopta como único datum oficial de Colombia el Marco Geocéntrico](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17691604%0Afile:///C:/Users/Mauricio/AppData/Local/Mendeley%20Ltd./Mendeley%20Desktop/Downloaded/General%20et%20al.%20-%202005%20-%20DIARIO%20OFICIAL%2045%20.812%20por%20la%20cual%20se%20adopta%20como%20único%20datum%20oficial%20de%20Colombia%20el%20Marco%20Geocéntrico)
- Jiao, Y., Bowen, Z., & Siranc, H. (2012). Study on the Application of a Management System for Pavement Based on iPad Terminal with GIS. *Information Technology Journal* 11, 4, 520–523. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/269655193\\_Study\\_on\\_the\\_Application\\_of\\_a\\_Management\\_System\\_for\\_Pavement\\_Based\\_on\\_iPad\\_Terminal\\_with\\_GIS](https://www.researchgate.net/publication/269655193_Study_on_the_Application_of_a_Management_System_for_Pavement_Based_on_iPad_Terminal_with_GIS)
- Kmetz, R. J. (2011). *GIS Based Pavement Maintenance : A Systematic Approach*. College of Technology Directed Projects, Indiana. Retrieved from <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1036&context=techdirproj>
- Kumar, P., & Gupta, A. (2010). Case Studies on Failure of Pavements. In *First International Conference on Pavement Preservation* (pp. 505–518). Retrieved from <https://es.scribd.com/doc/66743617/Importancia-de-la-Regularidad-Superficial-IRI-en-la-Construccion-de-Pavimentos-Asfálticos-en-Caliente>

- Lavaud, P. (2011). *Importancia de la Regularidad Superficial ( Iri ) en la Construcción de Pavimentos Asfálticos en Caliente*.
- Leiva, F. (2005). *Normativa para evaluar la resistencia al deslizamiento superficial de los pavimentos*. LM-PI-PV-IN-27B-05.
- Los Angeles County. (2017). Department of public works. Retrieved December 2, 2017, from <http://dpw.lacounty.gov/gmed/lacroads/TreatmentPavement.aspx>
- M. Johanns and J. Craig. (2002). *Pavement Maintenance Manual* (NDOR). Naraska.
- Macea-Mercado, L. F., Morales, L., & Márquez-Díaz, L. (2016). Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vía de desarrollo. *Ingeniería Investigación y Tecnología, XVII*(número 2), 223–235. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.007>
- Ministerio de Transporte. Resolución número 001067 DE 2015 “Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras” (2015). Colombia. Retrieved from [http://www.nuevaleislacion.com/files/susc/cdj/conc/r\\_mt\\_1067\\_15.pdf](http://www.nuevaleislacion.com/files/susc/cdj/conc/r_mt_1067_15.pdf)
- Ministerio de Transporte, & Instituto Nacional de Vías. (2008). *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimntos asfálticos de carreteras*. (Consortio Beta, Ed.) (Segunda). Bogota, D.C.: Ministerio de Transporte. Retrieved from <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/986-guia-metodologica-para-el-diseno-de-obras-de-rehabilitacion-de-pavimentos-asfalticos-de-carreteras>
- Mohammed, H., & Elhadi, A. (2009). *GIS , A TOOL FOR PAVEMENT MANAGEMENT*. Royal Institute of Technology. Retrieved from [https://www.kth.se/polopoly\\_fs/1.621699!/EX-0902.pdf](https://www.kth.se/polopoly_fs/1.621699!/EX-0902.pdf)
- Mohd Zulkifli B. Mohd Yunus, H. B. H. (2010). Managing Road Maintenance Using Geographic Information System Application. *Journal of Geographic Information System, 02*(04), 215–218. <https://doi.org/10.4236/jgis.2010.24030>
- Obaidat, M. T., & Al-kheder, S. A. (2005). Integration of geographic information systems and computer vision systems for pavement distress classification. *Consturction and Building MATERIALS, 20*(february), 657–672. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.009>

- Pantha, B. R., Yatabe, R., & Bhandary, N. P. (2010). GIS-based highway maintenance prioritization model : an integrated approach for highway maintenance in Nepal mountains. *Journal of Transport Geography*, 18(3), 426–433. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2009.06.016>
- Pinilla, J. (2007). “Auscultación, Calificación del Estado Superficial Y Evaluación Económica De La Carretera Sector Puente De La Libertad – Malteria Desde El K0+000 Hasta El K6+000 (Código 5006).” UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Plati, C., & Georgouli, K. (2014). Field investigation of factors affecting skid resistance variations in asphalt pavements. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, IX(2), 108–114. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2014.14>
- Ribeiro, C. C., Augusto, C. R., & Andrade, Joyce Costa, V. S. da C. (2011). *Relatório Final do Ensaio de Proficiência para Análise de Composição de Mistura de Gases 4 a Rodada – Gás Natural*.
- Rusu, L., Sitar, D., Taut, S., & Jecan, S. (2015). An Integrated Solution for Pavement Management and Monitoring Systems. *Procedia Economics and Finance*, 27(15), 14–21. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00966-1](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00966-1)
- Satria, R., & Castro, M. (2016). GIS TOOLS FOR ANALYZING ACCIDENTS AND ROAD DESIGN : A REVIEW. *Transportation Research Procedia*, 18(June), 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.033>
- Shamsabadi, S. S. (2014). *DESIGN AND IMPLEMENTATION OF PAVEMON : A GIS WEB-BASED PAVEMENT MONITORING SYSTEM BASED ON LARGE AMOUNTS OF HETEROGENEOUS SENSORS DATA*. Northeastern University. Retrieved from <https://repository.library.northeastern.edu/files/neu:349532/fulltext.pdf>
- Sierra Díaz, C. C., & Rivas Quintero, A. F. (2016). *Aplicacion y Comparacion de las Diferentes Metodologías de Diagnóstico para la Conservación y Mantenimiento del Tramo Pr 00+000 – Pr 01+020 de la Vía al Llano (Dg 78 Bis Sur – Calle 84 Sur) En La Upz Yomasa*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. Retrieved from [http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13987/4/TRABAJO\\_DE\\_GRADO\\_VIZIR\\_Y\\_PCI\\_2016.pdf](http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13987/4/TRABAJO_DE_GRADO_VIZIR_Y_PCI_2016.pdf)

- SITÁNYIOVÁ, D., & MUŽÍK, J. (2013). Gis Application for Managing and Maintaining Road Network in Ulaanbaatar. *The Silesian University or Tecnology, Civil Engineering, III*, 61–68. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/283122753\\_GIS\\_application\\_for\\_managing\\_and\\_maintaining\\_road\\_network\\_in\\_Ulaanbaatar](https://www.researchgate.net/publication/283122753_GIS_application_for_managing_and_maintaining_road_network_in_Ulaanbaatar)
- TOVAR, S. C., & SILVA-BALAGUERA, A. (2017). *Actualización del Plan Vial Departamental para el Sector Oriental de la Provincia de Valderrama. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.*
- Transportation Research Board of The National Academies. (2009). *Guide for Pavement Friction.*
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. (2001). *Unified Facilities Criteria ( Ufc )- PAVER ASPHALT SURFACED AIRFIELDS PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI). Department of Defence, United States of America.* Retrieved from [https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc\\_3\\_270\\_06\\_2001.pdf](https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc_3_270_06_2001.pdf)
- VINER, H., SINHAL, R., & PARRY, A. (2004). Review of UK Skid Resistance Policy. In *5th International Symposium on Pavement Surface Characteristics* (pp. 1–12). Toronto.
- Vitillo, N. (2013). *Pavement Management Systems Overview.* New Jersey. Retrieved from <http://www.state.nj.us/transportation/eng/pavement/pdf/PMSOverviews0709.pdf>
- Zapata Duque, J. A., & Cardona Londoño, G. J. (2012). Aplicación de los sistemas de información geográfica para la gestión de la malla vial de la ciudad de Medellín. *Ing USBMed*, 3(2), 70–84. Retrieved from <http://web.usbmed.edu.co/usbmed/fing/v3n2/v3n2a9.pdf>
- Zhang, Z., Gaspard, K., & Elseifi, M. A. (2014). Evaluating pavement management treatment selection utilising continuous deflection measurements in flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(5), 414–422. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.993198>
- Zhou, G., Wang, L., Wang, D., & Reichle, S. (2010). Integration of GIS and Data Mining Technology to Enhance the Pavement Management Decision Making. *TRANSPORTATION ENGINEERING*, (April), 332–341. Retrieved from [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000092](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000092)

- Zumrawi, M. M. E. (2015). Survey and Evaluation of flexible Pavement Failures. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4(1), 1602–1607. Retrieved from <https://www.ijsr.net/archive/v4i1/SUB15542.pdf>
- Zumrawi, M., & Margani, K. (2017). Improving Maintenance Practice for Road Network in Sudan. *MOJ Civil Engineering*, 2(6–2017), 1–7. <https://doi.org/10.15406/mojce.2017.02.00054>
- Alcaldía Mayor de Tunja. (s. f.). Información General. Recuperado a partir de [http://www.tunja-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](http://www.tunja-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml)
- Bautista Rubiano, O. H., & Roberto Flórez, C. M. (2003). Estudio morfométrico y morfodinámico de los sistemas de cárcavas en la zona nor-occidental de la ciudad de Tunja. Tunja [Boyacá, Colombia]: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Facultad de Ingeniería, 2003. Recuperado a partir de <http://biblio.uptc.edu.co:2048/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat01462a&AN=uptc.275083&lang=es&site=eds-live>
- Berry, Peter L. y Reid, David. (1993). *Mecánica de Suelos* (1.a ed.). Bogotá DC: McGraw-Hill International (UK).
- Braja M Das. (2006). *Principles of geotechnical engineering* (Vol. 5). Thomson.
- Cartaya, S., Méndez, W., & Pacheco, H. (s. f.). Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un sistema de información geográfica. *Interciencia*, 31(9), 638–646.
- Cheng, Y., Zhang, J., & Peng, J. (2013). ArcGIS-based evaluation of geo-hazards at Yaozhou County, Shaanxi, China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(4), 330–334. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2012.11.002>
- Contreras, D. (2018). Popayan, the White City in Colombia, 35 years after the earthquake. Retrieved from <https://dcontrerasster.wixsite.com/website/single-post/2016/05/03/Architecture-where-design-meets-engineering>
- Corredor Castellanos, C. A., & Salamanca García, A. I. (2003). Estudio morfométrico y morfodinámico de los sistemas de cárcavas en la zona centro y sur occidente de la ciudad de Tunja. Tunja [Boyacá, Colombia]: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Facultad de Ingeniería, 2003. Recuperado a partir de <http://biblio.uptc.edu.co>

edu.co:2048/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat01462a&AN=uptc.275083&lang=es&site=eds-live

Dallos Morantes, D. C., & Niño Plazas, S. J. (2009). Inventario de fenómenos de remoción en masa del municipio de Tunja. Tunja [Boyacá, Colombia]: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Facultad de Ingeniería, 2009. Recuperado a partir de <http://biblio.uptc.edu.co:2048/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat01462a&AN=uptc.275083&lang=es&site=eds-live>

Díaz-Rodríguez, Abraham. (2014). *Mecánica de Suelos. Naturaleza y propiedades* (1.a ed.). México: Trillas.

FARBIARZ, J., JARAMILLO, J., & VILLARRAGA, M. R. (2000). Microzonation of the city of Medellín. En *Proceedings*.

Google Maps. (s. f.). Recuperado a partir de <https://www.google.com/maps/@5.4298907,-73.3695874,7192a,20y,8.04h,60.98t/data=!3m1!1e3>

Instituto Geofísico Universidad Javeriana. (2000). Estudio de amenaza y microzonificación sísmica, vulnerabilidad estructural y evaluación de escenarios de daño - Microzonificación sísmica preliminar de Tunja.

Jiménez Jiménez, Omar Javier. (2010). Propuesta metodológica para la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa. *Revista Facultad de Ingeniería*, 19, 7-19.

Jiménez, M., García-Fernández, M., Zonno, G., & Cella, F. (2000). Mapping soil effects in Barcelona, Spain, through an integrated GIS environment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19 (4), 289-301. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00007-5](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00007-5)

Karimzadeh, S., Miyajima, M., Hassanzadeh, R., Amiraslanzadeh, R., & Kamel, B. (2014). A GIS-based seismic hazard, building vulnerability and human loss assessment for the earthquake scenario in Tabriz. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 263-280. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.06.026>

Kaufmann, O., & Martin, T. (2008). 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers & Geosciences*, 34(3), 278-290. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.09.005>

- Kienzle, A., Hannich, D., Wirth, W., Ehret, D., Rohn, J., Ciugudean, V., & Czurda, K. (2006). A GIS-based study of earthquake hazard as a tool for the microzonation of Bucharest. *Engineering Geology*, 87(1–2), 13-32. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.05.008>
- Kılıç, H., Özener, P. T., Ansal, A., Yıldırım, M., Özyayın, K., & Adatepe, Ş. (2006). Microzonation of Zeytinburnu region with respect to soil amplification: A case study. *Engineering Geology*, 86(4), 238-255. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.04.007>
- Labib, M., & Nashed, A. (2013). GIS and geotechnical mapping of expansive soil in Toshka region. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(3), 423-433. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2012.11.005>
- Li, X. P., & Zhou, S. P. (2012). Application and Research of GIS-based Wushan County Slope Stability Evaluation Information System. 2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering, 29, 2296-2302. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.304>
- MHASKE, S.Y, & CHOUDHURY, D. (2011). Geospatial contour mapping of shear wave velocity for Mumbai city. *Natural Hazards*, 59(1), 317–327. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9758-z>
- Montes Leguizamón, A. M., & Villate Corredor, J. J. (2001). Caracterización geotécnica preliminar - suelos de Tunja Sector 2. Tunja [Boyacá, Colombia]: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2001. Recuperado a partir de <http://biblio.uptc.edu.co:2048/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat01462a&AN=uptc.117222&lang=es&site=eds-live>
- Nath, S. K. (2005). An initial model of seismic microzonation of Sikkim Himalaya through thematic mapping and GIS integration of geological and strong motion features☆. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(2), 329-343. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.03.002>
- Pessina, V., & Meroni, F. (2009). A WebGis tool for seismic hazard scenarios and risk analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(9), 1274-1281. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.03.001>
- Silva-Balaguera, A, Daza Leguizamón, O., and López Valiente, L., “Gestión de pavimentos basado en Sistemas de Información geográfica (SIG): una revisión”, ing. *Solidar*, vol. 14, no. 26, Sep. 2018.
- Pokhrel, R. M., Kuwano, J., & Tachibana, S. (2013). A kriging method of interpolation used to map liquefaction potential over alluvial ground.

Engineering Geology, 152(1), 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.10.003>

- Slob, S., Hack, R., Scarpas, T., van Bemmelen, B., & Duque, A. (2002). A methodology for seismic microzonation using GIS and SHAKE—a case study from Armenia, Colombia. En *Engineering Geology for Developing Countries—Proceedings of 9th Congress of International Association for Engineering Geology and the Environment*. Citeseer.
- Sun, C.-G., Chun, S.-H., Ha, T.-G., Chung, C.-K., & Kim, D.-S. (2008). Development and application of a GIS-based tool for earthquake-induced hazard prediction. *Computers and Geotechnics*, 35(3), 436-449. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2007.08.001>
- Torres, J. A. B., Suescún, W. M. C., & Castillo, A. J. A. (2006). Evaluación de efectos sísmicos asociados mediante la utilización de SIG en Ibagué-Colombia. *Épsilon*, (6), 52-61.
- Torres Rincón, J. E., & Cáceres Cárdenas, L. A. (2005). Clasificación de información de los sistemas de cárcavas en Tunja. Tunja [Boyacá, Colombia]: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Facultad de Ingeniería, 2005. Recuperado a partir de <http://biblio.uptc.edu.co:2048/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=catt01462a&AN=uptc.123489&lang=es&site=eds-live>
- Turk, T. (2009). Creating a Sustainable Disaster Information System and its Application on the North Anatolian. Fault Zone (NAFZ). *Computers & Geosciences*.
- Turk, T., Gümüşay, U., & Tatar, O. (2012). Creating infrastructure for seismic microzonation by Geographical Information Systems (GIS): A case study in the North Anatolian Fault Zone (NAFZ). *Computers & Geosciences*, 43, 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.006>
- American Petroleum Institute. (2013). *Managing Systems Integrity for Hazardous Liquid Pipelines. API Recommended practice 1160*. (2nd ed.). Washington D.C., United States: American Petroleum Institute.
- Anselin, L. (1992). *Spatial Data Analysis with GIS: An introduction to application in the social sciences*. Santa Barbara.
- Anselin, L., Murray, A. T., & Rey, S. J. (2013). Spatial Analysis. In T. D. Little & P. E. Nathan (Eds.), *The Oxford Handbook of Quantitative*

- Methods: Statistical Analysis* (p. 765). New York: Oxford University Press.
- ARCADIS Nederland BV, & JESYCA S.A.S. (2015). *Plan Maestro Fluvial de Colombia 2015*. Bogotá. Retrieved from <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=13276>
- ASF DAAC. (2015). ALOS PALSAR\_Radiometric\_Terrain\_Corrected\_low\_res; Includes Material © JAXA/METI 2007. Accessed through ASF DAAC 13 October 2017. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>
- Bertolini, M., Bevilacqua, M., Ciarapica, F. E., & Giacchetta, G. (2009). Development of Risk-Based Inspection and Maintenance procedures for an oil refinery. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(2), 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.01.003>
- Blyth, A., Cake, D., Laing, I., Andresen, M., Gienko, G., & Govorov, M. (2007). *Training Material: Spatial Analysis and Modeling*. Vilnius. Retrieved from [https://www.geoportal.lt/geoportal/documents/18923/19607/GII-07\\_training\\_material.pdf/](https://www.geoportal.lt/geoportal/documents/18923/19607/GII-07_training_material.pdf/)
- Chang, S. E., Stone, J., Demes, K., & Piscitelli, M. (2014). Consequences of oil spills: a review and framework for informing planning. *Ecology and Society*, 19(2). <https://doi.org/10.5751/ES-06406-190226>
- Cressie, N. A. C. (1993). *Statistics for Spatial Data, Revised Edition*. New York: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119115151>
- Cunha, S. B. da. (2016). A review of quantitative risk assessment of onshore pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, 282–298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.09.016>
- Daza-Leguizamón, O. J., Vera-López, E., & Riaño-Cano, G. A. (2016). Efecto de la resolución espacial de modelos digitales de elevación en la simulación de derrames de hidrocarburos. *Revista Científica*, 3(26), 149–172. <https://doi.org/10.14483/23448350.11620>
- Denby, A., & Humber, J. (2004). Overland Flow: Comparison of Modelling Methods. In *12th Annual GIS for Oil & Gas Conference and Exhibition* (pp. 1–6). Houston.
- Dueñas Vaca, M. C., Sepulveda Hurtado, H., Vera López, E., Pineda Triana, Y., & Africano Higuera, D. C. (2007). Aseguramiento del riesgo por corrosión externa en ductos mediante correlación de datos de inspección. *Scientia et Technia*, (36), 513–517.

- Dziubinski, M., Fratzcak, M., & S., M. A. (2006). Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.10.007>
- Garaci, M., Sutherland, J., & Mergelas, B. J. (2002). Role of GIS and Data Management Systems for Pipeline Integrity. In *Pipelines 2002* (pp. 1–11). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40641\(2002\)6](https://doi.org/10.1061/40641(2002)6)
- Goodfellow, R., & Jonson, K. (2018). Pipeline integrity management systems (PIMS). In W. Revie (Ed.), *Oil and Gas pipelines: integrity and safety handbook* (p. 816). New Jersey: Wiley.
- Huisman, O., & de By, R. A. (2009). *Principles of Geographic Information Systems: An introductory textbook*. Enschede: The International Institute for Geo-information Science and Earth Observation.
- ICONTEC. (2012). *Gestión de Integridad de Sistemas para Transporte de Líquidos Peligrosos (NTC 5901)* (1st ed.). Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- Invias. (2008). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*. Bogotá.
- Jia, S., Feng, Q., Zhou, L., & Yu, H. (2009). Software uses GIS data to identify high consequence areas along pipelines. *Pipeline and Gas Journal*, 236(8). Retrieved from <https://pgjonline.com/magazine/2009/august-2009-vol-236-no-8/features/software-uses-gis-data-to-identify-high-consequence-areas-along-pipelines>
- Joao, E. (2002). How scale affects environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 22, 289–310.
- Kennedy, S. (2002). Pipelines benefit by integrating management systems. *Pipeline and Gas Journal*, 229(9), 57–58.
- Laffon, B., Pásaro, E., & Valdíglesias, V. (2016). Effects of Exposure to Oil Spills on Human Health: Updated Review. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 1–24. <https://doi.org/10.1080/10937404.2016.1168730>
- LeBlanc, L., Kresic, W., Keane, S., & Munro, J. (2016). Advanced integrity management framework for pipelines. In *11th International Pipeline Conference* (p. 9). Calgary. <https://doi.org/10.1115/IPC2016-64609>

- Lee, K., Boufadel, M., Chen, B., Foght, J., Hodson, P., Swanson, S., & Venosa, A. (2015). *The Behaviour and Environmental Impacts of Crude Oil Released into Aqueous Environments: Executive Summary*. Ottawa.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Systems and Science* (4th ed.). Hoboken: Wiley. Retrieved from <https://books.google.com.co>
- Márquez, L. (2017). El ferrocarril colombiano: 4 temas recurrentes en la literatura. *Estudios Gerenciales*, 33(143), 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2017.04.003>
- Meehl, J. (Departament of R. A. & G. S. S. M. U. of M. (2004). Pipeline Integrity Management Using Linear Referencing Whit ArcObjects. In *24th Annual Esri International User Conference* (pp. 1–9). San Diego, California.
- Mora, R. G., Hopkins, P., Cote, E. I., & Shie, T. (2016). *Pipeline Integrity Management Systems A Practical Approach*. New York: ASME.
- Obire, O., & Nwaubeta, O. (2002). Effects of Refined Petroleum Hydrocarbon on Soil Physicochemical and Bacteriological Characteristics. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 6(1), 39–44. <https://doi.org/10.4314/jasem.v6i1.17193>
- Odegard, L., & Humber, J. (2005). Comprehensive Modeling : Inventorying Directly and Indirectly Affected High Consequence Areas. In *Geo Tech Event 2005* (pp. 1–6).
- Osuji, L. C., & Nwoye, I. (2007). An appraisal of the impact of petroleum hydrocarbons on soil fertility: the Owaza experience. *African Journal of Agricultural Research*, 2(7), 318–324. Retrieved from <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-abstract/70ED66227263>
- Paige, D., Park, N., & Posner, J. (2003). Modeling pipeline spill determines impact on HCAs. *Oil and Gas Journal*, 101(12), 72–77. Retrieved from <https://www.ogj.com/articles/print/volume-101/issue-12/transportation/modeling-pipeline-spill-determines-impact-on-hcas.html>
- Palmer, J. (2004). GIS Plays Critical Role In Data Management and Pipeline Integrity. *Pipeline and Gas Journal*.

- Perich, W., Van Oostendorp, D. L., Puente, P., & Strike, N. D. (2003). Integrated Data Approach to Pipeline Integrity Management. *Pipeline and Gas Journal*, 230(10), 28–32.
- Rees, B. (2009). Integrity management: practical examples from around the world, applied to pipelines & beyond. In *10º Congreso Internacional de Ductos* (p. 15). Monterrey.
- Wolf, L. J., & Murray, A. T. (2017). Spatial analysis. In D. Richardson, N. Castree, M. F. Goodchild, A. Kobayashi, W. Liu, & R. A. Marston (Eds.), *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology2* (p. 8464). Wiley-Blackwell.





Este libro se imprimió en en los  
talleres gráficos de Búhos Editores  
Ltda., en febrero de 2021 con una  
edición de 200 ejemplares.