



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**MODELO SIG DE RIESGOS HIDROLÓGICOS Y  
GEOLÓGICOS EN EL SISTEMA TRONCAL DE  
TRANSPORTE DE GAS DE ANTIOQUIA**

Mario Santiago Barrientos Grisales

Yuliana María Valderrama Pérez

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2020



MODELO SIG DE RIESGOS HIDROLÓGICOS Y GEOLÓGICOS EN EL SISTEMA  
TRONCAL DE TRANSPORTE DE GAS DE ANTIOQUIA

**Mario Santiago Barrientos Grisales y Yuliana María Valderrama Pérez**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:  
**Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática**

Asesores (a):

John Fernando Escobar

Ingeniero de la Universidad Nacional de Colombia, Especialista en Gestión Ambiental y  
Magister en Medio Ambiente y Desarrollo de Universidad Nacional sede Medellín

Línea de Investigación:

Identificación de riesgos hidrológicos y geológicos sobre un proyecto lineal tipo tubería.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2020

# MODELO SIG DE RIESGOS HIDROLÓGICOS Y GEOLÓGICOS EN EL SISTEMA TRONCAL DE TRANSPORTE DE GAS DE ANTIOQUIA

Mario Santiago Barrientos Grisales<sup>1</sup> y Yuliana María Valderrama Pérez<sup>1</sup>

1. Estudiantes especialización Medio Ambiente y Geoinformática de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

## RESUMEN

La presente monografía explora los modelos SIG aplicados al análisis de amenazas naturales en el contexto de un proyecto lineal, tomando como caso de estudio el Gasoducto Sebastopol-Medellín.

A través de la aplicación de un modelo Saaty se jerarquizan y asignan pesos ponderantes a algunas variables que actúan como factores condicionantes o desencadenantes de amenazas naturales, siendo estas: movimientos en masa, inundaciones e incendios forestales. Las variables analizadas corresponden a fenómenos con un potencial de daño que puede variar dadas ciertas combinaciones que se evalúan en este estudio. La aplicación de este método de análisis jerárquico permite el posterior procesamiento de la información espacial por medio de álgebra de mapas y la generación de diferentes mapas de amenaza, categorizando las amenazas en tres niveles (Bajo, Moderado y Alto). Identificando el nivel de amenaza que predomina en el área de estudio, siendo este moderado.

Adicionalmente con un análisis de costos y rutas óptimas se determina el trazado del gasoducto, tomando como base las amenazas naturales y teniendo en cuenta que el gasoducto pasará por aquellas zonas donde la amenaza es menor. Finalmente, la ruta generada se compara con la existente, y de esta manera tener las bases para indicar cual ruta tiene un menor costo.

**Palabras Clave:** Gasoducto, Amenaza Natural, Movimiento en masa, Inundación, Incendio forestal, Sistemas de información geográfica, Método Saaty, Riesgo, Costo, Ruta Óptima.

## ABSTRACT

This monograph explores GIS models applied to natural threat analysis in the context of a linear project, taking as a case study the Sebastopol-Medellin Pipeline.

Through the application of a Saaty model, they rank and assign weights to some variables that act as factors either conditioning or triggers of natural threats being these: mass movements, floods and forest fires. The application of this hierarchical analysis method allows the subsequent processing of spatial information by means of map algebra to generate the different maps categorizing the threats in the levels (Low, Moderate and High). Identifying the level of threat that predominates in the area of study, being this moderate.

Additionally, with an analysis of optimal costs and routes is determined the layout of the pipeline, taking reference the natural threats and taking into account that the pipeline will pass through those areas where the threat is less. Finally, the route generated is compared to the existing one, and thus have the bases to indicate which route has a lower cost.

**Keywords:** Pipeline, Natural Threat, Mass Movement, Flood, Forest Fire, Geographic Information Systems, Saaty Method, Risk, Cost, Optima Route

## INTRODUCCIÓN

La materialización de amenazas naturales, tales como movimientos en masa, inundaciones e incendios forestales son algunos de los desastres naturales más frecuentes en el Departamento de Antioquia; dadas sus características montañosas que le confieren sectores con pendientes significativas, presencia de fallas geológicas y diversidad en cuanto a cobertura vegetal y abundancia en cuerpos de agua, características que junto a condiciones climáticas de contraste como lluvias intensas y sequías son determinantes en la zonificación y categorización de amenazas.

Desde el punto de vista constructivo y energético, las amenazas naturales representan un factor que debe ser identificado y posteriormente sometido a medidas de prevención, mitigación o control, ya que la ocurrencia de eventos de este tipo representa un alto costo tanto económico como social y ambiental; en este contexto se toma como caso de estudio el “Sistema Troncal de transporte de Gas de Antioquia”, el cual es la principal infraestructura de transporte de gas natural en el Departamento, es decir que una falla en el sistema alteraría el desarrollo de muchas actividades domésticas, de transporte vehicular y de producción.

Al ser un proyecto lineal se encuentra expuesto a varios tipos y niveles de amenaza en todo su recorrido desde Puerto Berrio hasta la estación de derivación ubicada en Barbosa donde se divide en dos ramales, uno que se dirige al municipio de Girardota y otro a Rionegro.

Teniendo en cuenta la extensión del ducto los Sistemas de Información Geográfica resultan ser una buena herramienta para el análisis del territorio y la determinación de los niveles de amenaza a lo largo de los tramos que componen el gasoducto, ya que a través de modelos basados en metodologías como la de Saaty y el álgebra de mapas se facilita la toma de decisiones e incluso se evalúa si el trazado actual del sistema es una

ruta óptima, teniendo en cuenta la distribución espacial de los niveles de amenaza (baja, moderada y alta), además de proporcionar una visión completa de todo el área a evaluar.

## OBJETIVO GENERAL

Proponer un modelo SIG de riesgos naturales aplicado a la empresa Transmetano / sistema troncal de gas.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- A. Determinar las características de riesgo multidimensional sobre el sistema troncal.
- B. Identificar las variables y procesos incluidos en la determinación de las amenazas sobre el sistema troncal.
- C. Establecer la importancia de las amenazas y variables de riesgo sobre el sistema troncal de gas basado en la geografía del territorio.

## ESTADO DEL ARTE

El gas natural es uno de los recursos energéticos más demandados por tanto es indispensable garantizar su suministro ininterrumpido; debido a que fallas en el sistema afectarían diversos sectores de la sociedad, como lo son: el sector residencial, el industrial, el de transporte vehicular e inclusive el sector de generación de energía eléctrica (en situaciones de reducción de capacidad de las centrales hidroeléctricas). Una de las formas para asegurar este suministro, adicional a las buenas prácticas de extracción y la regulación de esta, es la forma en que se transporta ya sea a través de barcos metaneros, camiones y/o tuberías. (Becerra F. & Rodríguez Y., 2017). Para el caso de Colombia el uso del gas se remonta al descubrimiento de los campos de Santander, en esta época el gas era considerado un subproducto de la explotación del crudo y era quemado en los campos petroleros, situación que cambio a partir de 1961 cuando se empezó a dar valor a este recurso, en los años 70 se empezaron a construir los primeros gasoductos, siendo el primero el gasoducto de la Costa Atlántica. Años después, en 1992 la

Comisión Nacional de Energía aprobó el sistema de transporte de gas, separándolo en troncal, subsistemas y distribución, y en 1993 Ecopetrol fue quien ejerció la construcción de los gasoductos para conectar los campos de producción con los centros de consumo en el país. (Guerrero S. & Llano C., 2003). En la actualidad son varias las empresas que tienen concesiones frente a los gasoductos, siendo una de estas la Transportadora de Metano ESP.S.A. – TRANSMETANO, empresa que ejerce propiedad y operación del gasoducto Sebastopol – Medellín.



Figura 1 Línea troncal de transporte de gas  
Fuente: Transmetano E.S.P S.A.

Tabla 1 Cantidad aproximada de usuarios de gas natural

TIPO DE USUARIO	CANTIDAD USUARIOS
Residencial	1.200.000
Industrial	1.300
Comercial	17.000 aprox
Transporte	59.0000 vehículos
Metroplús	409 buses

Fuente: Transmetano E.S.P S.A. (2018)

Esta empresa al igual que muchas otras encargadas del transporte del recurso debe afrontar desafíos para garantizar la conducción del gas a través del gasoducto, siendo las principales problemáticas: la reducción en la disponibilidad del recurso, la necesidad de mantener un flujo mínimo para que el sistema funcione de manera óptima y las fallas en las tuberías, las cuales en algunas ocasiones se deterioran o dañan por la ocurrencia de eventos naturales como inundaciones, socavaciones, deslizamientos de tierra e inclusive incendios forestales,

razón por la cual es importante contar con los conocimientos e instrumentos técnicos que contribuyan al funcionamiento de la red, especialmente en el campo asociado a las amenazas ambientales, como lo son las amenazas de carácter hidrológico geológico e inclusive de incendio forestal, para las cuales a nivel regional la disponibilidad de información que permita un acercamiento a su identificación en campo y su valoración es poca. Siendo los estudios más representativos los aplicados en otros países como Brasil, donde a través de SIG se evaluaron Riesgos geotécnicos y ambientales

(Augusto F. et al, 2010) y China donde aplicando el método AHP-TOPSIS se realizó una evaluación integral de riesgos en oleoductos y gasoductos (Wang & Duan, 2019).

La modelación de estos riesgos requiere la identificación de variables ambientales, en las que destacan, la cobertura vegetal (IDEAM, 2012), la geomorfología, los tipos de suelo, la pendiente y la precipitación. Estas variables para el caso del Departamento de Antioquia son de gran relevancia debido a su topografía montañosa con pendientes que oscilan entre los 20° y los 40° (Feininger et al 1970) y la precipitación promedio alrededor de 230,5 mm/año (en lo que va de enero a diciembre del año corrido) lo que puede generar inconvenientes en diferentes zonas a lo largo de los 147.538 m que componen el sistema de gasoducto, en especial problemas por desestabilización de taludes que generan deslizamientos, crecientes e inundaciones, pérdida de suelo y cobertura vegetal, entre otros.

Respecto a estas problemáticas para el caso del gasoducto Sebastopol-Medellín según información histórica los riesgos geológicos son los más representativos, muestra de estos son los movimientos en masa que se presentaron durante el 2019 en la Vereda

Ancón 2 del Municipio de Copacabana. (El Colombiano, 2019)

Se registran algunos eventos de este tipo que han ocasionado fallas en otros gasoductos del país, como lo son: el deslizamiento ocurrido en junio de 2018 en un sector del gasoducto que moviliza gas desde los Llanos Orientales al interior del país (Boyacá y Cundinamarca), dicho suceso provocó la explosión de un tubo de 20 pulgadas (El Tiempo, 2018), lo cual generó la suspensión del suministro de gas y una serie de afectaciones ambientales y sociales, al igual que el deslizamiento que rompió el gasoducto Mariquita – Cali en diciembre de 2011 dejando al suroccidente del país sin abastecimiento de gas domiciliario y vehicular por varios días. Ambos operados por la empresa Transportadora de Gas Internacional – TGI (CNO-Gas, 2011)

## MARCO TEÓRICO

### Riesgo, Amenaza y Vulnerabilidad

El riesgo se ha definido de diferentes formas partiendo de la relación entre un hecho perjudicial y un elemento afectado por dicho suceso, relación que señala al evento o fenómeno agresor como la amenaza (A), y la susceptibilidad de la población a sufrir el impacto, es decir, la vulnerabilidad (V). De allí que se calcule el riesgo como:

Riesgo = Amenaza \* Vulnerabilidad = Amenaza + Vulnerabilidad (Reyes et al., 2017).

En esta relación se debe interpretar que no todo lo que ocurre depende únicamente del fenómeno, el elemento involucrado también tiene un papel fundamental, de este depende que se favorezcan o se agraven los efectos. Siendo así, se considera que el riesgo no puede reducirse a cero por lo tanto es necesario conocer las amenazas, ambas variables están en función de la otra.

La amenaza es el peligro oculto que un evento físico causado o inducido por la

acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdidas de vidas, así como daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

Las amenazas naturales son los fenómenos que por su propia naturaleza en algún momento de tiempo se convertirán en un peligro para el hombre. Existen diferentes tipos de amenazas ambientales, siendo las más frecuentes para Colombia las relacionadas con fenómenos hidrometeorológicos, resaltando la importancia de que en un mismo territorio pueden presentarse varios tipos de amenazas, aunque no todas con la misma frecuencia o intensidad, por lo que es necesario priorizarlas (Gobierno de Colombia, 2018).

La vulnerabilidad se puede definir como el nivel de exposición que presenta un sistema y que depende de la sensibilidad del mismo respecto a los impactos humanos o naturales (Montoya & Gaviria, 2011). Es una característica o propiedad de una comunidad o de un sistema que depende de la exposición a la amenaza, las condiciones del mismo para enfrentar dicho fenómeno y su resiliencia ante el evento, evaluando la debilidad que tienen los elementos que puedan ser perturbados o de tolerar pérdidas ante esta amenaza específica. Es importante relacionar la vulnerabilidad con el peligro que genera la amenaza más que con la misma amenaza.

Colombia es un país socialmente vulnerable dadas las condiciones meteorológicas que se le presentan, siendo el fenómeno de El Niño y la Niña los que afectan el país, además de los terremotos que se presentan por la cantidad de fallas en todo el territorio, fenómenos que exponen amenazas por inundaciones e incendios, movimientos en masa y avenidas torrenciales a lo largo del

territorio nacional (Gobierno de Colombia, 2018).

Es así como entre la amenaza y la vulnerabilidad debe existir una relación, y que al final, no es posible hablar de amenaza sin referirse a vulnerabilidad y viceversa. Debe haber una tendencia a sufrir daños, para que un evento natural, se convierta en amenaza con consecuencias que terminen en un desastre generando, además, riesgos económicos, sociales, ambientales, entre otros.

### Riesgo Ambiental

El riesgo ambiental se define como la posibilidad de que se produzca un deterioro en el medio ambiente por la acción de un fenómeno natural o antrópico y la intensidad de este daño dependerá del grado de vulnerabilidad de la población (Cardoso, 2019), estos riesgos tienen diferentes fuentes, resaltando los riesgos hidrológicos y geológicos, los cuales pueden ser evaluados y prevenidos dadas las variables y características del entorno de estudio.

El riesgo ambiental es tanto una consecuencia de la acelerada modernización o desarrollo que tiene las civilizaciones como de los cambios naturales que sufre el medio ambiente. Al conocer la amenaza y analizar la vulnerabilidad de un sistema ante ese fenómeno se puede definir la probabilidad de que el riesgo se convierta en un suceso y posteriormente en un desastre (Alfie, 2017).

En Colombia las inundaciones son de los problemas que más afecta el territorio, los fenómenos hidrometeorológicos generan mayores pérdidas que los fenómenos geológicos, “entre 1970 y 2011, las inundaciones causaron el 43% de las viviendas destruidas y el 10% de pérdida de vidas asociadas a desastres por fenómenos naturales en el país” (Muñoz & Arroyave, 2017).

El departamento de Antioquia cuenta con un relieve variado y unas alturas que oscilan desde los 0 m.s.n.m. hasta los 4080 m.s.n.m., presentando una gran variedad de ecosistemas y climas, resaltando los diferentes niveles de temperatura y lluvias que se presentan sobre toda la cordillera, es así como en el departamento durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 23 °C a 32 °C, y los niveles de lluvia y precipitación pueden variar en presencia del fenómeno de la Niña, la precipitación promedio anual del departamento es alrededor de 2000 mm/año lo que genera inconvenientes en diferentes zonas del territorio en especial problemas por desestabilización de taludes que generan deslizamientos, crecientes e inundaciones, pérdida de suelo y cobertura vegetal, entre otros (Spark, 2017).

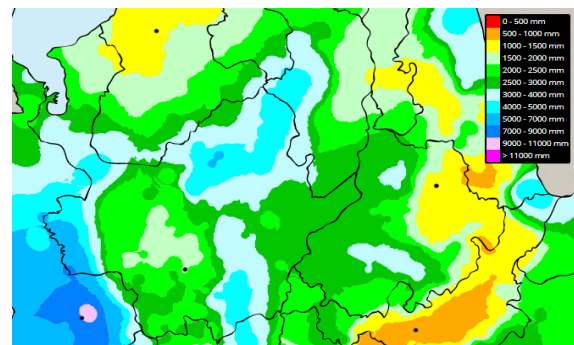


Figura 2 Grafico IDEAM Precipitación media total anual del departamento de Antioquia

Fuente: (IDEAM, 2014)

En cuestión de la geología y de los suelos presentes en el departamento se sabe que Antioquia está formada por una composición de rocas ígneas entre la Falla de Otú y el río Magdalena. La mayor parte del departamento está formado por una topografía montañosa, con pendientes que oscilan entre los 20° y los 40°. El relieve de esta región Andina tiende a decrecer de oeste a este hacia el sur del municipio de Puerto Berrio en su cercana al río Magdalena (Feininger et al., 1970).

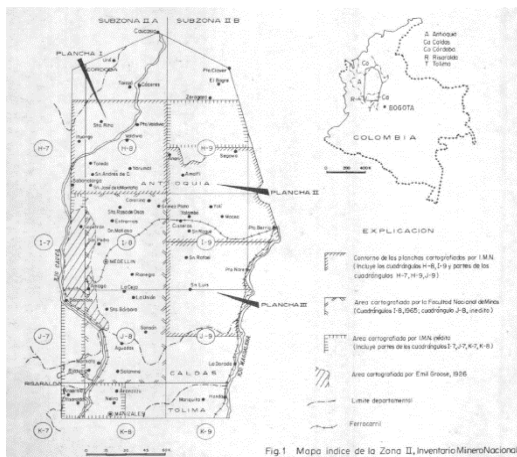


Figura 3 Planchas de la Subzona II  
**Fuente:** (Feininger et al., 1970)

Los riesgos hidrológicos son aquellos que aparecen por la acción de los procesos hídricos de la zona, identificando variables como el caudal, las lluvias, drenajes, entre otros (Caro- & Bayona, 2018). Los riesgos geológicos, tienen que ver con la estructura física y geológica del suelo, así como la cobertura vegetal que lo compone, algunas variables que generan estos riesgos son la pendiente, el tipo de suelo, características de la roca (Gijón, 2005), entre otros. Ambos riesgos se relacionan porque en algunos casos una amenaza geológica puede potenciar una hidrológica y viceversa.

Es importante delimitar la zona o área de interés e identificar las variables que determinan la amenaza, la vulnerabilidad y la probabilidad de ocurrencia (Marín & Otros, 2018).

Normalmente los riesgos hidrológicos y geológicos se presentan al hacer intervenciones antrópicas sobre el medio natural con el propósito de acondicionarlo a su visión. Para el caso de un proyecto lineal (Zohra, 2012) en donde el sistema debe ir enterrado en diferentes tramos es necesario realizar remociones de masa, esta acción es muy común en la región Andina del país debido al relieve montañoso y la necesidad de conexiones entre poblaciones. Es así como las remociones de masa en relación con otras variables, como la pérdida de

cobertura vegetal (primera capa del suelo), aumenta la posibilidad del riesgo y la magnitud de un desastre como los deslizamientos y deterioros en el sistema gasoducto (Mergili, et al, 2015).

Para el caso de un gasoducto puede entenderse su vulnerabilidad como la sensibilidad que presenta la infraestructura dadas sus características técnicas, ubicación y operación frente a las variables asociadas al riesgo hidrológico y geológico. Montoya & Gaviria, (2011), citan una metodología en la que se proponen cinco etapas para evaluar la vulnerabilidad, siendo estas:

La definición de objetivos y unidades de análisis territorial.

La identificación del tipo, cantidad y calidad de la información disponible.

La selección de un método apropiado de evaluación, así como la identificación del nivel de incertidumbre.

La ejecución y evaluación de la vulnerabilidad.

El chequeo y validación de resultados.

### **Riesgo ambiental y gasoductos. Metodologías aplicadas a su análisis**

Los riesgos ambientales, como deslizamientos de masa, inundaciones, incendios, terremotos y socavaciones pueden iniciar eventos y accidentes en los sistemas de tuberías, siendo algunos de estos eventos la liberación de sustancias peligrosas, incendios o explosiones. En el caso de los gasoductos la literatura muestra que se han desarrollado sistemas de análisis para detectar la tendencia y la vulnerabilidad de los tramos que conforman la red (Min Minas y Energía & INERCO, 2016), estos análisis han tomado como base principal la recopilación de datos, su revisión y el posterior análisis estadístico (Girgin & Krausmann, 2016). Estos análisis se han centrado en su mayoría en los riesgos



geológicos dado que los gasoductos son más susceptibles a riesgos de este tipo, dado que se ubican generalmente a un costado de las vías, enterrados y cerca de las zonas de ladera (Osma, 2015).

La metodología que se vaya a aplicar conllevará al análisis de varias variables o parámetros que deberán ser caracterizados y en muchos casos analizados de manera espaciotemporal. Respecto al análisis de las variables en el caso particular de los deslizamientos, en algunas metodologías, se propone seguir la premisa de que en estos eventos se tienen elementos pasivos y elementos activos, ya que los deslizamientos (Carrara & Guzzetti, 1999) ocurren cuando en una ladera, con una litología determinada, con cierto grado de humedad y con cierta pendiente, se alcanza un grado de susceptibilidad (elementos pasivos), el cual se ve influenciado por condiciones como las lluvias intensas (elementos activos). (Águila, 2013).

Este tipo de proyectos de gran longitud se desarrolla en diferentes lugares, dividiendo así las condiciones de amenaza para cada uno de estos sectores, afectando todo el sistema o solo una parte de este. Diferentes estudios han concluido que los riesgos ambientales no afectan por igual a todos los tramos que componen la red de transporte, logrando identificar que algunas partes del sistema son más susceptibles a riesgos específicos y que el nivel de impacto varía significativamente dependiendo del elemento afectado, es decir, si es una válvula, un equipo de control, la tubería, etc., por lo que es necesario evaluar las amenazas en cada uno de los elementos o escenarios del proyecto.

El gobierno de Colombia en su documento “Metodología para evaluar los Riesgos” (Gobierno de Colombia, 2018), propone que, para identificar las diferentes amenazas que pueden afectar el sistema se deben considerar tres dimensiones de análisis: del

entorno al proyecto (E), del proyecto al entorno (PE) y los riesgos internos del proyecto (IP).

El primer análisis (E) consiste en la identificación de las amenazas del entorno que pueden afectar el proyecto.

En el segundo de los análisis (PE), las amenazas del proyecto al entorno se pueden presentar de 4 formas: La primera es cuando el proyecto genera nuevas amenazas, que no se presentarían si no se ejecuta el proyecto; se pueden mencionar las amenazas de carácter tecnológico (explosiones, fugas incendios). La segunda forma examina la probabilidad que el proyecto falle y las consecuencias que se presenten sobre los elementos expuestos. La tercera y cuarta formas tienen en cuenta que el proyecto puede agravar o transformar una amenaza preexistente, bien sea porque modifica los factores condicionantes de la amenaza, o porque actúa como detonante de esta, o modifica su severidad, magnitud (probabilidad), área de afectación, velocidad, o cualquier otra característica de la amenaza.

La tercera dimensión (IP), sin ser menos importante, debe considerar los eventos generadores de amenaza al interior del proyecto, en particular los que afecten su integridad y/o funcionalidad. Al final, luego de haber identificado todas estas amenazas, se priorizan las que realmente son relevantes en el análisis.

El análisis de registros históricos de eventos se considera muy importante en el análisis de amenazas, por cuanto es el insumo inicial y en algunos casos es el único. Se debe ubicar el proyecto de forma precisa para determinar las diferentes amenazas a las que este es vulnerable. Una vez ubicado en su contexto general de amenazas, es importante revisar la historia de eventos ocurridos y registrados, como desastres y emergencias.

Son fuentes recomendadas aquellas que manejan bases de datos de registros como el IDEAM, el SGC, UNGRG, entre otros.

Esta metodología indica que las amenazas se deben organizar con una prioridad “Alta, Media o Baja”, teniendo como criterios la frecuencia y el potencial de daño.

Tabla 2 Criterio de frecuencia para la priorización de amenazas

Descripción	Criterio frecuencia
Sucede frecuentemente, una vez entre 1 y 5 años	Alta
Limitada posibilidad de ocurrencia o que sucede en forma esporádica; una vez entre los 5 y los 20 años	Media
Se espera que ocurra pocas veces, una vez o menos en 20 años	Baja

Fuente: (Gobierno de Colombia, 2018)

Tabla 3 Criterio de potencial de daño para la priorización de amenazas

Descripción	Criterio potencial de daño
Puede afectar gravemente elementos físicos (destrucción) y personas (muerte), así como interrupción de las actividades de la zona	Alto
Puede afectar de manera moderada los elementos físicos, las actividades y las personas, sin que se generen muertes humanas	Medio
Solamente se presentarían daños físicos leves	Bajo

Fuente: (Gobierno de Colombia, 2018)

Al relacionar estas dos Tablas se pueden encontrar diferentes criterios de priorización para las amenazas:

		Potencial de daño		
		Alto	Medio	Bajo
Frecuencia	Alta	A	A	M
	Media	A	M	B
	Baja	M	B	B

A=Alta, M=Media y B=Baja

Figura 4 Combinación de criterios para priorización de amenazas

Fuente: (Gobierno de Colombia, 2018)

Si el resultado de la priorización de amenazas indica que el proyecto se encuentra en una zonificación de amenaza alta se debe profundizar en reconocer los factores condicionantes y detonantes de estas amenazas.

Los factores condicionantes son aquellas condiciones propias que hacen más susceptible el área de estudio a la ocurrencia del evento que se estudia.

Tabla 4 Factores condicionantes

Eventos	Variables para considerar
Inundaciones	<ol style="list-style-type: none"> <li>Régimen hidráulico (Torrencial, planicie, etc.)</li> <li>Geomorfología (llanuras de inundación)</li> <li>Concepto de ronda / Zonas de protección</li> </ol>
Movimientos en masa	<ol style="list-style-type: none"> <li>Factores contribuyentes (Litología, morfometría, morfodinámica y cobertura vegetal.)</li> </ol>
Avenidas torrenciales	<ol style="list-style-type: none"> <li>Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)</li> <li>Aspectos geomorfológicos (Ubicación en zonas de depositación - abanicos)</li> <li>Presencia de obras u otros que obstaculicen el flujo del agua.</li> <li>Presencia de procesos de inestabilidad en las márgenes de la parte superior de la cuenca hidrográfica</li> </ol>
Sequías	<ol style="list-style-type: none"> <li>Serías históricas de precipitación</li> </ol>
Incendios forestales	<p>Probabilidad de ignición:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Susceptibilidad de la cobertura vegetal</li> <li>Condiciones climáticas favorables</li> </ol> <p>Probabilidad de propagación:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Susceptibilidad de la cobertura vegetal</li> <li>Factores climáticos</li> <li>Relieve</li> <li>Accesibilidad</li> </ol>

Fuente: (Gobierno de Colombia, 2018)

Los factores detonantes son los responsables de que efectivamente se produzca el fenómeno, actuando como disparadores del evento amenazante. Son específicos para cada amenaza y varían de acuerdo con el área del estudio.

Tabla 5 Factores detonantes

Eventos Amenazantes	Factores detonantes
Inundaciones	Precipitaciones
Movimientos en masa*	Sismos Precipitaciones
Avenidas torrenciales	Precipitaciones Erupción Volcánica Sismos Deslizamientos Deshielo por otras causas diferentes a las erupciones volcánicas.
Vendavales	No aplica
Erosión costera	Oleaje
Ascenso en el nivel del mar	Incrementos en la temperatura global, por causa del cambio climático, que originan derretimiento de glaciares y, por tanto, ascenso en el nivel del mar
Incendios forestales	Acciones antrópicas (Intencionales y no intencionales) Naturales (Por ejemplo: tormentas eléctricas)
Sequías	No aplica

Fuente: (Gobierno de Colombia, 2018)

La meteorología y los sismos son los factores detonantes recurrentes en las diferentes amenazas que se pueden presentar en este tipo de proyecto lineal.

Una vez identificadas las amenazas se pueden identificar las zonas en dónde las condiciones de cada escenario o sección del proyecto favorecen en mayor o menor medida la ocurrencia del evento.

Para identificar el nivel de vulnerabilidad de este elemento físico (un gasoducto) se debe analizar a partir de coberturas espaciales que permita un reconocimiento de los diferentes niveles de vulneración en los que se encuentre la estructura a lo largo del proyecto debido a las amenazas presentes en cada tramo. Así mismo, como en la amenaza, se puede definir un nivel “Alto, Medio o Bajo” para la vulnerabilidad según sea su exposición ante los eventos de amenaza.

Luego de identificar y reconocer los eventos de amenaza presentes sobre el proyecto y el nivel de vulnerabilidad en los diferentes tramos se procede a hacer la valoración del riesgo, la cual se basa en la relación de amenaza y vulnerabilidad, se propone la siguiente matriz:

		Vulnerabilidad		
		Alta	Media	Baja
Amenaza	Alta	A	A	M
	Media	A	M	M
	Baja	M	M	B

A=Alto, M=Medio y B=Bajo

Figura 5 Criterios de riesgo

Fuente: (Gobierno de Colombia, 2018)

Se hace una visualización del riesgo y posterior desastre sobre el sistema para tener una comprensión y priorización de los problemas como la formulación y ejecución de las acciones de intervención requeridas

ante dicho evento. Un escenario de riesgo se representa por medio de la caracterización y/o análisis de los factores de riesgo, sus causas, la relación entre las causas, los actores causales, el tipo y nivel de daños que se pueden presentar, toma de decisiones para reducir la exposición al riesgo, entre otras. De esta manera, la forma de evaluar el riesgo ambiental que puede sufrir un sistema gasoducto es mediante 3 pasos:

- Identificación y caracterización de escenarios de riesgo y cálculo del riesgo, a partir de la categorización de amenaza y de vulnerabilidad.
- Valoración del riesgo y aplicación de criterios de seguridad, aceptabilidad y tolerancia.
- La evaluación del riesgo propiamente dicha, para la toma de decisiones en la definición de medidas de reducción del riesgo.

### Sistemas de información geográfica (SIG)

La implementación de la geoinformática como herramienta en la gestión ambiental permite tener un mejor alcance de las problemáticas y encontrar soluciones a nivel global que apliquen para todo el entorno en conflicto (Zeballos & Soruco, 2014) que otro tipo de procesos, además estas herramientas son utilizadas en diferentes áreas académicas para manejar extensos volúmenes de información geográfica (Rosario, 2004), haciendo énfasis en los instrumentos de teledetección como la técnica de capturar, tratar y analizar las imágenes (Cisneros, 2017) de la superficie terrestre tomadas desde el espacio (Alex et al., 2014), facilitando el manejo de datos espaciales, lo que permite hacer análisis con mayor profundidad y de manera integral.

Según Escobar & Valdés (2017) “las capacidades de análisis espacial de los SIG se soportan en una serie de herramientas y

modelos potentes y versátiles, cuya aplicación recibe el nombre genérico de análisis espacial y que, en su aceptación más simple, se puede entender como la construcción de elementos geográficos que representan la ocurrencia de fenómenos, procesos y variables del mundo real a partir de alguna información base, que puede ser una medición del fenómeno o una evidencia de su presencia”, esta información base debe ser cuidadosamente colectada, revisada y estructurada. En este sentido toma importancia la calidad e incluso la cantidad de información disponible, así como la disponibilidad, la edad de los datos, el alcance o área de cobertura, el formato, la escala, la resolución, e incluso la relevancia de los datos pues en algunas ocasiones se tiene mucha información que termina siendo depurada al no ser representativa para la solución del problema.

Es así como las herramientas SIG permiten hacer el reconocimiento sobre la capa terrestre de diferentes variables como la geología, las pendientes, alturas, curvas de nivel, cobertura del suelo, carreteras, ciudades, áreas quemadas (Anaya, 2018), drenajes, ríos, etc.

Existen diferentes modelos o métodos para analizar la información recolectada, dependiendo de la cantidad de dichos datos y su calidad se puede trabajar con modelos binarios o jerárquicos, algunos son:

Modelo de evidencias binarias – Solución dicotómica:

Técnica usada en contextos de información escasa, en la que la valoración de los factores involucrados se hace de forma absoluta, si el valor existe se asigna el valor de 1, en caso contrario se asigna 0 (Escobar & Valdés, 2017).

Modelo de evidencias binarias – Solución ponderada:

Es una alternativa en el estudio de problemas espaciales en los cuales se posee un

conocimiento mayor respecto a los fenómenos a ser modelados y en los cuales es posible establecer cierta ponderación de las variables debido a su dominancia en la solución, pero no se tiene un conocimiento detallado de los valores que asume cada variable (Escobar & Valdés, 2017).

Métodos jerárquicos ponderados

Se emplean cuando se tiene la posibilidad de establecer jerarquías estandarizadas (reglas cuantitativas) en cada una de las variables bajo estudio y adicionalmente si cada variable puede ser a su vez ponderada en la combinación lineal que produce la solución.

Dentro de estos métodos destaca el Método Saaty o AHP, en el cual se involucra todos los aspectos del proceso de toma de decisiones al ordenar el pensamiento analítico en 3 principios (Escobar & Valdés, 2017):

1. El principio de la construcción de jerarquía.
2. El principio del establecimiento de prioridades.
3. El principio de la consistencia lógica.

### **Método AHP (Analytic Hierarchy Process)**

AHP es un método de análisis cualitativo o cuantitativo para la toma de decisiones. Se basa en la descomposición de los elementos relacionados con la toma de decisiones en niveles objetivos, de criterios y de atributos. Es un método de análisis de decisión de peso jerárquico que fue propuesto por el investigador operacional estadounidense Saaty en 1971 (Jozi & Iraokhahi, 2010).

Varios métodos han sido derivados de AHP después de años de desarrollo. Estos métodos incluyen AHP mejorado, AHP difuso y AHP gris y tienen su propio alcance de implementación de acuerdo con la situación real del estudio. Se ha encontrado que el modelo AHP mejorado es apropiado

para calcular el peso del índice de evaluación de riesgo de oleoductos y gasoductos (Wang & Duan, 2019).

La aplicación de los modelos de toma de decisiones resulta ser de gran utilidad ya que se requiere de una visión multidisciplinaria dada la concepción del riesgo, la vulnerabilidad y las variables que inciden en esta, motivo por el cual es evidente la necesidad de tomar conceptos y herramientas asociados al tipo de riesgo que se pretende analizar. Para el caso del Riesgo Ambiental resulta ser útil la asociación de los modelos tradicionales con herramientas geoinformáticas como los SIG, debido a que la ocurrencia de este tipo de riesgos está influenciada por las particularidades de una zona o región, condiciones que pueden ser abordadas de una manera espacial.

## METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo del presente trabajo, de acuerdo con los objetivos planteados se divide en las siguientes etapas:

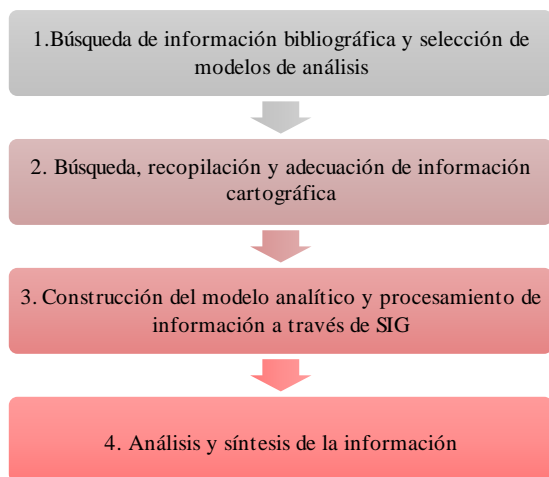


Figura 6. Diagrama metodología  
Fuente. Elaboración propia

### 1. Búsqueda de información bibliográfica y selección de modelos de análisis

Se realiza la búsqueda de información asociada a la evaluación e identificación de riesgos, vulnerabilidad y amenazas

naturales, teniendo prelación aquellos estudios enfocados en el campo de la geología y la hidrología en proyectos de gasoductos y oleoductos y en general proyectos de carácter lineal; esta búsqueda se desarrolla en bases de datos como Scencedirect y Springer, e igualmente en plataformas como ResearchGate y Google Academy.

A partir de la información encontrada y teniendo en cuenta que varios de los estudios desarrollados a la fecha emplean procesos de análisis jerárquico, por tal razón el presente trabajo aplica la metodología propuesta por Saaty.

### 2. Búsqueda, recopilación y adecuación de información cartográfica

Se realiza la consulta de información cartográfica en diferentes portales de datos abiertos: IGAC, SGC, IDEAM. La información se recopila en una GDB creada para el desarrollo del trabajo

En este ítem se tiene en cuenta la delimitación del área de estudio, la cual corresponde a un polígono de 13 747 500 000 m<sup>2</sup> que cubre una extensa zona por la cual pasa el gasoducto Sebastopol-Medellín.

Teniendo conocimiento de la localización de la zona de interés, se realiza el proceso de ajuste el cual consiste en verificar el sistema de coordenadas de la información y realizar las respectivas transformaciones para que toda la información este en el sistema Magna Sirgas Colombia Bogotá.

Se realizan los procesos de análisis espacial a través del software ArcGIS para obtener las diferentes capas que serán empleadas en el estudio. Estos procesos consisten en la elaboración de mosaicos con imágenes Alos Palsar, Sentinel y Landsat, según la necesidad (Ver Tabla 5) dado que la zona de estudio es amplia y una sola imagen no cubre todo el territorio. Los mosaicos obtenidos son empleados en la elaboración del mapa de pendientes, la estimación del índice de vegetación de diferencia normalizada

(NDVI) y el mapa de Temperatura Superficial, respectivamente. Los últimos 2 mapas requieren de un proceso más minucioso ya que se deben aplicar correcciones de reflectividad.

En el caso de la estimación del NDVI, se emplean las Bandas 4 y 8 (Rojo e Infrarrojo) y se genera la composición a través de un código de Python. Respecto a la temperatura superficial se emplea la Banda 10 (Infrarrojo Termal).

También se recortan las capas tomando como referencia el área de trabajo y se realizan procesos de interpolación con el modelo IDW para obtener la distribución espacial y comportamiento de variables meteorológicas como la precipitación.

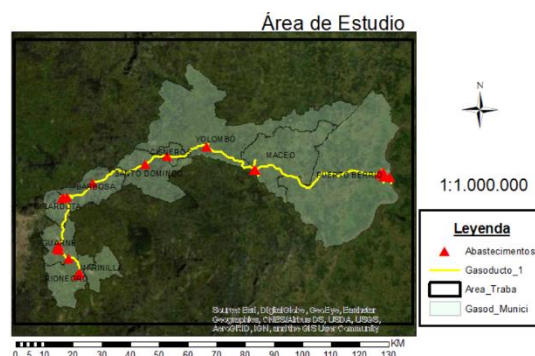


Figura 7. Mapa área de estudio  
Fuente. Elaboración propia

El área de estudio comprende una zona bastante amplia, en la cual se ubican 10 municipios que tienen incidencia directa con el sistema gasoducto principal, son municipios con condiciones geográficas muy variadas que presentan diferentes fenómenos ambientales.

Tabla 5. Información mínima requerida para caracterizar la zona de interés

TIPO DE INFORMACIÓN	REPRESENTACIÓN	CARACTERIZACIÓN	FUENTE	
<b>Cartografía básica</b>	Red de drenaje	Hidrografía	IGAC	
	Divisiones político-administrativas	Municipios en el área de estudio		
<b>Cartografía temática</b>	Geología	Tipo de roca, edad geológica	Planchas (131,132,133,147 y 149) Servicio Geológico Colombiano - SGC	
	Geomorfología	Pendiente (Inclinación del terreno)	DEM ALOS PALSAR	FECHA
			AP_26112_FBS_F0110_RT1	12/19/2011
			AP_26958_FBS_F0100_RT1	02/15/2011
			AP_26958_FBS_F0110_RT1	02/15/2011
			AP_26958_FBS_F0120_RT1	02/15/2011
			AP_27206_FBS_F0100_RT1	03/04/2011
			AP_27206_FBS_F0110_RT1	03/04/2011
AP_27206_FBS_F0120_RT1	03/04/2011			
AP_27373_FBS_F3500_RT1	03/15/2011			
Cobertura vegetal	Tipos de cobertura	IDEAM	Imágenes Sentinel (27 de agosto 2019) S2B_MSIL1C_20190827T152649_N0208_R025_T18NWM_20190827T202224	
	NDVI			
Sismos Fallas geológicas			Servicio Geológico Colombiano - SGC	
<b>Meteorológica</b>	Precipitación Temperatura	Caracterización climatológica Temperatura Superficial	IDEAM (Estaciones: Cimitarra, Concepción, Corrientes, Cruces arriba, La Cuchilla, La selva, Los llanos de Cuiba, Maceo, Marinilla, Montañitas, Murillo, Puerto Boyacá, San Isidro, San Roque, Santa Helena, Santo Domingo, Tafetanes, Tulio Ospina, La Unión, Virginias, Yolombo ) Imágenes Landsat 8 (27 de agosto y 3 de septiembre 2019)	

### 3. Construcción del modelo analítico y procesamiento de información a través de SIG

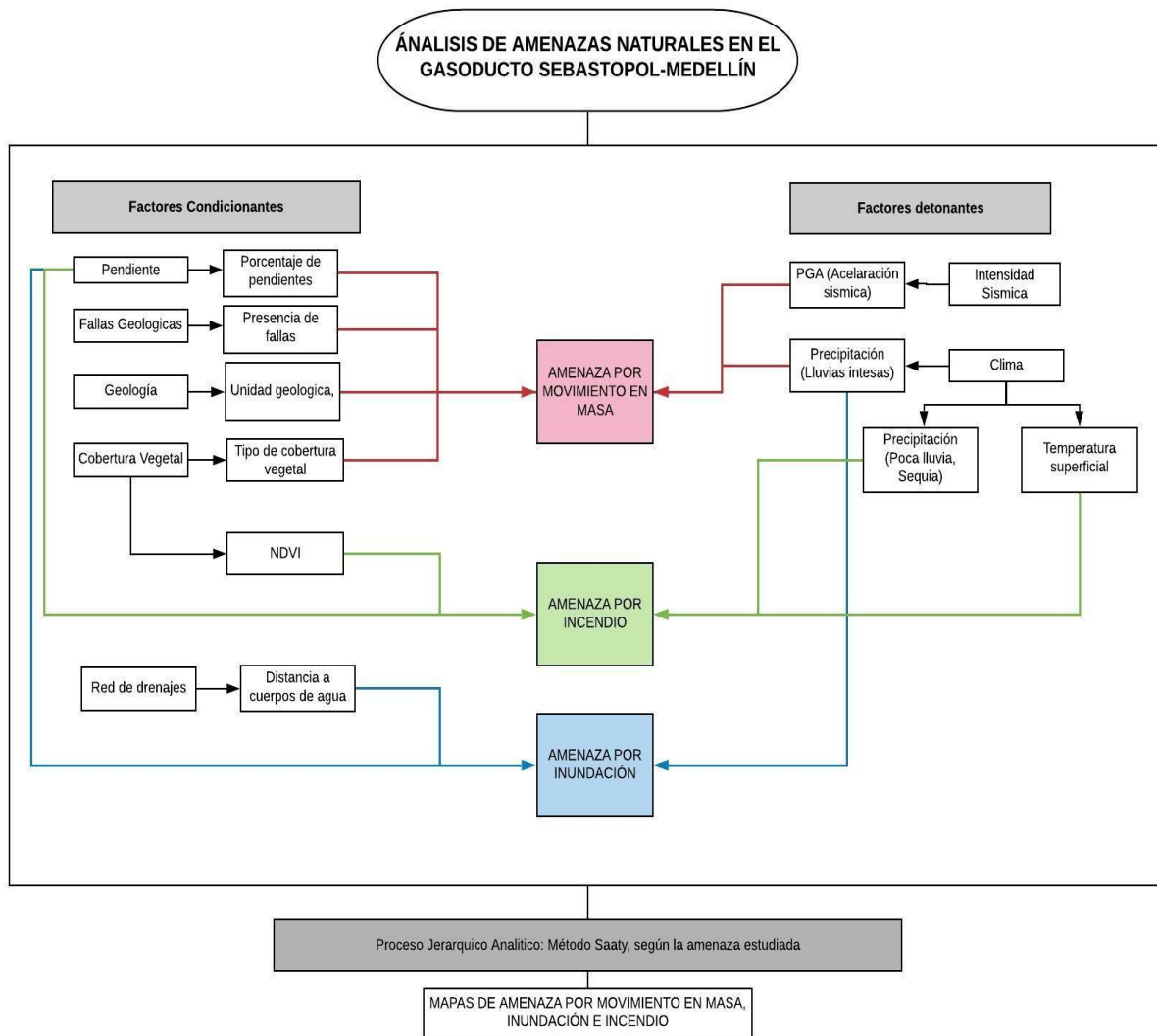


Figura 8. Modelo analítico  
Fuente. Elaboración propia

En esta etapa se realiza la selección de las variables que se pueden analizar teniendo en cuenta la información disponible. Esto con el fin de determinar la amenaza a través de la tipificación de las variables teniendo en cuenta la importancia que toman en el desarrollo de movimientos en masa, inundaciones e incendios forestales. Para esto se emplea el modelo matemático de Saaty, el cual ha sido configurado en un Software desarrollado por Julián Darío Giraldo Ocampo, Juan Carlos Valdés Quintero, John Fernando Escobar y Juan Sebastián Benjumea Garcés, esta herramienta permite obtener los pesos para cada una de las variables facilitando la modelación espacial de las mismas.

Para establecer la jerarquización de las variables y dar los pesos ponderados a cada una de ellas, se implementó un cuestionario a través del cual se consultó a varias personas la importancia que ellos darían a cada una de las variables, tomando como base los principios de comparación de Saaty. Los resultados obtenidos fueron analizados y contribuyeron a la toma de decisiones en el presente trabajo.

Los pesos asignados a cada variable son:

Tabla 6. Pesos ponderantes para cada variable

<b>MOVIMIENTOS EN MASA</b>	
VARIABLE	PESO
Fallas geológicas	34%
Cobertura vegeta	24%
Pendiente	18%
Precipitaciones	12%
Sismos	7%
Geología	5%
<b>INUNDACIONES</b>	
VARIABLE	PESO
Precipitaciones	69%
Distancia a redes hídricas	21%
Pendiente	10%
<b>INCENDIOS</b>	
VARIABLE	PESO
NDVI	52%
Temperatura superficial	26%
Precipitaciones	16%
Pendientes	7%

Fuente. Elaboración propia.

Respecto a la calificación asignada a cada variable, con el objetivo de mantener una misma escala de valoración se consideran valores entre 1 y 5, tomando como base un modelo restrictivo; en el cual, una calificación de 1 indica una restricción Muy Baja y por tanto menor incidencia en la susceptibilidad a movimientos en masa, inundaciones o incendios, 2 una restricción Baja, 3 una restricción Moderada, 4 una restricción Alta y 5 una restricción Muy Alta, es decir un nivel significativo de incidencia en la susceptibilidad de los procesos estudiados.

### 3.1. Movimientos en masa

Se califican las variables: Pendiente, Cobertura Vegetal, Precipitación, Geología, Fallas Geológicas y Sismos (Potencial de daño); las cuales han recibido un valor teniendo en cuenta la literatura y el criterio técnico de quienes elaboran el presente estudio. Autores como (Augusto et al., 2010), (Seejata, et al, 2018), (Águila, 2013) proponen modelos que han sido analizados y adaptados a las características del territorio donde se ubica el área estudiada, pues se ha encontrado que para variables como la pendiente los rangos establecidos en algunos estudios corresponden a zonas poco escarpadas, contrario a las características de Colombia, en este orden de ideas el Estudio de riesgo geológico sobre plataforma SIG. análisis de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la provincia artemisa, Cuba. (Águila, 2013), es uno de los que más se acercan a las características de la zona de interés al presentar pendientes superiores a 30 grados.

Tabla 7. Calificación Pendiente

PENDIENTE	VALOR
0-12%	1
12-25%	2
25-50%	3
50-75%	4
>75%	5

Fuente. Elaboración propia.

Para el caso de la cobertura vegetal los modelos planteados en la literatura sugieren



que las zonas donde el suelo es desnudo o con coberturas pobres la incidencia en movimientos en masa es alta, mientras que zonas con obras de estabilización, bosques densos, plantaciones forestales tienen una incidencia baja.

Tabla 8. Calificación Cobertura Vegetal

COBERTURA VEGETAL	VALOR
Aeropuertos, Bosque abierto, Bosque de galería y ripario, Bosque denso, Cuerpos de agua artificiales, Cultivos confinados, Cultivos permanentes arbóreos, Cultivos permanentes arbustivos. Cultivos permanentes herbáceos, Instalaciones recreativas, Lagunas, lagos y ciénagas naturales, Nubes, Plantación forestal, Ríos, Tejido urbano continuo, Tejido urbano discontinuo, Zonas industriales o comerciales, Zonas pantanosas, Zonas verdes urbanas	1
Bosque fragmentado, Cereales, Obras hidráulicas, Zonas de extracción minera	2
Arbustal, Herbazal, Mosaico de cultivos, Mosaico de cultivos con espacios naturales, Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, Mosaico de pastos con espacios naturales, Mosaico de pastos y cultivos, Vegetación secundaria o en transición.	3
Pastos arbolados, Pastos enmalezados, Pastos limpios	4
Tierras desnudas y degradadas, Zonas arenosas naturales, Zonas quemadas	5

Fuente. Elaboración propia.

La calificación asignada a las unidades geológicas, dada su particularidad para cada territorio, se ha definido tomando como base los tiempos geológicos, según los cuales rocas que se ubican en periodos como el cuaternario generalmente presentan mayor restricción dada su poca edad y por tanto menor consolidación, mientras que rocas generadas en el Precámbrico presentan una restricción mínima. Adicionalmente se tomó como referente información del Servicio Geológico Colombiano –SGC, entidad en la cual se han desarrollado varios análisis de susceptibilidad por geología, en estos análisis se evalúan las unidades geológicas a partir de su densidad de fracturamiento, su

resistencia, y su textura, siendo esta última la característica que se empleara como lineamiento para calificar las unidades, esto teniendo en cuenta la disponibilidad y calidad de la información. Según su textura las unidades geológicas se dividen en 5 clases, el SGC ha propuesto una calificación de susceptibilidad para cada una de estas, de la siguiente manera:

**Textura Cristalina masiva:** Corresponde a las rocas más resistentes y menos deformables, salvo las rocas volcánicas cuya calidad es un poco dispersa según sean porosas o no lo sean. Ejemplos: granitos, basaltos, calizas, chert, cuarcitas y mármoles. Calificación 1.

**Textura Cristalina bandeada:** Rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, conformando bandas composicionales con alguna influencia direccional. Ejemplo: Neis. Calificación 2.

**Textura Clástica Cementada:** Rocas con partículas cementadas, con resistencia y deformación variable, dependiendo de la calidad del material cementante, la relación matriz-clastos y el grado de empaquetamiento general que posea. Ejemplos: areniscas, conglomerados. Calificación 3.

**Textura Clástica Consolidada:** Rocas sedimentarias presentan un comportamiento variable esfuerzo-deformación, con direccionalidad de sus propiedades mecánicas. La resistencia se acrecienta con el grado de consolidación diagenética. Ejemplos: arcillolitas, lodolotas, shales. Calificación 4.

**Textura Cristalina foliada y rocas de falla:** Rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, con una orientación preferencial a lo largo de la cual las rocas son menos resistentes. Su calidad se dispersa como consecuencia de su fábrica orientada, es decir, por los planos de esquistosidad y foliación. Ejemplos: Pizarras, filitas, esquistos, milonitas. Calificación 5.

Adicionalmente en el área de estudio se identifican depósitos de diverso origen, para los cuales también se toma como guía la calificación propuesta por el SGC (Servicio Geológico Colombiano, 2018).

De acuerdo con estas descripciones se procede a realizar la identificación de la textura de las unidades geológicas presentes en el área de estudio y posteriormente se asigna la calificación.

Tabla 9. Calificación Unidades Geológicas

UNIDADES GEOLOGICAS	VALOR
a, d, ga, J1Ma, J2Se, Jdse, Jg, Jgsd, Jvm, K2ba, K2bap, K2d, K2mg, K2ta, K2to, Ka, Kg, Kqd, Kqdf, m, nf, nfh, nq, pEm, PRam, PRga, PCn, Q1lg, Q2al, Qal,t, Tdm, apm da, Emb, es, Kc, Kca, pCan, PEsl, rv, Tal	1
Fgs, Mpns1,nc, ni, p, PRgb, PRmpp, PRnlc, PRnms, q, Qpl, Qt, Tmm	2
N2m, O1Cr, Olc, PRgn, Tmr	3
Kiss, KSe, Ksh, N2Q1?ev, N2Q1lf, Q1Q2t, s	4
PZeanc, Q2v	5

Fuente. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que una falla es una fractura planar a lo largo de la cual la roca se ha desplazado según una dirección que es generalmente paralela al plano de ruptura (puede ser horizontal, vertical u oblicua), como consecuencia de la aplicación de un estrés (Hans Niemeyer, 2005). Se ha analizado esta variable a partir de su presencia en el área de estudio, haciendo un análisis de densidad, en el cual todas las zonas con influencia de fallas tienen una restricción moderada y aquellas donde se presenta más de una tienen restricción alta y muy alta.

Tabla 10. Calificación Fallas Geológicas

FALLAS GEOLOGICAS (Densidad Km <sup>2</sup> )	VALOR
0	1
0-0.17	2
0.17-0.35	3
0.35-0.53	4
0.53-0.88	5

Fuente. Elaboración propia.

La amenaza relativa por movimientos en masa bajo la incidencia del factor sismo ha sido analizada a partir del Potencial de daño, el cual según los rangos de PGA (Aceleración Máxima del Terreno) a nivel de roca propuestos en la Escala de Mercalli puede ir de Ningún potencial de daño a potencial de daño muy fuerte.

Tabla 11. Calificación Potencial de daño

POTENCIAL DE DAÑO	VALOR
Ninguno – Muy leve	1
Ligero	2
Moderado	3
Moderado a fuerte	4
Fuerte - Muy fuerte	5

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 12. Calificación Precipitación

PRECIPITACIÓN (mm/día)	VALOR
0-10	1
10-15	2
15-25	3
25-30	4
>30	5

Fuente. Elaboración propia.

### 3.2. Inundación

La literatura asociada al análisis de amenazas y riesgos por inundaciones se enfoca en la evaluación del riesgo de la población y las viviendas, pocos estudios evalúan este riesgo en infraestructuras como gasoductos, dentro de los estudios consultados destacan los desarrollados por (Seejata et al., 2018) y (Rincón, et al, 2018). Estos estudios proponen que las zonas con pendientes bajas sean tomadas como sectores de susceptibilidad alta, mientras que zonas con rangos de pendiente muy altos se encontraran menos expuestas.

Tabla 13. Calificación Pendiente

PENDIENTE	VALOR
>75%	1
50-75%	2
25-50%	3
12-25%	4
0-12%	5

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 14. Calificación Precipitación

PRECIPITACIÓN (mm/día)	VALOR
0-10	1
10-15	2
15-25	3
25-30	4
>30	5

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 15. Calificación Distancia Red Hídrica

DISTANCIA RED HIDRICA	VALOR
>500	1
200-500	2
100-200	3
40-100	4
0-40	5

Fuente. Elaboración propia.

### 3.3. Incendios Forestales

En el análisis de amenaza de incendios forestales, se cuenta con referentes como: Sivrikaya, et al, 2014 y (Mukti, et al, 2016). Estos autores proponen la identificación de factores condicionantes a partir de variables como el tipo de cobertura vegetal y/o el valor índices de vegetación como el NDVI, en la zona estudiada, asignando mayor restricción (3,4 y 5) a aquellos sectores donde se presentan valores altos en el NDVI, ya que estos son asociados a presencia de alguna cobertura vegetal y valores menores a aquellas zonas donde el NDVI es igual o menor 0, pues representan zonas de suelo desnudo, nubes, cuerpos de agua e infraestructuras. Los rangos han sido determinados luego de comparar los compuestos NDVI y Color Real, proceso a través del cual se identificaron las coberturas de la tierra más representativas.

Tabla 16. Calificación NDVI

COBERTURA	NDVI	VALOR
Cuerpos de agua	<0	1
Suelo desnudo, Infraestructura, Nubes	0 – 0.1	2
Pastos y cultivos	0.1 – 0.20	5

Vegetación poco densa (Arbustos, matorrales y bosques con poca cobertura)	0.20 – 0.32	4
Vegetación densa (Bosques)	>0.32	3

Fuente. Elaboración propia.

En cuanto a la precipitación se tiene que aquellos sectores que presentan baja precipitación serán más susceptibles a incendios forestales ya que las coberturas presentes en la zona no tendrán tanta disponibilidad de agua para retener lo cual facilita su incineración y adicionalmente la temporada de sequía u reducción de las lluvias contribuirá al aumento de la temperatura.

Tabla 17. Calificación Precipitación

PRECIPITACIÓN (mm/día)	VALOR
0-10	5
10-15	4
15-25	3
25-30	2
>30	1

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 18. Calificación Temperatura Superficial

TEMPERATURA SUPERFICIAL	VALOR
8-15.2	1
15.2-22.4	2
22.4-29.6	3
29.6-36.8	4
36.8-44	5

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 19. Calificación Pendiente

PENDIENTE	VALOR
0-12%	1
12-25%	2
25-50%	3
50-75%	4
>75%	5

Fuente. Elaboración propia.

## DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE AMENAZA NATURAL

Con los pesos ponderados y las variables reclasificadas se procede a generar los mapas de amenaza por movimiento en masa, inundación e incendio forestal.

$$Amenaza = (V_1 \times P_1) + (V_2 \times P_2) + (V_3 \times P_3) + \dots + (V_N \times P_N)$$

Donde **V** corresponde a la variable estudiada y **P** al peso ponderante asignado con el Método de Saaty.

Con el fin de facilitar la interpretación de la información obtenida en los mapas generados se procede a reclasificar nuevamente sintetizando los niveles de amenaza en 3 categorías

Tabla 20. Reclasificación Amenazas

VALOR	RANGO	DESCRIPCIÓN
1	1 – 2.3	AMENAZA BAJA
2	2.3 – 3.6	AMENAZA MODERADA
3	3.6 – 5	AMENAZA ALTA

Fuente. Elaboración propia.

Finalmente, para cumplir con el objetivo de diseñar un sistema de información geográfica de consulta y localización de amenazas los mapas de amenaza se unen aplicando una ecuación que permitirá la generación de una clave con combinaciones de los valores 1, 2 y 3.

$$Clave = (Mapa\ Mov\ Masa \times 100) + (Mapa\ Inundación \times 10) + (Mapa\ Incendio \times 1)$$

Este mapa resultante brinda 27 combinaciones entre los 3 fenómenos de amenaza evaluados, esto permite identificar celda por celda el grado para cada tipo de amenaza.

## DETERMINACIÓN DEL COSTO DE RIESGO Y RUTA ÓPTIMA

Para determinar el costo de riesgo del gasoducto se genera un mapa de costos, a partir del mapa de amenazas naturales, el cual previamente se une con un mapa de corredores; el cual incluye infraestructura

existente de vías, líneas de transmisión, gasoductos y oleoductos. La existencia de infraestructuras de este tipo facilita el acceso a diferentes zonas, además de tener un historial de comportamiento ambiental sobre dichas zonas, de esta manera se conoce el nivel de amenaza en ciertos sectores donde el terreno ya ha sido sometido a medidas de mitigación y prevención de amenazas. Este mapa de corredores ha sido generado teniendo en cuenta una distancia de 50m a cada costado de dichas infraestructuras.

Finalmente se genera la ruta óptima que debería tener el gasoducto con base al costo de riesgo y las evaluaciones realizadas a lo largo de este estudio.

Estos procesos se desarrollan empleando las herramientas *Cost Distance* y *Cost Path As Polyline* y 3 estaciones de referencia, como lo son la estación final ubicada en Puerto Berrio, la estación de derivación de oriente (EDO) ubicada en Barbosa y la estación de Rionegro.

## 4. Análisis y síntesis de la información

### AMENAZAS NATURALES

Una vez aplicado el modelo analítico y los respectivos procesos de geoprocésamiento se encontró que en la zona de estudio el nivel de amenaza más representativo para el caso de los movimientos en masa y las inundaciones es bajo, mientras que para la amenaza por incendios el nivel es moderado.

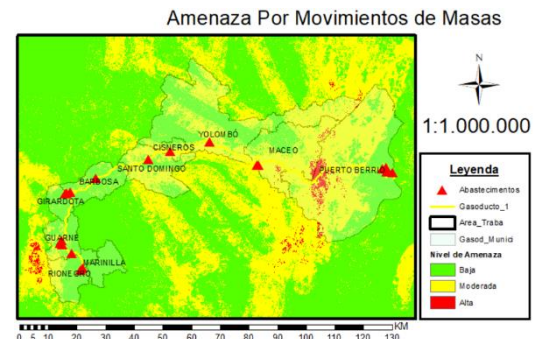


Figura 9. Mapa amenaza por movimientos en masa

Fuente. Elaboración propia

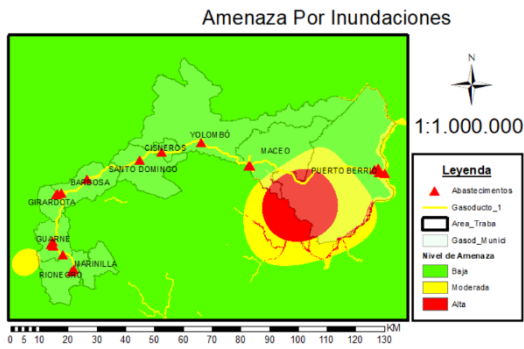


Figura 10. Mapa amenaza por inundaciones  
Fuente. Elaboración propia

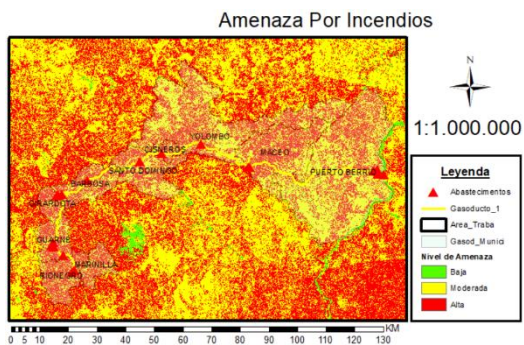


Figura 11. Mapa amenaza por incendio forestal  
Fuente. Elaboración propia

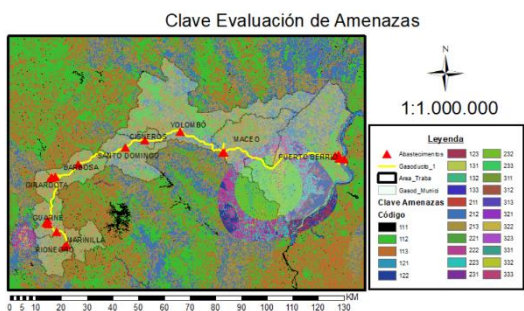


Figura 12. Mapa clave evaluación de amenazas (amenaza global)  
Fuente. Elaboración propia

El mapa Clave genera códigos de 3 dígitos, los cuales indican el nivel de amenaza para cada fenómeno evaluado, para determinar un nivel de amenaza global en cada combinación de códigos se emplea la siguiente matriz:

Tabla 21. Matriz de amenazas

		AMENAZA 2		
		1	2	3
AMENAZA 1	1	1	2	2
	2	2	2	3
	3	2	3	3

Donde 1= Baja, 2= Moderada, 3= Alta

Fuente. Elaboración propia

En los resultados del mapa Clave se encontraron que hay 26.057.001 celdas con código 112, el cual indica un grado de amenaza baja para movimientos en masa, un grado de amenaza baja para inundaciones y un grado de amenaza moderada para incendios, con un tamaño de celda de 12,5 x 12,5 se obtiene un área de celda igual a 156,25 m<sup>2</sup>, teniendo un área total de 407.140,64 ha con un nivel de amenaza moderado.

Se identifica que el nivel de amenaza global que predomina es el moderado, tanto en el número de combinaciones, como en extensión, dado que ocupa aproximadamente el 77% del territorio evaluado, seguido del nivel de amenaza alta (22%) y finalmente el nivel de amenaza baja (1%), esta última solo se presenta en las zonas donde el código corresponde a 111.

Tabla 22. Área en m<sup>2</sup> del Nivel de Amenaza

NIVEL DE AMENAZA	AREA (m2)	%
Alta	3.055.112.813	22
Baja	140.309.218,8	1
Moderada	10.553.214.688	77
TOTAL	13.748.636.719	100

Fuente. Elaboración propia

Es importante identificar todos los fenómenos naturales que pueden generar amenazas sobre este tipo de sistemas al momento de planificar la ejecución de proyectos y hacer esfuerzos para prevenir la materialización de las mismas en aquellos sectores donde actualmente se tienen

proyectos ya sean de carácter puntual o lineal. Respecto al gasoducto se evidencia que, a pesar de que el nivel de amenaza más representativo es el moderado, la distribución espacial de las amenazas no es uniforme por tanto el nivel no se concentra en una zona en particular, así que es relevante identificar las zonas de amenaza alta y analizar las medidas correctas para realizar el proyecto por dichas áreas.

Según los resultados obtenidos en el mapa Clave se evidencia que se debe tener prioridad en el monitoreo de los tramos localizados en los municipios de Puerto Berrio, Maceo, Yolombo, Cisneros y Santo Domingo ya que estos atraviesan varios sectores que se categorizan en un nivel de amenaza alta.

Para el caso de Puerto Berrio la amenaza por movimiento en masa es representativa, en esta zona también se concentra la amenaza por inundación, al verificar las variables analizadas se evidencia que en este sector los registros en la intensidad de lluvia son altos y adicionalmente confluyen varias fallas geológicas, además de encontrarse cerca el río Magdalena y los afluentes que desembocan en él. Para el resto del territorio la amenaza que más predomina es la de incendio forestal, esta condición tiene fundamento en la diversidad y abundancia de coberturas vegetales, en especial el tipo de pasto enmalezado, arbusto y vegetación secundaria que en caso de presentarse un conato de incendio podría contribuir a la rápida propagación del mismo.

En cuanto a los sistemas de corredores existentes en la zona de interés, la superposición de estos con el sistema troncal de transporte de gas de Antioquia permite evidenciar que varios tramos de este se interceptan en diferentes sectores con infraestructuras como: Líneas de transmisión Porce II, Doble calzada que comunica a Medellín con la costa Caribe, Oleoducto Cusiana-Coveñas, y Gasoducto Barrancabermeja – Neiva. La presencia de infraestructuras de este tipo genera en la zona un nivel de restricción bajo, es decir, se reduce la probabilidad de ocurrencia de amenazas naturales, ya que estas obras requieren de constante mantenimiento, monitoreo y controles, por tanto, la aplicación de medidas de prevención en estos sectores posiblemente es más constante.

## COSTO DE RIESGO Y RUTA ÓPTIMA

Al hacer una comparación entre la ruta existente o actual contra la ruta optima calculada a partir de los mapas de amenazas y corredores obtenemos que la ruta calculada tiene una menor longitud y un menor costo ambiental, este último se analiza teniendo en cuenta los valores en los cuales los niveles de amenaza son más bajos y es ahí por donde la ruta hace su trazado, de esta manera el ducto se mueve por las celdas en las cuales encuentra valores de amenazas bajos y presencia de corredores que faciliten el acceso.

Tabla 23. Costo y longitud del gasoducto

TRAMO	RUTA EXISTENTE		RUTA ÓPTIMA	
	COSTO	LONGITUD (Km)	COSTO	LONGITUD (Km)
Puerto Berrio - Derivación Oriente	133281.97	134.25	133281.97	122.11
Derivación Oriente - Tasajera	2506.74	2.41	1898.41	1.87
Derivación Oriente - Rionegro	33858.4	34.45	33307.36	30.51
<b>TOTAL</b>	<b>169647.11</b>	<b>171.11</b>	<b>168487.74</b>	<b>154.49</b>

Fuente. Elaboración propia



Figura 13. Mapa zona de estudio  
Fuente. Elaboración propia

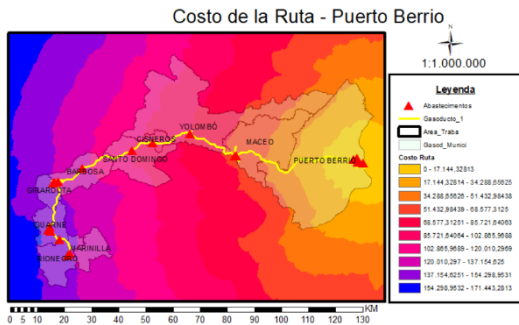


Figura 14. Mapa costo del tramo Puerto Berrio – Estación de derivación oriente- EDO  
Fuente. Elaboración propia

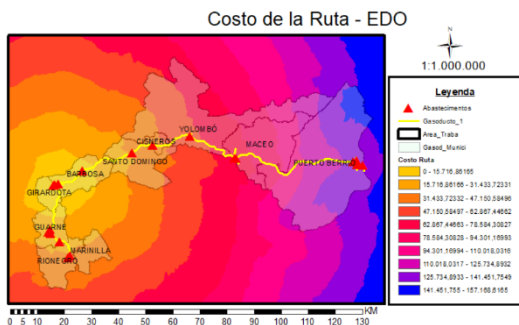


Figura 15. Mapa costo del tramo EDO-Rionegro  
Fuente. Elaboración propia

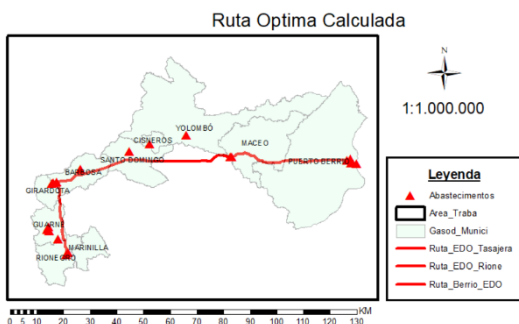


Figura 16. Mapa ruta optima calculada  
Fuente. Elaboración propia

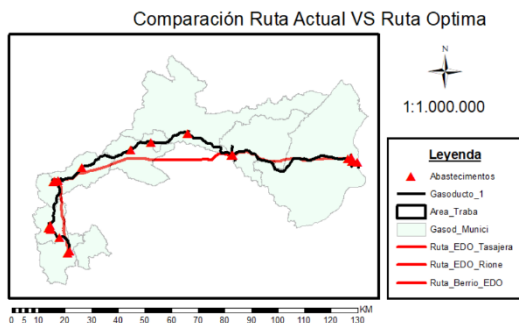


Figura 17. Mapa ruta actual vs ruta optima  
Fuente. Elaboración propia

Como podemos notar en la imagen anterior, la ruta actual dibujada en color negro se

ubica dentro de los municipios, mientras que la ruta optima calculada es más directa entre las estaciones principales de abastecimiento, por esta razón es que se presenta una distancia de 10,56 km de separación entre ambos ductos en la zona del municipio de Yolombo y el municipio de San Roque.

## CONCLUSIONES

- El departamento Antioqueño por ubicarse sobre la cordillera central posee una amplia variedad de condiciones geográficas, las cuales representan un reto para los diferentes proyectos de desarrollo, que deben estar planificados teniendo en cuenta las dinámicas del territorio, tanto a nivel social, como ambiental, aspecto en el que las herramientas SIG son de gran utilidad, ya que permite analizar grandes extensiones del territorio y tomar las decisiones correctas que sean viables tanto económica como ambientalmente.
- El desarrollo de este tipo de estudios para tener mayor veracidad debe estar acompañado con visitas a campo que soporten los resultados (en ambas direcciones), además de contar con un grupo interdisciplinario de profesionales que apoyen, bien sea asesorando temas o participando en el diseño de los modelos que representaran la dinámica de la zona de estudio.
- De acuerdo con los pesos ponderantes obtenidos para cada variable, a través del Método Saaty, se evidencia que el desempeño del mismo dependerá del criterio técnico y la jerarquización de las variables analizadas, condición que es determinada teniendo en cuenta el objetivo del estudio y la representatividad de los fenómenos analizados. La aplicación de este método será determinante en los resultados ya que los porcentajes obtenidos son los aplicados en el álgebra de mapas.
- Es importante tener en cuenta que el alcance del estudio puede ser más amplio respecto a la elección de las variables que se analizan para cada amenaza; en este caso las variables analizadas están

condicionadas por la disponibilidad y acceso a la información. En futuros estudios se pueden tener en cuenta otras variables como: Cercanía a centros poblados, Humedad, Velocidad y Dirección del viento, Uso actual del suelo, Características del suelo: tipo de suelo, infiltración, permeabilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Águila, A. (2013). Estudio de riesgo geológico sobre plataforma sig. análisis de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la provincia artemisa, Cuba. *XI Congreso Cubano de Informatica y Geociencias*, 10.
- Alex, F., Viviana, S., Torres, Q., Sebasti, J., Ing, T. C., & Mor, D. C. (2014). *Aproximacion sistemas de percepción remota en satélites pequeños*.
- Alfie Cohen, M. (2017). Riesgo Ambiental: La Aportación De Ulrich Beck. *Acta Sociológica*, 73, 171–194. <https://doi.org/10.1016/j.acso.2017.08.006>
- Anaya, J. A. (2018). Identificación de áreas quemadas mediante el análisis de series de tiempo en el ámbito de computación en la nube. *Revista de Teledetección*, (51), 61. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8618>
- Augusto Filho, O., Hirai, J. N., Oliveira, A. S., & Liotti, E. S. (2010). GIS applied to geotechnical and environmental risk management in a Brazilian oil pipeline. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69(4), 631–641. <https://doi.org/10.1007/s10064-010-0310-2>
- Becerra Fernández, M., & Rodriguez Yee, R. (2017). Selection of Alternatives for the Natural Gas Supply in Colombia Using the Analytic Hierarchy Process. *Revista Ingeniería*, 22(2), 190–210. Retrieved from <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/10922/12575>
- Cardoso, M. M. (2019). Estudio de la vulnerabilidad y la resiliencia en la ciudad de Santa Fe, Argentina: El rol de los servicios urbanos en general y del transporte de pasajeros en particular. *Revista de Geografía Norte Grande*, 159(73), 133–159. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022019000200133>
- Caro-Camargo, C. A., & Bayona-Romero, J. A. (2018). Hydro-dynamic modeling for identification of flooding zones in the city of Tunja. *Revista Facultad de Ingenieria*, 2018(89), 40–54. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n88a05>
- Carrara, A., & Guzzetti, F. (1999). Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural Hazards*, 20(2–3), 117–135. <https://doi.org/10.1023/A:1008097111310>
- Cisneros, H. (2017). Determination of physical variables of the mendocino piedmont through the use of remote sensing tools in relation to geological risks. *Serie correlación geológica*, 33(1–2), 101–110.
- Escobar, J. F., & Valdés, J. C. (2017). *Geoinformática aplicada con Aprendizaje Basado en Problemas Instituto Antioqueño de Investigación Capítulo 14*, 149 -156
- Feininger, T., Barrero, D., & Castro, N. (1970). GEOLOGÍA DE PARTE DE LOS DEPARTAMENTOS DE ANTIOQUIA Y CALDAS (SUB-ZONA II-B) Memoria Explicativa. *Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas*, XX, 2–3.
- Gijón, F. (2005). *Análisis de la vulnerabilidad por movimientos de ladera: Desarrollo de las metodologías para evaluación y cartografía de la vulnerabilidad*. 220. Retrieved from



- [http://info.igme.es/SidPDF/113000/263/113263\\_0000010.pdf](http://info.igme.es/SidPDF/113000/263/113263_0000010.pdf)
- Girgin, S., & Krausmann, E. (2016). Historical analysis of U.S. onshore hazardous liquid pipeline accidents triggered by natural hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, 578–590. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.02.008>
- Gobierno de Colombia. (2018). *Metodología para evaluar los riesgos*. 1–137. Retrieved from <https://www.dnp.gov.co/programas/ambiente/gestion-del-riesgo/Paginas/gestion-del-riesgo.aspx>
- Guerrero Suárez, F., & Llano Camacho, F. (2003). Caso de estudio. Gas natural en Colombia -Gas e.s.p. *Estudios Gerenciales*, (87), 115–146.
- Hans Niemeyer. (2005). *Apuntes de Geología General*. 114.
- IDEAM. (2012). Mapa de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Período 2000-2002. Escala 1:100.000. *Area*, TH-62-04-1(257), 16.
- IDEAM. (2014). Atlas climatológico de Colombia. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 0. Retrieved from <http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>
- Jozi, S. A., & Iraokhahi, M. (2010). Environmental risk assessment of gas pipelines by using of AHP combined method. *Journal of Environmental Studies*, 36(53), 107–120.
- Marín, R. J., & Otros. (2018). Evaluación del riesgo de deslizamientos superficiales para proyectos de infraestructura: caso de análisis en vereda El Cabuyal. *Ingeniería y Ciencia*, 14(27), 153–177. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.14.27.7>
- Mergili, M., Santiago, C. I. M., & Moreiras, S. M. (2015). *Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina*. 24(2), 113–131. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50211>
- Min Minas y Energía, & INERCO. (2016). *Diagnóstico subsectorial de vulnerabilidades y cálculo de riesgos derivados de los impactos asociados al cambio climático y a la variabilidad climática en la industria de hidrocarburos*. 38.
- Montoya, D. M., & Gaviria, J. I. (2011). *Las aguas subterráneas un recurso vital para la sostenibilidad*. 340.
- Mukti, A., Prasetyo, L. B., & Rushayati, S. B. (2016). Mapping of Fire Vulnerability in Alas Purwo National Park. *Procedia Environmental Sciences*, 33, 290–304. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.080>
- Muñoz-Duque, L. A., & Arroyave, O. (2017). Percepción del riesgo y apego al lugar en población expuesta a inundación: un estudio comparativo. *Pensamiento Psicológico*, 15(2), 79–92. <https://doi.org/10.11144/javerianacali.ppsi15-2.pral>
- Osma, O. J. G. (2015). *análisis de vulnerabilidad mediante seguimiento fotográfico y uso de metodología para evaluar vulnerabilidad de tuberías (Caso de estudio)*. Universidad de Santander.
- Reyes Rivero, A. C., De Jesús, A., Pacheco, M., Germania, P., García, C., Narciza, M., & Vera, Z. (2017). Amenaza, vulnerabilidad y riesgo ante eventos naturales. Factores socialmente construidos Threat, risk and vulnerability to natural events. Socially constructed factors. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 2(6), 22–28.
- Rincón, D., Khan, U. T., & Armenakis, C. (2018). Flood risk mapping using GIS and multi-criteria analysis: A greater toronto area case study. *Geosciences (Switzerland)*, 8(8).

<https://doi.org/10.3390/geosciences8080275>

- Rosario, E. J. F. (2004). Geoinformática e Investigación Geográfica Situación Actual y Perspectiva. *For*, 59–81.
- Seejata, K., Yodying, A., Wongthadam, T., Mahavik, N., & Tantanee, S. (2018). Assessment of flood hazard areas using Analytical Hierarchy Process over the Lower Yom Basin, Sukhothai Province. *Procedia Engineering*, 212, 340–347.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.044>
- Servicio Geológico Colombiano. (2018). *Anexo a Susceptibilidad Por Geología*.
- Wang, X., & Duan, Q. (2019). Improved AHP–TOPSIS model for the comprehensive risk evaluation of oil and gas pipelines. *Petroleum Science*, (0123456789).  
<https://doi.org/10.1007/s12182-019-00365-5>
- Zeballos, G., & Soruco, Á. (2014). Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia. *Ecología En Bolivia*, 49(3), 14–26. <https://doi.org/ISSN1605-2528>
- Zohra. (2012). Vulnerability assessment of water supply network. *Energy Procedia*, 18, 772–783.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.093>

