

Identificación de amenazas de clima y fuerzas externas en el ducto MANATIE mediante  
aeronaves no tripuladas con sensores LIDAR

Manuela Mora Guerrero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Metalúrgica

Director

Sandra Judith García Vergara

Doctora en Corrosión

Codirector

Nelson Adolfo Camargo Hernández

Especialista en Gerencia de Mantenimiento y Confiabilidad

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímica

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

Con profunda gratitud, dedico este trabajo primeramente a Dios, por guiar mi camino y darme la fortaleza necesaria en cada etapa de mi vida.

A mi querido padre, Luis Alfonso, por su apoyo incondicional, sus enseñanzas y sacrificios que han hecho posible que hoy pueda cumplir este logro. A mi madre, Isabel, por su amor, sus oraciones y por enseñarme con su ejemplo el verdadero significado del esfuerzo y la dedicación. A ambos les agradezco por inculcarme el valor del estudio, la perseverancia y la importancia de nunca rendirme en la búsqueda de los sueños, pues este logro no sería posible sin ustedes.

A mis hermanos Álex, Javier y Julián, quienes con su disciplina, valentía y espíritu de superación han sido una inspiración constante, además de brindarme compañía y apoyo en cada momento de este proceso. A Zonia y a mis sobrinos, Mariana y Juan Andrés, por alegrar mis días y motivarme con su espontaneidad, incluso sin proponérselo.

***Manuela Mora Guerrero***

### **Agradecimientos**

Mi más sincero agradecimiento a Dios, fuente de fortaleza e inspiración en cada etapa de este camino.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de Materiales, por brindarme una formación integral, no solo académica, sino también humana, que ha sido fundamental en mi desarrollo profesional y personal.

Extiendo también mi gratitud a la Corporación CIMA por abrirme las puertas para la realización de mi práctica profesional y por ofrecerme la oportunidad de continuar aprendiendo en el ámbito laboral. En especial, al ingeniero Nelson Adolfo Camargo Hernández, de la división de RBI, por su comprensión, guía y valiosas enseñanzas que han marcado mi crecimiento. Asimismo, a todos los compañeros de RBI, tanto a quienes estuvieron anteriormente como a los actuales, gracias por compartir sus conocimientos y por motivarme a descubrir el valor de esta maravillosa área.

Finalmente, expreso un cálido agradecimiento a la profesora Sandra Judith Vergara García, por su paciencia, apoyo y orientación constante a lo largo de este proceso.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico.....	15
2.1 Sensor LIDAR .....	15
2.2 Clasificación de sensores LIDAR.....	15
2.2.1 LIDAR terrestre .....	15
2.2.2 LIDAR aéreo.....	15
2.3 Configuración LIDAR aéreo.....	15
2.3.1 Aeronave no tripulada (UAS) .....	16
2.3.2 Sensor láser .....	16
2.3.3 Sistema de medición inercial (IMU).....	16
2.3.4 Cámara digital fotogramétrica .....	16
2.4 Fotogrametría.....	16
2.4.1 Fotogrametría aérea .....	17
2.5 Productos fotogramétricos .....	17
2.5.1 Nube tridimensional del terreno.....	17
2.5.2 Modelos digitales de elevación.....	17
2.5.3 Curvas de nivel .....	18
2.6 API 1160 .....	18

2.7 Tipos de amenazas .....	18
2.7.1 Erosión hidráulica .....	19
2.7.2 Erosión .....	19
2.7.3 Cargas localizadas.....	19
2.8 Método RUSLE .....	19
2.8.1 Factor R: Erosividad de la lluvia .....	20
2.8.2 Factor K: Erodabilidad del suelo .....	20
2.8.3 Factor LS: Longitud y pendiente .....	21
2.8.4 Factor C: Cobertura vegetal .....	21
2.8.5 Factor P: Prácticas de conservación.....	21
3. Metodología .....	22
3.1 Recopilación de información del ducto y del entorno .....	22
3.2 Planificación del vuelo LIDAR .....	23
3.3 Procesamiento de datos LIDAR.....	23
3.4 Aplicación del método RUSLE .....	23
3.5 Ejecución de la visita de campo.....	24
4. Resultados y discusión.....	24
4.1. Información ducto de transporte Manatie .....	24
4.2 Ubicación geográfica .....	25
4.3 Diseño del vuelo LIDAR .....	26
4.4 Procesamiento de datos LIDAR.....	27
4.4.1 Análisis clasificación nube de puntos .....	28
4.4.2 Análisis de curvas de nivel .....	29

4.4.3 Análisis de modelo digital de elevación (DEM).....	30
4.5 Aplicación del método RUSLE .....	32
4.5.1 Análisis factor de erosividad (R) .....	33
4.5.2 Análisis factor de erodabilidad (K).....	34
4.5.3 Análisis factor topográfico (LS) .....	35
4.5.3.1 Análisis subfactor pendiente (S).....	36
4.5.3.2 Análisis subfactor longitud de pendiente (L).....	37
4.5.4 Análisis pérdida de suelo (A).....	37
4.6 Visita de campo.....	38
5. Conclusiones .....	44
Referencias Bibliográficas .....	47
Apéndices.....	50

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Características de diseño y operación ducto Manatie .....	25
Tabla 2. Estaciones pluviométricas del IDEAM en el área de estudio .....	33
Tabla 3. Factor K de Kirby y Morgan.....	35
Tabla 4. Factor K de Kirby y Morgan, aplicado a la zona de estudio .....	35
Tabla 5. Identificación de puntos críticos en visita de campo .....	40

**Lista de Figuras**

	Pág.
Figura 1. Metodología.....	22
Figura 2. Trazado ducto Manatie .....	26
Figura 3. Zona restringida del área de estudio .....	26
Figura 4. Delimitación del área e inicio de los vuelos fotogramétricos.....	27
Figura 5. Clasificación de nube de puntos según la cobertura del área de ubicación del ducto Manatie .....	28
Figura 6. Curvas de nivel del área de ubicación del ducto Manatie .....	30
Figura 7. Modelo digital de elevación (DEM) del área de ubicación del ducto Manatie .....	31
Figura 8. Puntos críticos identificados en la segmentación del ducto Manatie .....	40

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Mapa del factor erosividad del área de ubicación del ducto Manatie.....	50
Apéndice B. Factor de erodabilidad (k) del área de ubicación del ducto Manatie .....	51
Apéndice C. Mapa de pendiente en radianes del área de ubicación del ducto Manatie .....	52
Apéndice D. Mapa del subfactor topográfico del área de ubicación del ducto Manatie .....	53
Apéndice E. Puntos de erosión crítica del ducto Manatie .....	54

## Resumen

**Título:** Identificación de amenazas de clima y fuerzas externas en el ducto MANATIE mediante aeronaves no tripuladas con sensores LIDAR.\*

**Autor:** Manuela Mora Guerrero.\*\*

**Palabras Clave:** Amenazas dependientes del clima y fuerzas externas, sensor LIDAR, productos geoespaciales, método RUSLE, fotogrametría aérea, API 1160.

**Descripción:** Este estudio se centró en analizar las condiciones del terreno en el área de influencia del ducto Manatie, con el fin de identificar amenazas asociados a factores de clima y fuerzas externas que puedan afectar su integridad. Para ello, se empleó el uso de aeronaves no tripuladas (UAS) equipadas con sensores LIDAR y cámaras fotogramétricas, cuya combinación, junto con técnicas de fotogrametría permitieron la obtención de datos geoespaciales de alta precisión. El procesamiento de datos se realizó en software LiGeoreference, el cual facilitó la clasificación de la nube de puntos, diferenciando coberturas como edificaciones, densidad de la cobertura vegetal y superficie del terreno.

Esto permitió obtener información más detallada sobre la morfología del terreno, a partir de la cual se empleó para la generación de curvas de nivel y modelos digitales de elevación (DEM) en el software ArcGIS, que ayudó a la reducción de interferencias y errores en la interpretación de los resultados.

El análisis de los productos geoespaciales permitió identificar amenazas relevantes para el ducto Manatie, entre ellas se destacaron los procesos de socavación, diferencias altimétricas, cambios en la cobertura vegetal y fenómenos erosivos evaluados mediante el método RUSLE. Asimismo, se realizó una visita de campo para validar los puntos críticos y comprobar la eficiencia del sensor LIDAR como del método RUSLE en la identificación de dichas amenazas.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Sandra Judith García Vergara. Doctora en corrosión. Codirector: Nelson Adolfo Camargo Hernández. Especialista en Gerencia de Mantenimiento y Confiabilidad.

### Abstract

**Title:** Identification of weather and external forces hazards in the MANATIE pipeline using unmanned aircraft with LIDAR sensors.\*

**Author(s):** Manuela Mora Guerrero.\*\*

**Key Words:** Climate-dependent threats and external forces, LIDAR sensor, geospatial products, RUSLE method, aerial photogrammetry, API 1160.

**Description:** This study focused on analyzing the terrain conditions in the area of influence of the Manatie pipeline, in order to identify threats associated with climate factors and external forces that could affect its integrity. To this end, unmanned aerial vehicles (UAS) equipped with LIDAR sensors and photogrammetric cameras were used, which, in combination with photogrammetry techniques, enabled the collection of high-precision geospatial data. Data processing was performed using LiGeoreference software, which facilitated the classification of the point cloud, differentiating between cover types such as buildings, vegetation density, and terrain surface.

This made it possible to obtain more detailed information on the morphology of the terrain, which was then used to generate contour lines and digital elevation models (DEM) in ArcGIS software, helping to reduce interference and errors in the interpretation of the results.

The analysis of geospatial products made it possible to identify relevant threats to the Manatie pipeline, including erosion processes, altimetric differences, changes in vegetation cover, and erosion phenomena evaluated using the RUSLE method. A field visit was also conducted to validate the critical points and verify the efficiency of the LIDAR sensor and the RUSLE method in identifying these threats.

---

\* Undergraduate Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Metallurgical Engineering. Adviser: Sandra Judith García Vergara. PhD in corrosion. Co-adviser: Nelson Adolfo Camargo Hernández. Specialist in Maintenance and Reliability Management.

## Introducción

Los hidrocarburos, tanto crudos como refinados, son transportados desde los centros de producción y refinerías hacia los centros de consumo, para esto se utilizan principalmente los llamados gasoductos y oleoductos (Castiblanco Urrego & Cárdenas Romay, 2023). Este sector de transporte de hidrocarburos representa una gran ventaja para la región, ya que no solo representa un gran potencial de desarrollo, sino también un potencial operativo clave en los procesos de extracción y refinación, fundamentales para el sostenimiento y crecimiento de la economía del país (Rodríguez, 2019). Asimismo, simbolizan una fuente esencial de generación de energía indispensable tanto en la vida cotidiana y los hogares, como en el funcionamiento de las industrias (Sánchez Oyola, 2017).

La ubicación remota y difícil acceso de la mayoría de los gasoductos y oleoductos los expone a diversos riesgos, como el deterioro por las condiciones geotécnicas del terreno, fuerzas climáticas, factores ambientales y corrosión, entre otros. Esta situación compromete significativamente la integridad de la infraestructura como la estabilidad del terreno, aumentando la posibilidad de daños graves que van desde desprendimientos, pérdida superficial del terreno, fugas y en casos extremos explosiones (API, 2019). Por lo tanto, se requieren métodos de diagnóstico no invasivos y de largo alcance que permitan detectar anomalías con alta seguridad y precisión, incluso mientras la infraestructura está en pleno funcionamiento. Esto permitiría un análisis más exhaustivo del comportamiento de los ductos y sus derechos de vía frente a las variables mencionadas anteriormente.

La fotogrametría y la tecnología LIDAR surgen como respuesta a estas problemáticas, ofreciendo soluciones efectivas permitiendo diagnósticos precisos mediante la captura de imágenes para la generación de modelos digitales de elevación (DEM). Para la obtención de estas

imágenes se pueden emplear una amplia gama de dispositivos, destacándose entre estos el Drone por su capacidad de acceso a zonas de difícil alcance. Estas técnicas altamente efectivas optimizan la detección temprana de fallas, sino que contribuyen significativamente a garantizar el cumplimiento de los estándares establecidos por la norma API 1160 en la evaluación de amenazas relacionadas con fuerzas climáticas y externas.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar e identificar amenazas dependientes del clima y fuerzas externas que puedan comprometer la integridad del ducto Manatie, mediante el uso de sensores LIDAR y fotogrametría aérea.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Recopilar y analizar información relevante del entorno y del ducto de transporte, incluyendo datos geospaciales obtenidos con sensores LIDAR, ortofotos, documentación técnica y bibliografía relacionada.

Procesar y clasificar los datos recolectados mediante el uso de herramientas técnicas y software especializados para generar modelos digitales de elevación y mapas detallados del derecho de vía del ducto Manatie.

Identificar los puntos críticos del derecho de vía del ducto Manatie donde se presenten amenazas asociadas a factores climáticos y de fuerzas externas, con base en el análisis geoespacial de los datos obtenidos con sensores LIDAR y fotogrametría aérea, complementados con el cálculo de erosión mediante el método RUSLE.

Efectuar una visita de campo con el fin identificar los puntos críticos y amenazas presentes en el ducto Manatie y contrastarlos con los productos geospaciales generados mediante tecnología LIDAR, evaluando así la precisión y aplicabilidad de esta tecnología en la detección de estas amenazas.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1 Sensor LIDAR**

El término proviene del acrónimo en inglés “Light Detection And Ranging”. Esta tecnología permite la captura precisa y detallada de los objetos o superficies en tres dimensiones, generando una nube de puntos de alta densidad y exactitud métrica. Con lo cual es posible efectuar cálculos, generar planos, así como modelar digitalmente diferentes elementos en 2D/3D (Arranz Justel, 2013).

### **2.2 Clasificación de sensores LIDAR**

Los sensores LIDAR se pueden clasificar según el medio en el que son transportados, dividiéndose en sensores terrestres y sensores aéreos.

#### ***2.2.1 LIDAR terrestre***

Consiste en un sensor LIDAR instalado sobre un trípode, ubicado en una superficie de forma fija o móvil, lo que permite una cobertura del área de interés y la obtención de nubes de puntos densas que facilitan la identificación de objetos (Arranz Justel, 2013).

#### ***2.2.2 LIDAR aéreo***

Sensor láser instalado en aeronaves que pueden ser helicópteros, aviones o vehículos aéreos no tripulados (UAS), que barren las superficies entre el sensor y el terreno desnudo, obteniendo como resultado una nube de puntos con coordenadas precisas para la generación de modelos digitales de elevación (Arranz Justel, 2013).

### **2.3 Configuración LIDAR aéreo**

Para garantizar su correcto funcionamiento el sensor LIDAR está compuesto por una serie de componentes que permiten la emisión, recepción y procesamiento de señales láser.

### ***2.3.1 Aeronave no tripulada (UAS)***

También conocido como dron o UAV (Vehículo Aéreo No Tripulado), es una aeronave diseñada para volar sin un piloto a bordo, operada de manera remota en tierra o de manera autónoma mediante sistema de navegación programada (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2024).

### ***2.3.2 Sensor láser***

Componente encargado de emitir pulsos láser hacia la superficie y medir el tiempo que tarda en reflejarse para obtener distancias entre el instrumento y el área u objeto escaneado (Giongo et al., 2010).

### ***2.3.3 Sistema de medición inercial (IMU)***

Sensores diseñados para determinar con precisión los datos de elevación del dispositivo en el que están instalados. Esto se debe a la combinación de acelerómetros y giroscopios que permiten también la obtención de datos sobre la variación de la aceleración y la altitud (Salamanca Céspedes & Pérez Castillo, 2007).

### ***2.3.4 Cámara digital fotogramétrica***

Cámaras especializadas para misiones de fotogrametría, equipadas con sensores de alta resolución y lentes intercambiables de enfoque fijo, que garantizan una captura precisa de imágenes en tiempo real. Igualmente, permite obtener productos georreferenciados con precisión, posición y orientación de alta calidad. (DJI, s. f.).

## **2.4 Fotogrametría**

Disciplina que combina ciencia y arte para obtener información sobre la forma, dimensiones y posición de elementos en el espacio, mediante el análisis e intersección de dos o más fotografías (Quirós Rosado, 2015).

### ***2.4.1 Fotogrametría aérea***

Técnica que permite realizar mediciones precisas a partir de fotografías ortogonales capturadas desde una aeronave en distintas posiciones sobre un mismo sector. Con la finalidad de determinar propiedades y características espaciales presentes en las imágenes (Carretero Segarra, 2015).

## **2.5 Productos fotogramétricos**

La fotogrametría aérea permite obtener una amplia variedad de productos geoespaciales precisos, detallados y de calidad, a partir de imágenes capturadas desde aeronaves no tripuladas (UAS), entre otros sistemas. Estos productos son fundamentales para el análisis de terreno, la evaluación de riesgos, planificación de proyectos, etc. A continuación, se describen los principales productos (Alvarado Soto, 2016).

### ***2.5.1 Nube tridimensional del terreno***

Conjunto de puntos en el espacio tridimensional que contiene coordenadas (x, y, z), que representan con alta precisión la geometría del terreno y de los objetos presentes sobre su superficie. Estos puntos están definidos dentro de un sistema de referencia espacial y puede incluir información adicional como su respectivo color e intensidad. Además, constituye la base para generar diversos productos geoespaciales como modelos de elevación digital (DEM) y perfiles fotográficos (Bustos Muñoz, 2024).

### ***2.5.2 Modelos digitales de elevación***

Representación digital tridimensional del terreno, obtenida del procesamiento de una nube de puntos densa. Cada celda del modelo contiene un valor número que indica la altura en ese punto específico, lo que permite visualizar la topografía del terreno además de parámetros de pendiente e inclinación (Bustos Muñoz, 2024).

### **2.5.3 Curvas de nivel**

Línea que conecta puntos de igual altitud sobre la superficie del terreno. Las curvas de nivel permiten representar y comprender la forma y elevación del terreno, facilitando la identificación de relieves, planos, valles y otras características (Alvarado Soto, 2016).

## **2.6 API 1160**

API 1160 es una práctica recomendada para el desarrollo de planes eficaces de gestión de la integridad en la industria del petróleo y gas, cuyo propósito es garantizar prácticas seguras, integrales y sostenibles, minimizando el riesgo de posibles fallas, amenazas o derrames en los sistemas de transporte como ductos (API, 2019).

API (2019) establece los criterios para evaluar y controlar factores que pueden afectar la integridad de los ductos. Asimismo, especifica una serie de pasos a seguir en la etapa de “Planificación” que son los siguientes:

- a) Identificar y analizar las amenazas y evaluar los posibles impactos que pueden comprometer la integridad del sistema;
- b) Desarrollar un plan para implementar actividades de mitigación y prevención para reducir los riesgos asociados;
- c) Verificación del desempeño del sistema para garantizar el cumplimiento de las medidas preventivas (p. 20)

## **2.7 Tipos de amenazas**

Los ductos de transporte enfrentan una variedad de amenazas que pueden afectar su integridad estructural, particularmente aquellas amenazas que derivan de defectos del equipo, construcción y fabricación. De acuerdo con la Sección 5.2.3 de la norma API 1160, estos factores no actúan de manera aislada, si no que al interactuar con fenómenos meteorológicos extremos

puede provocar una diversidad de amenazas. A continuación, se describen algunas de ellas (API, 2019).

### ***2.7.1 Erosión hidráulica***

Movimiento de suelo de manera superficial, causado principalmente por la acción del agua y viento, provocando la pérdida de profundidad del horizonte superior y modificando las propiedades del terreno, alterando su capacidad para soportar vegetación y otras estructuras (Brunel & Seguel, 2011).

### ***2.7.2 Erosión***

La erosión es el proceso del desprendimiento y transporte de partículas del suelo, generado principalmente por el cambio en las propiedades del terreno y la acción de agentes naturales como agua y viento, cuya intensidad depende de factores climáticos (Arias-Muñoz et al., 2023).

### ***2.7.3 Cargas localizadas***

Fuerzas laterales generadas por momentos de flexión y cargas localizadas producto de fenómenos climáticos y fuerzas externas, pueden provocar el desplazamiento de las tuberías de los acoplamientos mecánicos, fracturas en la tubería y en los accesorios roscados, e incluso fallas en la soldadura circunferenciales, comprometiendo así la integridad estructural (API, 2019).

## **2.8 Método RUSLE**

En esta versión actualizada se incorporaron mejoras significativas, como el uso de algoritmos computarizados que facilitan el proceso de cálculo, la inclusión del término de susceptibilidad a la erosión el cual puede variar dependiendo de las estaciones climáticas del año y métodos alternativos para estimar el valor de la variable K cuando no es posible aplicar el método del nomograma. Además, se introdujo un nuevo procedimiento para calcular el factor de largo y magnitud de la pendiente (LS), permitiendo la evaluación de distintas variables de esta, y se

consideraron los porcentajes de erosión en surcos e inter-surcos. También se actualizaron los valores para el factor de prácticas de conservación (P), adicionalmente se integraron nuevos métodos para calcular el factor de obras de manejo que integran factores como la cubierta vegetal, la rugosidad del suelo, el uso previo del suelo y la cubierta de cultivos como se observa en la Ecuación 1 (Cordero-Rebolledo, 2022).

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Donde:

**A**= Pérdida de suelos por unidad de área [Ton/ha/año].

**R**= Índice de erosividad de la lluvia [MJ mm /ha h].

**K**= Factor de erodabilidad del suelo, en comparación con las medidas en una parcela patrón de 22,13 m de largo, 9% de pendiente en barbecho y labranza continua [Ton/MJ mm].

**LS**= Factor topográfico pendiente-escorrentía.

**C**= Factor de cultivos y manejos de carácter adimensional.

**P**= Factor de conservación y protección del suelo.

### **2.8.1 Factor R: Erosividad de la lluvia**

Corresponde a la capacidad de la lluvia para generar procesos erosivos, determinada por factores como la intensidad, duración, velocidad y frecuencia de las precipitaciones, así como por la energía de impacto y el tamaño de las gotas al caer sobre la superficie del suelo (Cordero-Rebolledo, 2022)

### **2.8.2 Factor K: Erodabilidad del suelo**

Representa la susceptibilidad del suelo a la erosión causada por la lluvia y la energía generada por la escorrentía. Este factor está determinado por las propiedades físicas del suelo, como su textura, estructura, porosidad y composición granulométrica, contenido de materia

orgánica, entre otras características que influyen en su resistencia a los procesos erosivos (Casanova-Ruiz et al., 2024).

### ***2.8.3 Factor LS: Longitud y pendiente***

También conocido como factor topográfico, es empleado para representar el impacto del relieve que contribuye a la pérdida total del suelo. Resultado de la combinación entre la longitud y pendiente del terreno, variables que determinan el grado de exposición del suelo a procesos erosivos (Cordero-Rebolledo, 2022).

### ***2.8.4 Factor C: Cobertura vegetal***

Corresponde a la influencia de la vegetación en la protección del suelo, ya que actúa como una barrera que disipa la energía cinética de las gotas de lluvia. Gracias a la cobertura vegetal, se reduce el efecto del impacto directo en la superficie, lo que disminuye significativamente las tasas de erosión del suelo (Cordero-Rebolledo, 2022).

### ***2.8.5 Factor P: Prácticas de conservación***

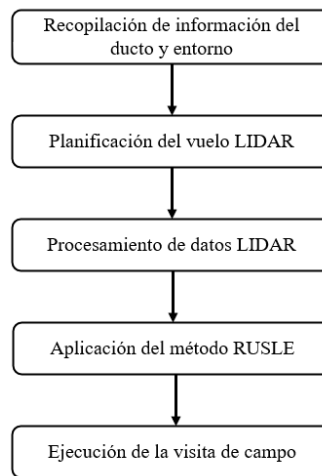
Según Cordero-Rebolledo (2022), las buenas prácticas de conservación del suelo contribuyen a minimizar los efectos del escurrimiento del agua. El método RUSLE incluye tres situaciones específicas: “empleo de labranza adecuadas”, “empleo de terrazas” y “empleo de fajas de cultivos en contorno” (p. 40).

### 3. Metodología

Con el objetivo de identificar las amenazas de clima y fuerzas externas que pueden llegar a comprometer la integridad del ducto Manatie, así como evaluar la eficiencia de los sensores LIDAR y del método RUSLE en la detección de los puntos críticos, se desarrolló una metodología que consta de cinco etapas como se muestra en la Figura 1.

**Figura 1**

*Metodología*



#### 3.1 Recopilación de información del ducto y del entorno

Se llevó a cabo la recopilación de información con el fin de obtener una comprensión más precisa del estado del ducto Manatie y de las condiciones a las que ha estado sometido. Para ello, se reunió información detallada del ducto sobre sus criterios de diseño, tales como material de fabricación y sus propiedades mecánicas, así como parámetros de operación, incluyendo presiones y temperaturas. De manera complementaria, se consideró información del entorno en el que se encuentra ubicado el ducto, como datos topográficos, geográficos, climáticos e hidrológicos. Con la finalidad de identificar de amenazas potenciales relacionadas con clima y fuerzas externas que puedan comprometer la integridad del ducto.

### **3.2 Planificación del vuelo LIDAR**

Para la definición del trazado se empleó la plataforma geomática Google Earth Pro para crear los archivos KMZ. En este proceso se verificaron las zonas restringidas para operaciones con aeronaves no tripuladas, de acuerdo con el Visor Geográfico de la Aerocivil y la información suministrada, también se aseguró que el área de influencia del ducto Manatie estuviera libre de estructuras, líneas de alta tensión y otros obstáculos. Asimismo, se revisaron los manuales de usuario del sensor LIDAR y de la cámara fotogramétrica con el de familiarizarse con las características y funcionalidades, lo que permitió ajustar sus parámetros operativos. Con base en todo lo anterior, se definieron las trayectorias de los vuelos que posteriormente fueron programadas mediante misiones en el software DJI Pilot.

### **3.3 Procesamiento de datos LIDAR**

Tras la ejecución de los vuelos fotogramétricos, se recopiló y organizó la información obtenida. Los datos crudos fueron importados al software de procesamiento LiGeoreference, donde se realizó la clasificación de la nube puntos. Posteriormente, esta información fue procesada en el software ArcGIS para generar productos geospaciales, entre ellos las curvas de nivel y los modelos digitales de elevación (DEM). Estos productos permitieron analizar y visualizar con mayor precisión el área donde está ubicado el ducto Manatie, para la identificación de puntos críticos que podrían representar amenazas para su integridad.

### **3.4 Aplicación del método RUSLE**

Para determinar el índice de erosión se aplicó el método RUSLE, considerando las variables de mayor incidencia en los procesos erosivos: la erosividad de la lluvia (R), la erodabilidad del suelo (K) y el topográfico (LS). A partir de este análisis se identificaron los puntos

críticos con mayor vulnerabilidad a la erosión, representados en un archivo KMZ para su georreferenciación a lo largo del trazado del ducto.

### **3.5 Ejecución de la visita de campo**

Finalmente, se llevó a cabo una visita de campo con el propósito de verificar las amenazas asociadas a factores de clima y fuerzas externas, identificados previamente mediante el análisis de los productos geospaciales, así como los puntos críticos de erosión mediante el método RUSLE. Para ello, se tomaron observaciones directas del terreno, evaluando las características del suelo, cobertura vegetal y evidencias visuales de erosión, además de georreferenciar de cada uno de los hallazgos. Lo cual permitió identificar posibles discrepancias no contempladas en los análisis iniciales.

## **4. Resultados y discusión**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto, iniciando con la caracterización del ducto Manatie y de su entorno, la ejecución de los vuelos fotogramétricos y la generación de productos geospaciales a partir de los datos recolectados mediante el sensor LIDAR y la cámara fotogramétrica, así como la aplicación del método RUSLE. Estos resultados, fueron complementados con la verificación de la visita de campo, lo que permitió evaluar la eficiencia del sensor LIDAR en la identificación de amenazas derivadas de factores climáticos y de fuerzas externas, así como del método RUSLE para determinar puntos críticos de erosión.

### **4.1. Información ducto de transporte Manatie**

El ducto Manatie, presenta un diámetro de 6 [in] en la mayoría de su longitud. Su principal función es transportar gas que cumple con las especificaciones ambientales establecidas hacia su

destino final. A continuación, en la Tabla 1 se presentan los datos operacionales y de diseño correspondientes a este ducto de transporte.

**Tabla 1**

*Características de diseño y operación ducto Manatie*

Características de diseño y operación	
Diámetro nominal [in]	6
Material	API 5L Gr. B
Espesor nominal [in]	0.280
Espesor de retiro [in]	0.157
Longitud total de la línea [m]	3200
Presión de operación [PSI]	400
Temperatura de operación [°F]	82.4
Presión de diseño [PSI]	720
S – Esfuerzo permisible [PSI]	17500
Fluido transportado	Gas

## 4.2 Ubicación geográfica

El ducto Manatie está ubicado en el municipio de Barrancabermeja, departamento de Santander, sobre la orilla oriental del río Magdalena, a una altura de 75 metros sobre el nivel del mar. Esta zona se caracteriza por la presencia de numerosas ciénagas y quebradas. No obstante, la región no presenta ningún tipo de elevación en la ciudad, pero en su área rural en la sección oriental está atravesada por la serranía de los Yoriquíes, donde su elevación más conocida es la meseta de San Rafael (Alcaldía de Barrancabermeja, 2020).

El clima de la región corresponde a la zona de confluencia intertropical por lo que presenta clima cálido húmedo tropical. Por lo que presenta grandes precipitaciones mayores a los 4000 mm anuales. La temperatura promedio es de 28.5 °C (Alcaldía de Barrancabermeja, 2020).

En la Figura 2 se observa el trazado del ducto Manatie, el cual presenta diversas interfases incluyendo tramos aéreos, enterrados y cruces de vía. A lo largo de su recorrido atraviesa diversas zonas geográficas, entre ellas áreas en proximidad a instalaciones industriales y predios privados.

En algunos tramos presenta contacto directo con suelo y árboles, mientras que en otros se identifican cobertura vegetal variada, que incluyen tanto zonas de alta vegetación como maleza, arbustos y árboles, como zonas de baja vegetación dificultando su visibilidad directa.

## Figura 2

*Trazado ducto Manatie*

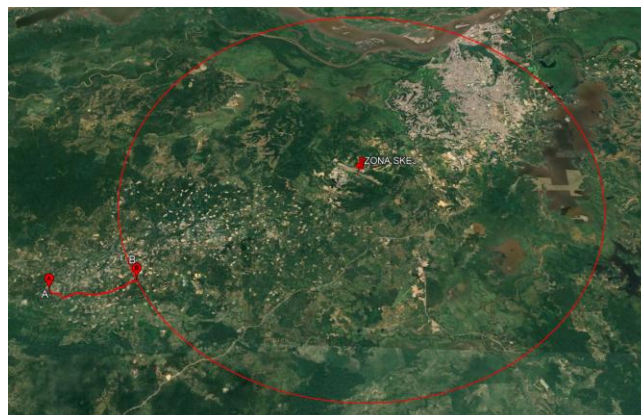


## 4.3 Diseño del vuelo LIDAR

Para la planificación del vuelo se consideraron las zonas restringidas identificadas por medio del Visor Geográfico de la Aerocivil. En este estudio, se identificó una zona prohibida clasificada como zona SKEJ como se observa en la Figura 3, la cual establece una restricción para operaciones con aeronaves no tripuladas (UAS) dentro de un radio de 9 [km].

## Figura 3

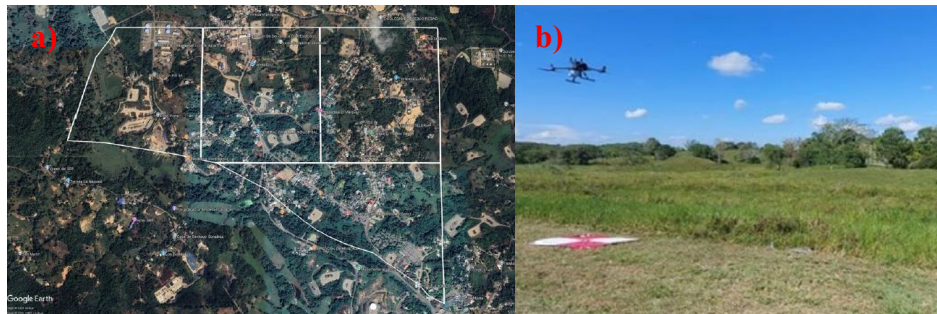
*Zona restringida del área de estudio*



Para cubrir la longitud total del ducto Manatie de 3200 [m], la Figura 4. a) muestra que el levantamiento de información se dividió en cuatro secciones de vuelos fotogramétricos. Este plan permitió abarcar por completo el trazado y minimizar posibles fluctuaciones en la captura de datos LIDAR. Los vuelos se delimitaron de manera que su extremo coincidiera justo antes del inicio del radio de 9 [km] de la zona SKEJ, las misiones se ejecutaron con el Drone DJI Matrice 300 RTK equipado con el sensor LIDAR LiAir V70 y la cámara fotogramétrica Zenmuse P1 como se observa en la Figura 4. b). Para la georreferenciación de los datos se empleó la red activa de Geored-SGC, mientras que la configuración de las misiones y parámetros operativos se realizó en el software DJI Pilot.

#### Figura 4

*Delimitación del área e inicio de los vuelos fotogramétricos*



*Nota.* La figura muestra las etapas iniciales del levantamiento LIDAR: a) Delimitación del área por medio de polígonos, b) Protocolo de despegue del drone.

#### 4.4 Procesamiento de datos LIDAR

Tras la ejecución de los vuelos fotogramétricos para la adquisición de datos del ducto Manatie y su entorno, se llevó a cabo el procesamiento de la información capturada mediante el sensor LIDAR y la cámara fotogramétrica. Los archivos POS fueron importados al software

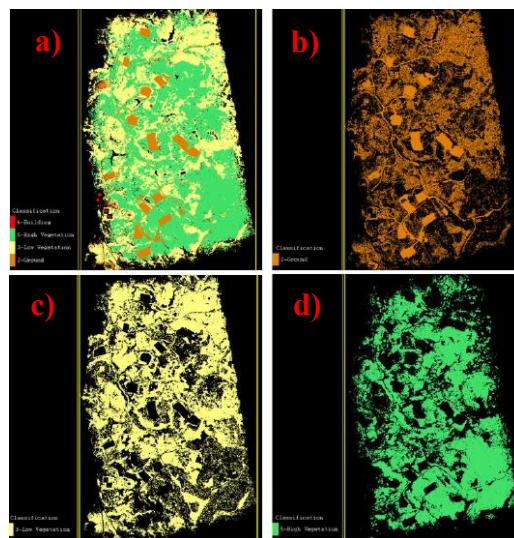
LiGeoreference, donde la información se organizó y estructuró en carpetas con el fin de garantizar una georreferenciación y navegación precisas.

#### 4.4.1 Análisis clasificación nube de puntos

Se generó la nube de puntos con georreferenciación precisa, a la cual se realizaron mejoras visuales y estructurales, como la asignación de color, segmentación de trayectorias y la corrección de desviaciones e inclinaciones, con el fin de garantizar la calidad y evitar fluctuaciones. Finalmente, en la Figura 5 se muestra la clasificación de la nube de puntos que fue exportada al software ArcGIS para la generación de los productos geoespaciales.

### Figura 5

*Clasificación de nube de puntos según la cobertura del área de ubicación del ducto Manatie*



*Nota.* La figura muestra las diferentes coberturas que se pueden generar con la clasificación de la nube puntos: a) Coberturas generales, b) superficie del terreno, c) baja cobertura vegetal, d) alta cobertura vegetal.

La Figura 5 presenta el resultado de la clasificación de la nube de puntos generada a partir del procesamiento de los datos LIDAR. En la Figura 5. a) se identifican los diferentes tipos de

cobertura superficial presentes del área donde está ubicado el ducto Manatie, representados mediante una escala de colores: rojo para las edificaciones, verde la vegetación de alta densidad como árboles y matorrales, amarillo para vegetación de media o baja densidad, como arbustos y maleza y naranja el suelo expuesto libre de vegetación y estructuras. En las Figuras 5. b), c) y d) se observa de manera individual la superficie del terreno y las coberturas vegetales de baja y alta densidad.

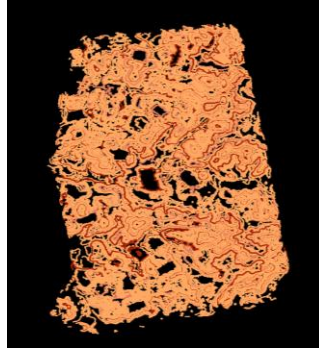
En la Figura 5. b), se observa la superficie del terreno, en la cual es posible identificar curvas, pendientes o depresiones, donde los espacios representan zonas descubiertas, mientras que las zonas con color representan áreas con aglomeraciones. Por su parte, las Figuras 5. c) y d) representan la cobertura vegetal clasificada según su densidad. En las zonas descubiertas o con escasa cobertura vegetal, pueden ser más propensas a desarrollar procesos erosivos, mientras que las zonas con vegetación densa, se dificulta el acceso, aumenta el riesgo de fallas geotécnicas e incluso puede interferir en la correcta captura de datos del sensor LIDAR. Estas regiones se consideran críticas, dado que la inestabilidad del terreno puede comprometer la integridad del ducto Manatie al propiciar la generación de cargas localizadas.

#### ***4.4.2 Análisis de curvas de nivel***

A partir de la clasificación de la nube de puntos, se generaron las curvas de nivel en el software ArcGIS, donde se cargó el archivo KML correspondiente al patrón del vuelo fotogramétrico junto con los datos de elevación del área donde se ubica el ducto Manatie. Mediante herramientas específicas del software, se estableció la elevación y se generó el modelo TIN del área de estudio. Con base en este modelo, se procedió a la creación de las curvas de nivel, ajustando el intervalo, el grosor de las líneas y la paleta de colores para optimizar su visualización como se observa en la Figura 6.

**Figura 6**

*Curvas de nivel del área de ubicación del ducto Manatie*



La Figura 6 muestra la representación topográfica del área donde se ubica el ducto Manatie, lo que permite visualizar la morfología del terreno. Las curvas conectan puntos de igual altitud y se diferencian mediante variaciones de color y grosor, que permite identificar curvas principales y secundarias. El intervalo entre ellas es un indicador del grado de pendiente, donde las curvas muy cercanas entre sí representan pendientes pronunciadas o abruptas, asociadas a zonas de riesgo geotécnico; mientras que las curvas más separadas indican superficies planas o de pendiente suave. Asimismo, las curvas cerradas con forma de ovalada suelen representar elevaciones locales, como colinas, montículos o acumulaciones naturales, que pueden generar inestabilidad en el terreno.

Para identificar la ubicación de estas variaciones topográficas a lo largo del trazado del ducto Manatie, se superpuso el trazado sobre las curvas de nivel en ArcGIS. Este análisis permitió localizar puntos críticos, entre los cuales destacan los N°6, 7, 8 y 9, donde se pudo apreciar depresiones profundas, pendientes pronunciadas y leves inclinaciones asociadas a pendientes suaves.

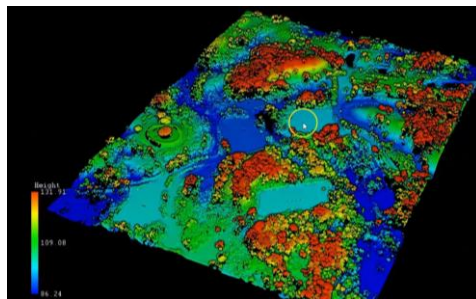
#### ***4.4.3 Análisis de modelo digital de elevación (DEM)***

Con la información procesada en el software ArcGIS se generó el modelo digital de elevación. Para ello, se configuró el sistema de referencia correspondiente y se cargaron las curvas

previamente obtenidas. Posteriormente, mediante herramientas específicas del programa, se creó el modelo TIN, definiendo el sistema de coordenadas y el hemisferio correspondiente, y ajustando la simbología para su conversión a formato ráster. Al concluir el procesamiento, los modelos obtenidos pueden visualizarse en la Figura 7 y exportarse en distintos formatos para su análisis.

### Figura 7

*Modelo digital de elevación (DEM) del área de ubicación del ducto Manatie*



La Figura 7 representa la altitud del terreno natural dentro del área de estudio, exponiendo tanto el relieve como los objetos presentes en la superficie, tales como vegetación, estructuras, entre otros. En la parte inferior se incluye una leyenda, que indica el rango de elevación en metros sobre el nivel de mar donde está ubicado el ducto Manatie, con valores que oscilan entre los 96 y 123 m.

Esta información se visualiza mediante una paleta de colores que facilita la interpretación visual: el rojo corresponde a las zonas más elevadas del terreno, entre 125 y 132 [m], asociadas a crestas o colinas, con posibles condiciones de inestabilidad; los tonos anaranjado y amarillo representan alturas intermedias, entre 109 y 125 [m], correspondientes a laderas o áreas de transición; y los tonos azul y verde indican las zonas bajas, con elevaciones entre 86 y 109 [m], correspondientes a valles, riachuelos o superficies planas susceptibles a la acumulación de agua e inundaciones en temporadas de lluvias. Finalmente, cabe resaltar que las pendientes más

pronunciadas representan un factor de riesgo, ya que pueden propiciar el desarrollo de fenómenos erosivos y deslizamientos del terreno por efecto de la escorrentía, lo que constituye una amenaza potencial para el ducto Manatie.

Para identificar los puntos críticos en el trazado del ducto, este se integró sobre el modelo digital de elevación en ArcGIS. Las zonas más elevadas coincidieron con los puntos N°8 y 9; las alturas intermedias con los puntos N°6 y 7; las áreas bajas asociadas a caños o pequeños riachuelos se relacionaron con el punto N°11; mientras que las superficies planas y con presencia de vegetación, se les asignaron los puntos N°2, 4 y 10. Sin embargo, cabe resaltar que algunos puntos críticos coincidieron con los definidos en las curvas de nivel, debido a que representan las mismas condiciones topográficas.

#### **4.5 Aplicación del método RUSLE**

Para determinar el índice de erosión en el área de estudio se aplicó el modelo de erosión RUSLE. En este se consideraron las variables de erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K) y el topográfico (LS), identificados como los factores de mayor influencia en los procesos de erosión del terreno, asignándose una mayor proporción al factor topográfico (LS), definiéndose en la Ecuación 2.

$$A = R(1.25) * K * LS(1.5) \quad (2)$$

Donde:

**A**= Pérdida de suelos por unidad de área [Ton/ha/año].

**R**= Índice de erosividad de la lluvia [MJ mm /ha h].

**K**= Factor de erodabilidad del suelo [Ton/MJ mm].

**LS**= Factor topográfico pendiente-escorrentía.

#### 4.5.1 Análisis factor de erosividad (R)

El cálculo del factor R requiere establecer una correlación entre valores conocidos de erosividad con valores de las lluvias media anuales. Para este análisis se consideran los datos del mes de mayor precipitación junto con los otros meses independientes de sus valores presentados (Cordero-Rebolledo, 2022).

Por consiguiente, se utilizaron registros oficiales de la base de datos del IDEAM, extrayendo información de las estaciones pluviométricas más cercanas al área de estudio. Para el análisis, se seleccionaron 4 estaciones pluviométricas y se descargó información correspondiente a un periodo de 20 años (2004-2024). Posteriormente, en la Tabla 2 se presenta la información procesada para obtener las precipitaciones promedio mensuales para cada estación.

**Tabla 2**

*Estaciones pluviométricas del IDEAM en el área de estudio*

Código	Nombre	Latitud	Longitud	Norte (m)	Este (m)	Altitud (m)
24050110	ALBANIA	691.194	-73.632.222	1256110.92	1049211.59	216
24050070	LA PUTANA	712.717	-73.520.556	1279926.62	1061524.71	150
23155030	AEROPUERTO YARIGUIES	702.639	-73.808.611	1268752.92	1029710.25	126
23130010	CHUCURI	687.778	-74.031.389	1252309.65	1005097.25	100

Con la información consolidada de las precipitaciones mensuales, se generó una capa en formato ráster con la precipitación media mensual para cada uno de los meses. Posteriormente, se calculó del índice modificado de Fournier utilizando la Ecuación 3 mostrada a continuación, este procedimiento se llevó a cabo con el apoyo de la calculadora ráster del software ArcGIS.

$$IMF = \left( \frac{\sum p^2}{P} \right) \quad (3)$$

Donde:

**IMF**= Índice Modificado de Fournier.

**p**= *Precipitación media mensual.*

**P**= *Precipitación media anual.*

Para el cálculo del factor se empleó información derivada del índice modificado de Fournier, estableciendo una relación entre el factor R y los datos de precipitación disponibles. Con base en ello, se aplicó un modelo empleado en los últimos años para estimar la erosividad de la lluvia en áreas con carencias de registros, a través de la Ecuación 4 (Cordero-Rebolledo, 2022)

$$R = 21.56 * IMF^{0.027} \quad (4)$$

Donde:

**R**= *Índice de erosividad.*

**IMF**= *Índice Modificado de Fournier.*

Al aplicar la fórmula en la calculadora ráster de ArcGIS, se adquiere la distribución espacial del factor R en el área de estudio, con valores mínimos de 1008,14 [mm.ha-1mm. Ha-1.año-1] y máximos de 1058,51 [mm.ha-1mm. Ha-1.año-1]. A partir del mapa de erosividad de la lluvia, se puede concluir que los valores más elevados se concentran principalmente hacia el noreste (ver Apéndice A).

#### **4.5.2 Análisis factor de erodabilidad (K)**

Este factor se define en función de la textura determinada por los contenidos de limo, arcilla y arena, así como por su estructura, permeabilidad y contenido de materia orgánica. En este sentido, se optó por tomar los valores propuestos por el método de Kirby y Morgan (1984, como se citó en Cordero-Rebolledo, 2022) como se muestra en la Tabla 3, los cuales establecen una relación entre la textura y su contenido de materia orgánica.

**Tabla 3***Factor K de Kirby y Morgan*

Textura del suelo	<0.5%	2%	>4%
Arcilla	0.017	0.038	----
Arcilla arenosa	0.018	0.017	0.016
Arcilla limosa	0.033	0.03	0.025
Arena	0.007	0.004	0.003
Arena fina	0.0021	0.018	0.013
Arena fina franca	0.032	0.026	0.021
Arena franca	0.016	0.013	0.011
Arena franca	0.016	0.013	0.011
Arena muy fina	0.055	0.047	0.037
Arena muy fina franca	0.058	0.05	0.04
Franca (grada)	0.05	0.045	0.038
Franco arcillo-limoso	0.049	0.042	0.034
Franco arcilloso	0.037	0.033	0.028
Franco areno-arcilloso	0.036	0.033	0.028
Franco arenoso	0.036	0.032	0.025
Franco arenoso fino	0.046	0.04	0.032
Franco arenoso muy fino	0.064	0.054	0.043
Limo	0.079	0.068	0.055
Limo franco	0.063	0.055	0.043

*Nota.* Factor K de Kirby y Morgan, en base de la textura de suelo y cantidad de carbono orgánico.

Tomado de Kirby y Morgan (1984, como se citó en Cordero-Rebolledo, 2022).

Los valores anteriores se relacionan con el tipo de suelo presente en el área donde está ubicado el ducto Manatie como se observa en la Tabla 4, (ver Apéndice B).

**Tabla 4***Factor K de Kirby y Morgan, aplicado a la zona de estudio*

UCS	Textura del suelo	2%
LVA <sub>d3</sub>	Franca, Franco Arcillosa, Franco Arenosa, Franco Arcillo Arenosa	0.036
LVF <sub>ap</sub>	Franco Arenosa, Franca, Franco Arcillosa, Franco Arcillo Limosa, Arcillosa	0.036

#### 4.5.3 Análisis factor topográfico (LS)

El factor topográfico se emplea para estimar el impacto del relieve en la pérdida de suelo, considerando el efecto combinado de la pendiente y la longitud del terreno expuesto a la erosión.

Para calcular este factor se debe multiplicar el subfactor (L) por el subfactor de pendiente (S).

El principal insumo para su determinación es el modelo digital de elevación (DEM), ya que permite caracterizar de forma detallada el relieve del terreno, la pendiente, la dirección del flujo entre otras características relevantes.

El factor LS representa la relación entre la pérdida de suelo en un área determinada producto de su pendiente, en comparación con la pérdida de suelo correspondiente a una pendiente del 9% y una longitud de 22.13 [m]. Este factor se deja igual a 1 cuando las condiciones del sitio de estudio son iguales a las de la parcela experimental. Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente estudio se empleó la metodología simplificada propuesta por Moore y Burch (1986, como se citó en Cordero-Rebolledo, 2022) para el cálculo del factor LS, expuesto en la Ecuación 5.

$$LS = \left( \frac{FAc * TC}{22.13} \right)^{0.4} * \left( \frac{\sin(m)}{0.0896} \right)^2 \quad (5)$$

Donde:

**FAc**= *Es el número de celdas del ráster que aportan al flujo presente en una celda dada.*

**TC**= *Es la longitud del tamaño del pixel para cada celda dada.*

**M**= *Pendiente en radianes.*

**22.13 y 0.0896**= *Valores comparativos de la parcela experimental.*

**4.5.3.1 Análisis subfactor pendiente (S).** El subfactor hace referencia al grado de inclinación de la pendiente, expresado en grados y representa el efecto que esta inclinación ejerce sobre el proceso de erosión. Cabe destacar que la pérdida de suelo tiende a aumentar de manera significativa en pendientes pronunciadas o en terrenos escarpados.

A partir del modelo digital de elevación, se calculó la pendiente en formato ráster en grados, que posteriormente se convirtió a radianes para su aplicación en el cálculo de la fórmula del factor LS (ver Apéndice C).

**4.5.3.2 Análisis subfactor longitud de pendiente (L).** Este subfactor se determina a partir de la distancia entre el punto de inicio del flujo de agua o un límite predefinido hasta el área en consideración. Su valor depende principalmente de dos condiciones: el punto en el que la pendiente comienza a disminuir y se produce la deposición, y el punto donde la escorrentía llega a un canal bien protegido, como puede ser un drenaje o una terraza (Cordero-Rebolledo, 2022).

Para el cálculo se utilizó el mapa de dirección de flujo, a partir del cual se generó el mapa de acumulación de flujo. Este último identifica las celdas donde se acumula el agua proveniente de las celdas de mayor altitud. En consecuencia, las celdas que presentan una mayor acumulación de flujo corresponden a aquellas en las que tiende a concentrarse.

Para evitar una sobreestimación de la erosión, se estableció un límite máximo en la longitud de acumulación a 60 celdas. De este modo, las celdas con valores de acumulación inferiores a 60 píxeles conservan sus valores originales, mientras que aquellas que superan las 200 celdas, serán asignadas con el valor máximo establecido, que en este caso es de 60.

Teniendo el cálculo de acumulación de flujo y la pendiente expresada en radianes, se determinó el factor LS empleando la metodología de Moore y Burch (1986, como se citó en Cordero-Rebolledo, 2022). Esta establece que la unidad de fuerza de la corriente es una medida de la capacidad del flujo para transportar los sedimentos generados en la superficie, tal como se presentó en la Ecuación 4.

Posteriormente, esta ecuación se aplicó en la calculadora ráster del software ArcGIS, obteniéndose así el mapa del factor LS o factor topográfico (ver Apéndice D).

#### **4.5.4 Análisis pérdida de suelo (A)**

Una vez realizado el cálculo y generado las capas geográficas de los factores que inciden en la ecuación RUSLE, estas se integraron mediante la multiplicación de píxeles en la calculadora

ráster de ArcGIS, determinándose así, una nueva capa geográfica correspondiente al factor A o índice de pérdida de suelo en el área donde está ubicado el ducto Manatie. Para efectos del presente estudio, se aplicó el modelo de erosión RUSLE considerando las variables de erosividad (R), erodabilidad (K) y el topográfico (LS) identificados como los factores de mayor influencia en procesos erosivos del terreno. En concordancia con lo definido en la Ecuación 1, se asignó una mayor proporción al factor topográfico (LS) y a la erosividad (Factor R).

A partir de la cuantificación geográfica del factor A, se realizaron operaciones de superposición de las capas en ArcGIS. Este análisis permitió identificar las zonas con niveles muy críticos de erosión, especialmente aquellas localizadas en proximidad a infraestructuras petroleras, en este caso el ducto Manatie. Como resultado, se obtuvieron los puntos más susceptibles a erosión crítica o muy alta con sus respectivas coordenadas. La erosión máxima en zonas de proximidad con el ducto es de 2023,79 [Ton/ha/año].

En total se identificaron 57 puntos erosión distribuidos a lo largo del área donde está ubicado el ducto Manatie (ver Apéndice E). No obstante, para los fines de este estudio se priorizó el análisis de los puntos de erosión ubicados en su proximidad. De estos, seis coincidieron con el trazado del ducto, los cuales fueron los puntos N°1, 5, 10, 11, 43 y 53 representados con marcas de posición de color rojo. A cada uno se le extrajeron las coordenadas geográficas con el fin de verificar la información durante la visita de campo. Este procedimiento permitió localizarlos, confirmar la presencia de amenazas y valorar su impacto en la integridad del ducto, así como evaluar la efectividad del método RUSLE en la detección de puntos de erosión.

#### **4.6 Visita de campo**

A partir del procesamiento e interpretación de los productos geospaciales generados, como nube de puntos, curvas de nivel, modelo digital de elevación (DEM) y el cálculo de pérdida

de suelo mediante el método RUSLE, se identificaron condiciones del terreno y coberturas superficiales que evidencian la presencia de amenazas asociadas a factores de clima y fuerzas externas. Entre las principales destacan las diferencias altimétricas relevantes, zonas con coberturas vegetal densas, depresiones, deslizamientos de terreno, cargas localizadas, erosión, entre otras condiciones. Para efectos de este estudio, se consideraron únicamente las amenazas más cercanas al trazado el ducto Manatie.

La visita de campo se realizó en una única jornada, con el fin de optimizar el recorrido y facilitar el acceso, el ducto Manatie se segmentó en cinco tramos, cada uno con una distancia máxima de 750 [m] medidos horizontalmente, a excepción del quinto segmento que presentó una longitud 200 [m].




Como resultado, se identificaron los puntos críticos distribuidos a lo largo de los cinco segmentos del ducto Manatie. Estos se representaron mediante marcas de posición de color violeta para los puntos obtenidos a partir de los productos geoespaciales y de color rojo para los puntos erosión crítica determinados mediante el método RUSLE, como se observa en la Figura 8. En la Tabla 5 se realizó su respectiva georreferenciaron, inspección visual detallada, un registro fotográfico y un reporte de hallazgos sobre las condiciones del entorno. Asimismo, se evaluaron los elementos asociados a amenazas derivadas de clima y fuerzas externas, con el propósito de verificar si las condiciones observadas coincidieron con los análisis previos, o si es necesario realizar ajustes y complementar el procesamiento de los datos LIDAR.





**Figura 8.**





*Puntos críticos identificados en la segmentación del ducto Manatie*

**Tabla 5**

*Identificación de puntos críticos en visita de campo*

N°	Segmento perteneciente	Imagen	Coordenadas geográficas		Amenaza observada
			Latitud (N)	Longitud (O)	
43	Segmento 1		6°55'57.39"	73°45'25.35"	Indicios de erosión en la colina cercana al ducto, por lo que genera falla geotécnica y vegetación densa sobre este.
53	Segmento 1		6°55'59.50"	73°45'25.68"	Erosión lateral afecta el derecho de vía y compromete la estabilidad del ducto.
1	Segmento 1		6°56'9.26"	73°45'20.89"	Erosión lateral, que compromete el ducto, junto con presencia de vegetación variable sobre este.

N°	Segmento perteneciente	Imagen	Coordenadas geográficas		Amenaza observada
			Latitud (N)	Longitud (O)	
2	Segmento 2		6°56'12.78"	73°45'21.65"	Indicios de deslizamientos, vegetación densa y contacto con árbol.
3	Segmento 2		6°56'16.79"	73°45'24.46"	Deslizamiento de la pendiente sobre el ducto, con contacto con suelo.
4	Segmento 2		6°56'23.38"	73°45'27.80"	Cambio de interfase con presencia de alta vegetación.
5	Segmento 3		6°56'43.63"	73°45'26.54"	Erosión del derecho de vía a en parte del trazado, con cobertura vegetal variada.
6	Segmento 3		6°57'5.63"	73°45'33.87"	Falla geotécnica en la ladera que afecta un tramo del ducto, cubierto por terreno y vegetación densa.
7	Segmento 4		6°57'3.83"	73°45'33.00"	Pendiente pronunciada, con evidencia de erosión en un costado del derecho de vía, acompañada de presencia de animales.

N°	Segmento perteneciente	Imagen	Coordenadas geográficas		Amenaza observada
			Latitud (N)	Longitud (O)	
8	Segmento 4		6°57'9.28"	73°45'36.13"	Zona con depresión pronunciada en ladera, con baja cobertura vegetal.
9	Segmento 4		6°57'11.51"	73°45'36.37"	Pendiente pronunciada originada por la depresión del terreno, cubierta con vegetación media.
10	Segmento 5		6°57'19.03"	73°45'42.84"	Procesos erosivos cercanos al trazado, presenta contacto con suelo y vegetación densa.
11	Segmento 5		6°57'22.60"	73°45'44.48"	Cuerpo de agua en medio del trazado provocando procesos erosivos por la escorrentía en el derecho de vía.

La validación de los puntos críticos identificados a partir de los productos geospaciales y el método RUSLE, permitió confirmar que la integración del sensor LIDAR, la cámara fotogramétrica y el procesamiento, resultó efectiva para la detección preliminar de las amenazas de clima y fuerzas externas en el ducto Manatie. Estos productos facilitaron la delimitación de

condiciones topográficas relevantes, como pendientes, depresiones, variedad cobertura vegetal y zonas descubiertas.

No obstante, pese a la precisión altimétrica obtenida, se identificaron limitaciones en zonas con cobertura vegetal densa, ya que esta restringió la visibilidad de posibles amenazas y dificultó la detección de variaciones topográficas.

En los tramos aéreos se evidenciaron fallas geotécnicas que impidieron determinar con exactitud el tipo de tramo, cabe resaltar que el ducto en esos tramos en específico no presenta las características necesarias para ser clasificado como semienterrado o enterrado, debido a que el recubrimiento existente no es adecuado para soportar dichas condiciones. Adicionalmente, se observó que los deslizamientos generan cargas localizadas que superan la capacidad de los soportes, lo que podría generar desacoplamiento, inestabilidad estructural y fallas en soldaduras, generando un riesgo no solo para la integridad del ducto sino también para las zonas aledañas. Estas condiciones fueron observadas en los puntos N°43, 3, 6 y 10.

Los puntos críticos de erosión identificados con el método RUSLE coincidieron en su ubicación geográfica con lo observado durante la visita de campo, en los puntos N°43, 53, 1, 5, 10 y 11. En la mayoría de estos casos, los fenómenos erosivos estuvieron asociados principalmente a cambios en las propiedades del terreno, variaciones en la cobertura vegetal y condiciones climáticas. En el punto N°11, la erosión se relacionó con la acción hídrica debido a un riachuelo, cuyo caudal ha impactado progresivamente el derecho de vía, intensificando los procesos de socavación. Estos puntos representan una amenaza para la integridad del ducto Manatie, ya que en dichos tramos se encuentran en contacto directo con el suelo. De continuar el avance de los procesos erosivos, podrían generarse cargas localizadas sobre el ducto, debido a la ausencia de

soportería o porque la existente no está diseñada para resistir esfuerzos adicionales de esta naturaleza, aumentando el riesgo de desplazamientos o incluso colapsos.

Aunque el presente estudio no tuvo como propósito diseñar un plan de inspección y monitoreo para mitigar las amenazas derivadas de clima y fuerzas externas, los hallazgos de la visita de campo evidenciaron la necesidad de implementar medidas preventivas en los puntos críticos. Estas acciones son esenciales para garantizar la integridad estructural del ducto Manatie por ello, se plantearon recomendaciones que servirán de base para que, en etapas posteriores, puedan desarrollarse e implementarse de manera efectiva:

- Talar los árboles que se encuentren junto o entre la línea, si los árboles en mención son especímenes autóctonos de la zona y/o de gran tamaño se recomienda reubicar o correr la línea del lado de ellos. Una vez se hallan separado o retirado los árboles se debe realizar la evaluación mediante inspección visual del punto en contacto con la tubería para descartar focos de corrosión severa.
- Para los segmentos de tubería en contacto con el suelo debido a deslizamientos de terreno, se recomienda establecer un plan de estudio geotécnico, que permita caracterizar la magnitud de los deslizamientos, identificar zonas inestables y definir las medidas correctivas necesarias para la estabilización del terreno.
- Realizar plan de rocería para mantener la línea libre de maleza, de tal manera que haya buena visibilidad para realizar inspección visual detallada y medición de espesores.

## **5. Conclusiones**

La integración del sensor LIDAR y la cámara fotogramétrica, junto con el procesamiento y análisis de los productos geospaciales y la aplicación del método RUSLE, permitió identificar y georreferenciar puntos críticos que representan amenazas de clima y fuerzas externas para la

integridad del ducto Manatie. Ente las principales se destacan procesos de erosión, fallas geotécnicas, zonas con cobertura vegetal densa, condiciones que incrementan el riesgo.

La adecuada planificación de los vuelos fotogramétricos garantizó la calidad y precisión en el levantamiento de datos del terreno mediante el sensor LIDAR, lo que permitió generar productos geoespaciales sin fluctuaciones e inclinaciones y así obtener una representación topográfica más real y adecuada del terreno.

La metodología USLE-RUSLE es un análisis empírico de la estimación de pérdida de suelo, que permitió evaluar la susceptibilidad potencial del área a erosionarse. Dado que las variables son acordes a las condiciones del terreno, por lo tanto, se consideró tomar como base estudios de este tipo realizados en Colombia o en Santander (ejemplo estudio de Cordero-Rebolledo 2022). Por ello, fue necesario realizar la verificación en campo, con el fin de corroborar los seis puntos de erosión que coincidieron en el trazado del ducto Manatie.

La visita de campo permitió verificar los puntos críticos identificados en los productos geoespaciales, validando la eficiencia y precisión del sensor LIDAR para representar diferencias altimétricas, incluidas leves inclinaciones del terreno, así como los puntos de erosión crítica determinados por el método RUSLE. No obstante, también se localizaron hallazgos que representan un riesgo para la integridad del ducto Manatie y que no fueron contemplados en dicho análisis, lo que evidencia las limitaciones en la identificación de amenazas de clima y fuerzas externas.

Si bien no se contempló dentro de los objetivos realizar un plan de inspección y monitoreo, la visita de campo evidenció que los puntos identificados representan riesgos significativos para el ducto Manatie. Por ello, se consideró necesario recomendar medidas preventivas y de mitigación

que sirvan como información base para futuras inspecciones o análisis, de modo que los responsables las tengan presentes y las implementen de forma efectiva.

Finalmente, este estudio resalta la importancia de integrar tecnologías geoespaciales como el sensor LIDAR, la cámara fotogramétrica y el método RUSLE, para la identificación de amenazas de clima y fuerzas externas que pueden comprometer la integridad de infraestructuras similares al ducto Manatie. La combinación de estas herramientas facilita la detección temprana y la georreferenciación de dichas amenazas, verificables en campo, cuya implementación fortalecería los procesos de inspección e integridad.

### Referencias Bibliográficas

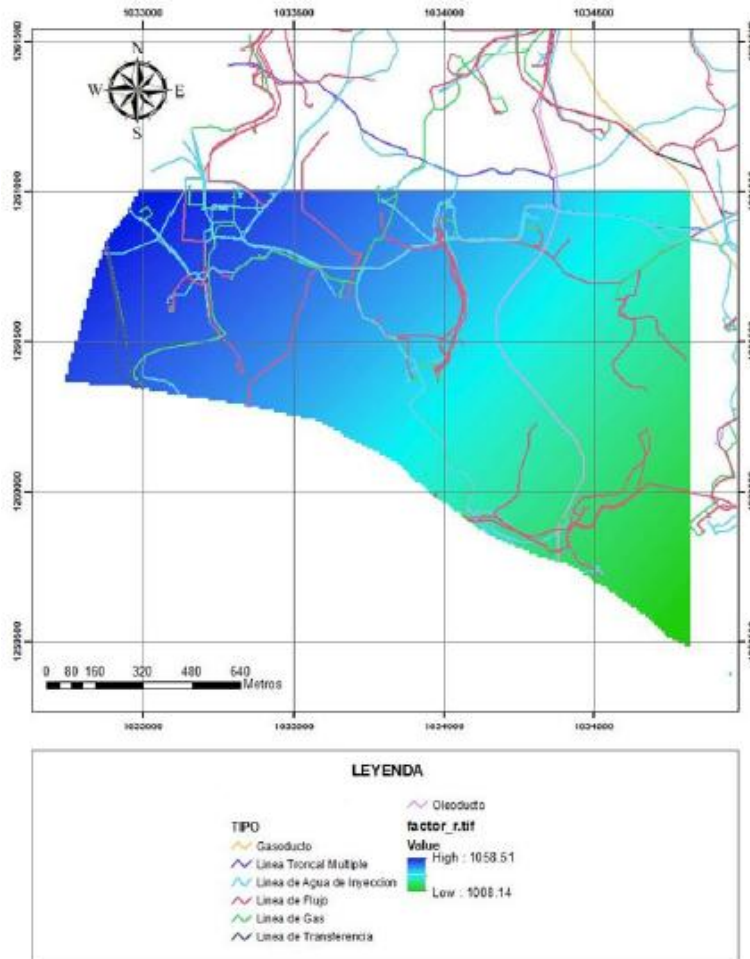
- Alcaldía de Barrancabermeja. (2020). *Geografía*. Alcaldía de Barrancabermeja. <https://www.barrancabermeja.gov.co/publicaciones/13/geografia/>
- Alvarado Soto, S. (2016). *Levantamientos topográficos multitemporales basados en técnicas de fotogrametría aérea* (Tesis de maestría), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Repositorio CICESE. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/289>
- American Petroleum Institute. (2019). *Managing system integrity for hazardous liquid pipelines* (API 1160). <https://www.apiwebstore.org/standards/1160>
- Arias-Muñoz, P., Saz, M.A., & Escolano, S. (2023). Estimación de la erosión del suelo mediante el modelo RUSLE. Caso de estudio: Cuenca media alta del río Mira en los Andes de Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, (79), 207-230. <https://doi.org/10.14198/INGEO.22390>
- Arranz Justel, J. J. (2013). *Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico, registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial*. (Tesis doctoral), E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.15056>
- Brunel, N., & Seguel, O. (2011). Efectos de la erosión en las propiedades del suelo. *Agro Sur*, 39 (1), 1–12. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2011.v39n1-01>
- Bustos Muñoz, E. A. (2024). *Análisis comparativo de productos geoespaciales en fotogrametría con UAV con distintos tipos de vuelo* (Tesis de pregrado), UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN. <https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/626f8f02-198b-4a50-8ed0-615b3d70fa05/content>

- Carretero Segarra, Soledad (2015). *Modelos digitales del terreno mediante fotogrametría aérea realizada con un vehículo aéreo no tripulado*. (Tesis de pregrado), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid. Repositorio UPM. <https://oa.upm.es/37590/>
- Casanova-Ruiz, G., Delgado, D. & Panchana, R. (2024). Estimación de volúmenes de sedimentos por erosión pluvial mediante el modelo RUSLE en cuencas de la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista De Teledetección*, (63), 1–21. <https://doi.org/10.4995/raet.2024.20147>
- Castiblanco Urrego, O., & Cárdenas Romay, D. J. (2023). Importancia del transporte de hidrocarburos y su realidad en Colombia. *Inventum: Revista Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 18(34) 79-89. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.18.34.2023.79-89>
- Cordero-Rebolledo, H. (2022). *Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el Cálculo del Índice de Erosión Usando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) en la Cuenca del Río de Oro del Municipio de Girón, Santander*. (Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Geotecnia Ambiental), Facultad de Ingenierías, Universidad de Santander. Repositorio Universidad de Santander. Recuperado de <https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/6654>
- Giongo, M., Koehler, H. S., Machado, S. do A., Kirchner, F. F., & Marchetti, M. (2010). LiDAR: princípios e aplicações florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 30 (63), 231. <https://doi.org/10.4336/2010.pfb.30.63.231>
- Quirós Rosado, E. (2015). *Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicadas a la ingeniería civil (1.ª ed.)*. Universidad de Extremadura. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=571955>

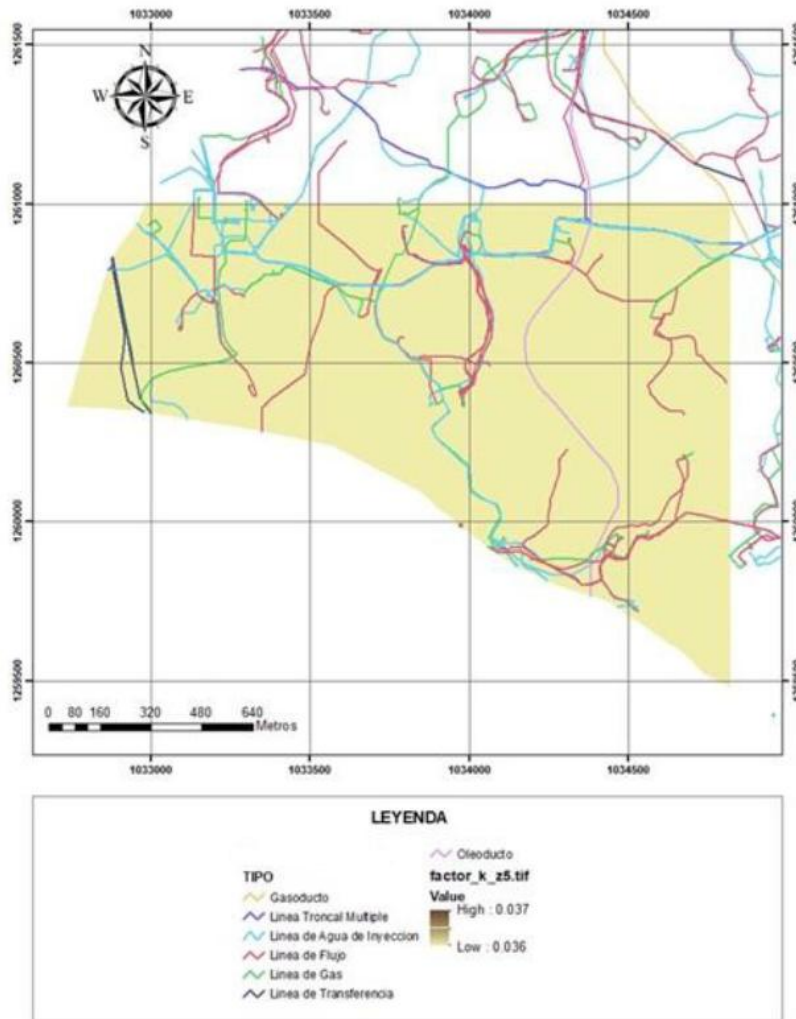
- Rodríguez, D. (2019). *El rol de las empresas de transporte de petróleo en la configuración de la cadena productiva del clúster de hidrocarburos en la región de Barrancabermeja – Santander* (Trabajo de grado), Colegio de Estudios Superiores de Administración – CESA. Repositorio Institucional CESA. <https://repository.cesa.edu.co/items/1b840828-0d43-4379-bdb2-54e5aee8a628>
- Salamanca Céspedes, J. E., & Pérez Castillo, J. N. (2007). LIDAR, una tecnología de última generación, para planeación y desarrollo urbano. *Ingeniería*, 13(1), 67–76. <https://doi.org/10.14483/23448393.2090>
- Sánchez Oyola, S. J. (2017). *Mantenimiento óptimo de ductos según análisis económico para el transporte de materiales combustibles en Colombia* (Tesis de pregrado), Universidad de los Andes. Repositorio Institucional Séneca. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/6e7589ce-9a3f-49a6-aeeb-75a401d33bba>
- Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2024). *Reglamento Aeronáutico de Colombia RAC 100: Operación de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS)*. [https://www.aerocivil.gov.co/autoridad\\_aeronautica/publicaciones/4352/rac-historicos/](https://www.aerocivil.gov.co/autoridad_aeronautica/publicaciones/4352/rac-historicos/)
- DJI. (s. f.). *Zenmuse P1: UAV load gimbal camera* – DJI Enterprise. <https://enterprise.dji.com/zenmuse-p1>

Apéndices

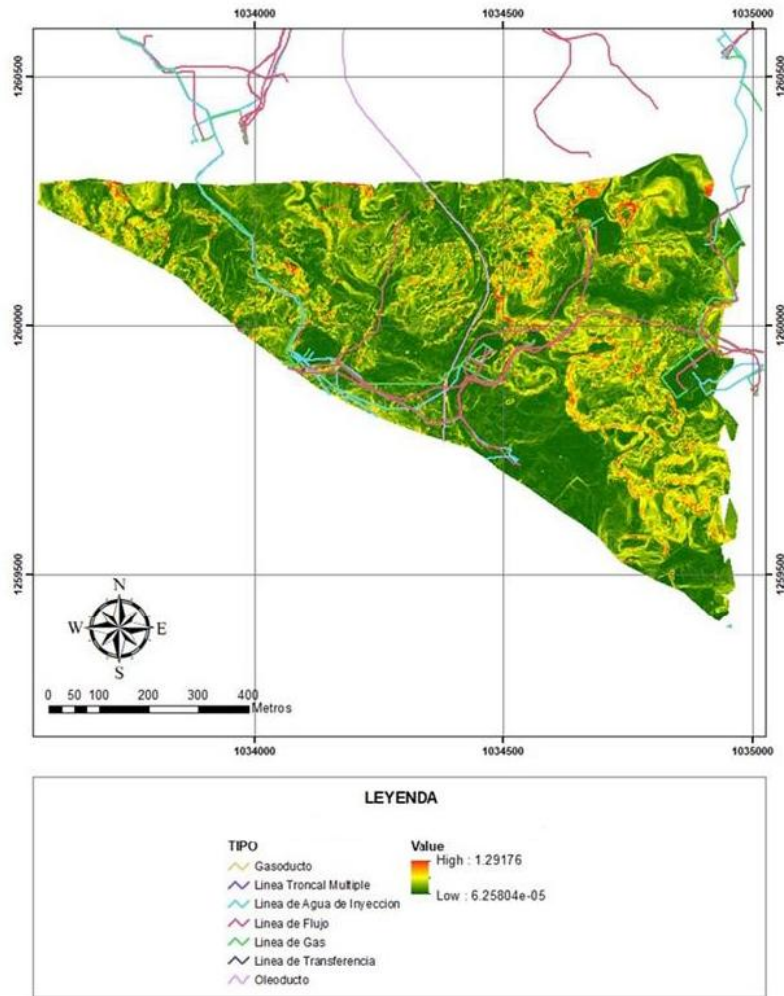
Apéndice A. Mapa del factor erosividad del área de ubicación del ducto Manatie



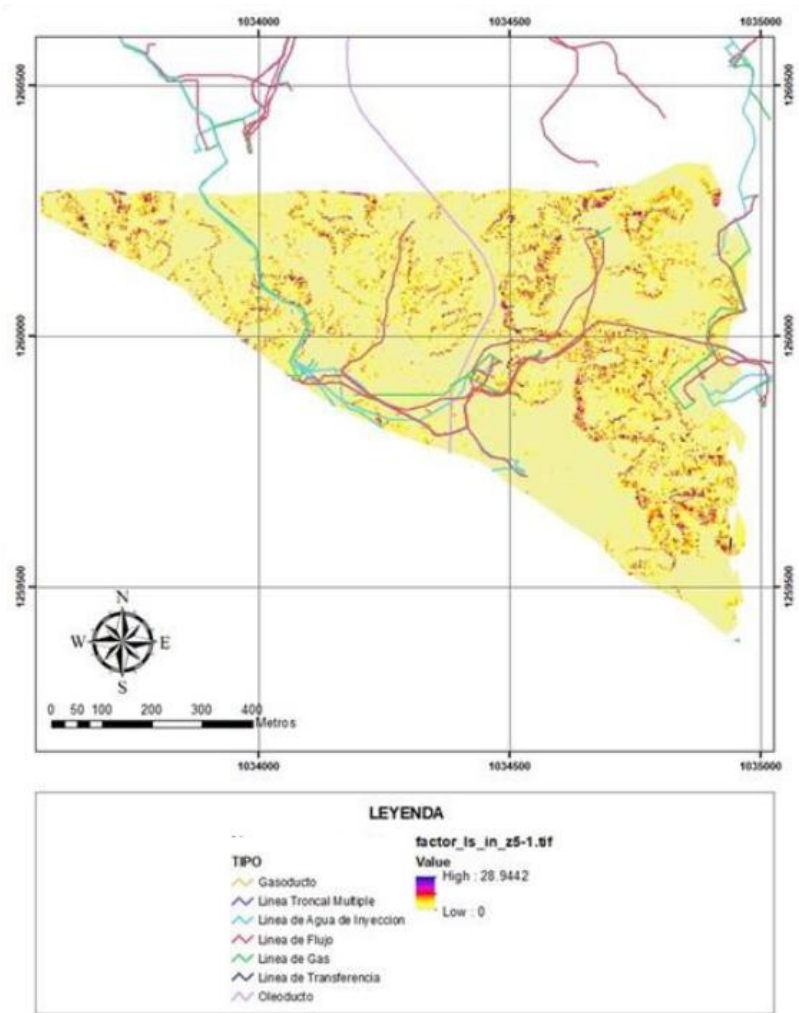
**Apéndice B.** Factor de erodabilidad (k) del área de ubicación del ducto Manatie



Apéndice C. Mapa de pendiente en radianes del área de ubicación del ducto Manatie



**Apéndice D.** Mapa del subfactor topográfico del área de ubicación del ducto Manatie



## Apéndice E. Puntos de erosión crítica del ducto Manatie

Puntos de erosión crítica en el ducto Manatie					
N°	Tipo de infraestructura	Estado	Erosión	Latitud (N)	Longitud (O)
1	Ducto Manatie	Activa	>1000	6°56'9.26"	73°45'20.89"
2	Línea de gas 1	Activa	>1000	6°56'11.83"	73°45'21.03"
3	Línea de gas 1	Activa	>1000	6°56'22.00"	73°45'27.16"
4	Línea de gas 1	Activa	>1000	6°56'23.38"	73°45'27.80"
5	Ducto Manatie	Activa	>1000	6°56'35.87"	73°45'26.55"
6	Línea de gas 2	Activa	>1000	6°56'36.41"	73°45'26.53"
7	Línea de gas 2	Activa	>1000	6°56'53.03"	73°45'28.57"
8	Línea de gas 2	Activa	>1000	6°56'53.97"	73°45'28.70"
9	Línea de gas 2	Activa	>1000	6°57'16.81"	73°45'41.34"
10	Ducto Manatie	Activa	>1000	6°57'17.12"	73°45'41.55"
11	Ducto Manatie	Activa	>1000	6°57'21.21"	73°45'43.86"
12	Línea de flujo 1	Activa	>1000	6°57'11.51"	73°45'36.37"
13	Línea de flujo 1	Activa	>1000	6°57'14.20"	73°46'4.27"
14	Línea de flujo 1	Activo	>1000	6°57'13.07"	73°45'40.64"
15	Línea de flujo 1	Activo	>1000	6°56'54.68"	73°45'45.88"
16	Línea de flujo 1	Activo	>1000	6°57'32.05"	73°45'21.18"
17	Línea de flujo 1	Activo	>1000	6°56'5.99"	73°45'39.56"
18	Línea de flujo 1	Diferida	>1000	6°56'44.23"	73°46'2.71"
19	Línea de agua de inyección 1	Diferida	>1000	6°57'8.15"	73°45'3.23"
20	Línea de gas 2	Activa	>1000	6°58'21.92"	73°44'56.72"
21	Línea de flujo 2	Activa	>1000	6°57'48.95"	73°46'9.97"
22	Línea de flujo 2	Activa	>1000	6°57'34.27"	73°46'32.01"
23	Línea de agua de inyección 2	Activa	>1000	6°58'32.26"	73°45'20.85"
24	Línea de gas 3	Activa	>1000	6°58'0.87"	73°45'44.06"
25	Línea de flujo 3	Activa	>1000	6°57'20.98"	73°45'15.02"
26	Línea de agua de inyección 2	Activa	>1000	6°56'56.85"	73°44'57.87"
27	Línea de agua de inyección 2	Activa	>1000	6°58'2.43"	73°45'19.62"
28	Línea de agua de inyección 2	Activa	>1000	6°55'52.50"	73°45'49.00"
29	Línea de flujo 4	Activa	>1000	6°57'43.75"	73°45'3.34"
30	Línea de agua de inyección 3	Activa	>1000	6°56'45.04"	73°45'6.41"
31	Línea de flujo 5	Activa	>1000	6°57'5.58"	73°45'33.36"
32	Línea de agua de inyección 3	Activa	>1000	6°57'41.56"	73°46'3.53"
33	Línea de agua de inyección 3	Activa	>1000	6°57'47.05"	73°46'0.40"

Puntos de erosión crítica en el ducto Manatie					
Nº	Tipo de infraestructura	Estado	Erosión	Latitud (N)	Longitud (O)
34	Línea de gas 4	Activa	>1000	6°56'21.68"	73°45'14.16"
35	Línea de agua de inyección 4	Diferida	>1000	6°56'18.21"	73°45'8.36"
36	Línea de flujo 6	Diferida	>1000	6°57'4.75"	73°45'49.66"
37	Línea de flujo 6	Activa	>1000	6°56'39.33"	73°45'37.87"
38	Línea de gas 5	Diferida	>1000	6°57'31.73"	73°45'16.02"
39	Línea de agua de inyección 5	Diferida	>1000	6°56'52.63"	73°45'46.88"
40	Línea de flujo 7	Activa	>1000	6°57'8.11"	73°45'54.15"
41	Línea de flujo 7	Activa	>1000	6°56'57.80"	73°45'39.77"
42	Línea de agua de inyección 6	Diferida	>1000	6°57'8.19"	73°45'52.38"
43	Ducto Manatie	Activa	>1000	6°55'57.39"	73°45'25.35"
44	Línea de agua de inyección 6	Activa	>1000	6°57'21.67"	73°45'1.35"
45	Línea de agua de inyección 6	Activa	>1000	6°56'30.46"	73°45'50.85"
46	Línea de agua de inyección 6	Activa	>1000	6°57'57.21"	73°45'20.44"
47	Línea de agua de inyección 6	Activa	>1000	6°56'34.70"	73°45'7.07"
48	Línea de transferencia	Activa	>1000	6°57'25.51"	73°45'9.94"
49	Línea troncal múltiple 1	Activa	>1000	6°56'0.40"	73°46'6.12"
50	Línea troncal múltiple 1	Activa	>1000	6°56'38.02"	73°45'54.89"
51	Línea troncal múltiple 1	Activa	>1000	6°57'11.20"	73°44'53.28"
52	Línea de gas 6	Diferida	>1000	6°56'20.88"	73°46'0.77"
53	Ducto Manatie	Activa	>1000	6°55'59.50"	73°45'25.68"
54	Línea de agua de inyección 7	Activa	>1000	6°56'43.63"	73°45'26.54"
55	Línea de flujo 8	Activa	>1000	6°57'9.03"	73°45'30.01"
56	Línea de flujo 8	Activa	>1000	6°57'43.70"	73°45'31.50"
57	Línea de flujo 8	Activa	>1000	6°57'24.72"	73°46'13.03"