



**MAESTRÍA EN CAMBIOS GLOBALES Y RIESGO DE DESASTRES**

**PROPUESTA PARA EL ANÁLISIS Y ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y RIESGO AMBIENTAL ASOCIADO A SUCESOS FINALES DE BOLA DE FUEGO, CHORRO DE FUEGO E INCENDIO DE PISCINA PARA EL CAMPO PETROLÍFERO EL CERRO**

FERNANDO RIVERA ESCOBAR

MAURICIO SERNA YEPES



**Universidad<sup>®</sup>  
Católica  
de Manizales**

VIGILADA MINEDUCACIÓN

*Obra de Iglesia  
de la Congregación*



**Hermanas de la Caridad  
Dominicas de La Presentación  
de la Santísima Virgen**

**Propuesta para el análisis y zonificación de la vulnerabilidad y del riesgo ambiental  
asociado a sucesos finales de bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina para el campo  
petrolífero El Cerro**

Fernando Rivera Escobar y Mauricio Serna Yepes

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Católica de Manizales

Maestría en Cambios Globales y Riesgo de Desastres

PhD John Makario Londoño Bonilla

Junio de 2022

Copyright © 2019 por Fernando Rivera Escobar y Mauricio Serna Yepes.  
Todos los derechos reservados



Universidad<sup>®</sup>  
Católica  
de Manizales

VIGILADA MINEDUCACIÓN

*Obra de Iglesia  
de la Congregación*



Hermanas de la Caridad  
*Dominicas de La Presentación*  
de la Santísima Virgen

*Universidad Católica de Manizales*  
Carrera 23 # 60-63 Av. Santander / Manizales - Colombia  
PBX (6)8 93 30 50 - [www.ucm.edu.co](http://www.ucm.edu.co)

## **Dedicatoria**

### **Dedicatoria Fernando Rivera Escobar:**

*Detrás de cada logro, existe un cúmulo de ilusiones, sacrificios, esperanzas y apoyo de los seres queridos, allí yace mi mayor amor y respeto, mi familia.*

### **Dedicatoria Mauricio Serna Yepes:**

*A Dios por haberme guiado en este proceso de aprendizaje, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y brindarme una vida llena de oportunidades y felicidad.*

*A mi madre Ángela Andrea y a mi abuela Amparo por el amor infinito que me brindan, el cual, me impulsa diariamente a lograr las metas y salir adelante.*

## **Agradecimientos**

A la Universidad Católica de Manizales (UCM), por brindarnos las herramientas para lograr culminar este proceso de formación académica.

Al profesor John Makario Londoño, por su compromiso y orientación para sacar adelante este proyecto académico.

A la profesora María Nancy Marín, por incentivar la iniciativa de crear el programa de Maestría en Cambios Globales y Riesgo de Desastres, el cual, será referente a nivel nacional e internacional.

A los compañeros de la primera cohorte de la maestría por los aportes de sabiduría, los cuales fueron fructíferos en este proceso de formación.

## Resumen

En la actualidad no existe una metodología clara para la evaluación del riesgo ambiental en los proyectos de licenciamiento ambiental relacionados con la industria petrolera en Colombia. Los análisis de riesgo están centrados en la estimación de áreas de consecuencia y presentan ausencia frente a la incorporación de la vulnerabilidad en evaluación, lo cual no refleja el riesgo ambiental, en un contexto real del entorno y por ende no da cumplimiento de la normativa actual vigente.

En la presente investigación se planteó zonificar y analizar el riesgo ambiental, a partir de las consecuencias de los escenarios finales asociados a bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina para el campo petrolífero El Cerro y la valoración e incorporación de la vulnerabilidad desde un ámbito biótico y abiótico. Considerando las variables conflicto uso del suelo, pendientes, geomorfología, paisaje, coberturas y especies amenazadas.

En la valoración de vulnerabilidad ambiental los factores del componente abiótico que marcaron un diferenciador correspondieron al conflicto uso del suelo, al paisaje y a las coberturas naturales. Por otra parte, las variables del componente biótico los sectores asociados a cuerpos de agua naturales y bosques de galería y/o ripario son los sectores que presentan mayor sensibilidad intrínseca en función de vulnerabilidad. Esto se debe a los recursos naturales, especialmente los relacionados con flora y fauna que engloban de manera esencial.

Los resultados de la evaluación de riesgo ambiental por bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina exhiben que se presenta una mayor área de probable afectación relacionada con el escenario incendio de piscina para el sector relacionado con el campo El Cerro.

**Palabras clave:** riesgo ambiental, componente biótico, componente abiótico, incendio de piscina, chorro de fuego, bola de fuego.

### **Abstract**

Currently there is no clear methodology for evaluating environmental risk in environmental licensing projects related to the oil industry. The risk analyzes are focused on the estimation of areas of consequence and absence against the incorporation of the vulnerability in evaluation, which does not reflect the environmental risk, in a real context of the environment and therefore does not comply with the current regulations in force.

In the present investigation, it was proposed to zone and analyze the environmental risk, based on the consequences of the final scenarios associated with fireball, fire jet and pool fire for the El Cerro field and the valuation and incorporation of vulnerability from a biotic and abiotic realm. considering the following conflict variables land use, slopes, geomorphology, landscape, coverage and threatened species.

In the evaluation of environmental vulnerability, the factors of the abiotic component that marked a differentiator corresponded to the land use conflict, the landscape and the natural covers. In contrast to the variables of the biotic component, the sectors associated with natural water bodies and gallery and/or riparian forests are the sectors that present the greatest intrinsic sensitivity in terms of vulnerability. This is due to the natural resources, especially those related to flora and fauna that they essentially encompass.

The results of the environmental risk assessment for fireball, jet fire and pool fire show that there is a greater area of probable affectation related to the pool fire scenario for the sector related to the El Cerro field.

**Keywords:** environmental risk, biotic component, abiotic component, pool fire, jet fire, fireball.

**Tabla de Contenidos**

Introducción .....	1
Antecedentes .....	2
Objetivos .....	17
Objetivo general .....	17
Objetivos específicos .....	17
Marco Teórico.....	18
Amenaza y consecuencia.....	18
Vulnerabilidad .....	21
Riesgo .....	23
Metodología .....	28
Vulnerabilidad .....	33
Conflicto uso del suelo.....	35
Pendiente .....	35
Proceso morfodinámico.....	36
Unidad geomorfológica.....	36
Unidad paisaje (fragilidad visual) .....	37
Zonas de recarga .....	38
Drenajes.....	38
Coberturas naturales .....	39
Especies amenazadas.....	42
Áreas ambientalmente sensibles.....	42



Riesgo ambiental .....	46
Sistemas de información geográfica.....	50
Resultados .....	52
Caracterización área de estudio .....	52
Estimación de áreas de consecuencias.....	53
Áreas de afectación bola de fuego.....	54
Áreas de afectación Chorro de fuego .....	56
Áreas de afectación incendio de piscina.....	59
Análisis de vulnerabilidad .....	62
Conflicto uso del suelo.....	62
Pendientes .....	65
Geomorfología .....	67
Paisaje .....	69
Coberturas .....	71
Especies amenazadas.....	73
<i>Determinación del riesgo ambiental</i> .....	76
Riesgo Bola de Fuego .....	76
Riesgo Chorro de Fuego.....	78
Riesgo Incendio de Piscina .....	80
Discusión .....	84
Conclusiones.....	87

Recomendaciones .....	89
Referencias bibliográficas.....	90
Anexos .....	94

### Lista de tablas

Tabla 1 Caracterización de los antecedentes.....	12
Tabla 2 Niveles de afectación por radiación térmica .....	20
Tabla 3 Infraestructura del proyecto .....	31
Tabla 4 Variables utilizadas del componente abiótico para el análisis de vulnerabilidad .....	34
Tabla 5 Parámetros de uso actual del suelo implementados en la categorización de vulnerabilidad. ....	35
Tabla 6 Parámetros del tipo de pendiente implementados en la categorización de vulnerabilidad. ....	36
Tabla 7 Parámetros de procesos morfodinámicos implementados en la categorización de vulnerabilidad. .....	36
Tabla 8 Parámetros de geomorfología implementados en la categorización de vulnerabilidad .....	37
Tabla 9 Parámetros de categoría implementados en la categorización de vulnerabilidad. ....	38
Tabla 10 Parámetros de las zonas de recarga implementados en la categorización de vulnerabilidad.....	38
Tabla 11 Parámetros de drenaje implementados en la categorización de vulnerabilidad parcial. ....	39
Tabla 12 Parámetros de coberturas en la categorización de vulnerabilidad parcial.....	39
Tabla 13 Parámetros de especies amenazadas en la categorización de vulnerabilidad parcial.....	42
Tabla 14 Parámetros de áreas ambientalmente sensibles en la categorización de vulnerabilidad. ....	43
Tabla 15 Probabilidad de afectación promedio.....	50
Tabla 16 Distancias de Afectación por Bola de Fuego .....	54
Tabla 17 Distancias de Afectación por Chorro de Fuego .....	56
Tabla 18 Distancias de Afectación por Incendio de Piscina .....	59
Tabla 19 Variables utilizadas del componente abiótico para el análisis de vulnerabilidad .....	62
Tabla 20 Variables utilizadas del componente biótico para el análisis de vulnerabilidad .....	62
Tabla 21 Clasificación de vulnerabilidad parcial por conflicto de uso del suelo para el área de estudio ...	63
Tabla 22 Clasificación de vulnerabilidad parcial por pendientes para el área de estudio.....	65
Tabla 23 Clasificación de vulnerabilidad parcial por geomorfología para el área de estudio .....	67
Tabla 24 Clasificación de vulnerabilidad parcial por paisaje para el área de estudio.....	69

Tabla 25 Clasificación de vulnerabilidad parcial por coberturas para el área de estudio .....	71
Tabla 26 Vulnerabilidad especies amenazadas .....	74
Tabla 27 Riesgo ambiental bola de fuego .....	76
Tabla 28 Riesgo ambiental chorro de fuego .....	78
Tabla 29 Riesgo ambiental incendio de piscina.....	80

### Lista de figuras

Figura 1 Distancias de interés seleccionadas para incendio de chorro, piscina y bola de fuego .....	21
Figura 2 Diagrama metodológico .....	29
Figura 3 Área de estudio del proyecto .....	30
Figura 4 Infraestructura del campo El Cerro.....	32
Figura 5 Área de afectación Bola de fuego.....	55
Figura 6 Área de afectación por chorro de fuego.....	58
Figura 7 Área de afectación por incendio de piscina.....	61
Figura 8 Vulnerabilidad parcial por conflicto de uso del suelo .....	64
Figura 9 Vulnerabilidad parcial por pendientes.....	66
Figura 10 Vulnerabilidad parcial por geomorfología.....	68
Figura 11 Vulnerabilidad parcial por paisaje .....	70
Figura 12 Vulnerabilidad parcial por coberturas .....	72
Figura 13 Especies amenazadas categoría vulnerable .....	73
Figura 14 Vulnerabilidad por especies amenazadas .....	74
Figura 15 Vulnerabilidad Ambiental Total.....	75
Figura 16 Atributos asociados al cálculo de riesgo ambiental bola de fuego .....	76
Figura 17 Riesgo Ambiental Bola de Fuego.....	77
Figura 18 Atributos asociados al cálculo de riesgo ambiental chorro de fuego.....	78
Figura 19 Riesgo Ambiental Chorro de Fuego .....	79
Figura 20 Atributos asociados al cálculo de riesgo ambiental incendio de piscina .....	80
Figura 21 Riesgo Ambiental Incendio de Piscina.....	81

## **Introducción**

En la actualidad en la formulación de los planes de gestión del riesgo de empresas públicas y privadas en proyectos objeto de licenciamiento ambiental no se identifica una propuesta metodológica estándar para la zonificación del riesgo ambiental, que involucre escenarios como incendios y explosiones con sus posibles áreas de afectación y su interacción con elementos expuestos sensibles ambientales. Esta investigación pretende presentar una aproximación en la determinación y zonificación del riesgo ambiental bajo una metodología sistémica, repetible, exhaustiva y auditable para los proyectos objeto de licenciamiento ambiental en el sector de hidrocarburos y con aportes en el Ordenamiento Territorial de los municipios de Colombia.

Se espera que a partir de la implementación y adaptación de la propuesta metodológica, producto del presente trabajo, para la zonificación del riesgo ambiental por escenarios endógenos en la industria de hidrocarburos, se establezca una estructura confiable con aplicación en la formulación de los Planes de Gestión del Riesgo de Empresas Públicas y Privadas con aportes sustanciales en los proyectos objeto de licenciamiento ambiental y en el Ordenamiento Territorial de los municipios de Colombia.

## **Antecedentes**

El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 el cual se adoptó en la tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2015), es el resultado de una serie de consultas entre las partes interesadas que se iniciaron en marzo de 2012 y de las negociaciones intergubernamentales que tuvieron lugar entre julio de 2014 y marzo de 2015. El mismo se basa en elementos que garantizan la continuidad del trabajo hecho por los Estados y otras partes interesadas en relación con el Marco de Acción de Hyogo, y presenta una serie de innovaciones que se solicitaron durante las consultas y las negociaciones. A partir de esto, los cambios más importantes son el marcado énfasis puesto en la gestión del riesgo de desastres, la definición de siete objetivos mundiales, la reducción del riesgo de desastres como resultado esperado, un objetivo centrado en evitar que se produzcan nuevos riesgos, la reducción del riesgo existente y reforzar la resiliencia, así como un conjunto de principios rectores, incluida la responsabilidad primordial de los Estados de prevenir y reducir el riesgo de desastres, y la participación de toda la sociedad y todas las instituciones del Estado.

En Colombia se publicó la Ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones para el territorio colombiano el (Congreso de la República de Colombia, 2012), no obstante, se centra en los riesgos tradicionales y no contempla estrategias para la prevención y respuesta por fenómenos detonados por los cambios globales (e.g. Pandemias, eventos tecnológicos).

Posteriormente, a finales del año 2017 en Colombia se publica el Decreto el cual reglamenta el artículo 42 de la Ley 1523 de 2012 estableciendo el marco regulatorio dirigido a los responsables de realizar el Plan de Gestión del Riesgo de Desastres de las Entidades Públicas y Privadas (PGRDEPP) como mecanismo para la planeación de la gestión del riesgo de desastres (Departamento administrativo de la presidencia de la república de Colombia, 2017). Este instrumento, aunque establece los lineamientos generales para abordar el riesgo de desastres, no define una ruta clara para el análisis de riesgo ambiental en términos de la implementación de metodologías específicas.

Según la normativa actual vigente colombiana, Congreso de la República de Colombia (2012), la vulnerabilidad se define de la siguiente manera: “*Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos*”. (Ley No. 1523, 2012), para obedecer los requerimientos del marco normativo, en esta investigación se implementará y aplicará este concepto de vulnerabilidad.

Por parte del Ministerio de Medio Ambiente y desarrollo Sostenible (MADS) y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) mediante la Resolución 1402 de 2018, ANLA (2018), presenta la metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales donde se establecen los lineamientos generales que se deben considerar al momento de elaborar un estudio ambiental para proyectos, obras y actividades objeto de licenciamiento ambiental. Es de esta manera que se presenta en la metodología, la definición de riesgo ambiental definiéndolo como “*riesgo al cual están expuestos los elementos del ambiente y la prestación de servicios ecosistémicos*” y solicita su inclusión en el análisis y valoración del riesgo (numeral 9.1.3 Plan de gestión del riesgo).

Adicional de la normativa nacional, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC (2011), publicó la NORMA ISO 31000. Gestión de Riesgos. Cuyo propósito es aplicar y adaptar al público, cualquier empresa pública o privada, comunidad, asociación, grupo o individuo. Es importante aclarar que esta norma no tiene un propósito de certificación, ya que más bien aporta ciertas directrices para la implementación de una cultura organizacional y además puede ser de gran utilidad para un sistema de gestión ISO 9001 2015. Es de resaltar que, en esta norma, no se habla ni se especifica la evaluación del riesgo ambiental.

En América latina se encontraron dos trabajos relacionados con la definición de vulnerabilidad, los cuales exponen un análisis de un estudio de caso en Argentina (Cardoso, 2017) y una evaluación de fragilidad ambiental en Costa Rica (Dávila Gutiérrez, 2011)



Cardoso (2017), realizó un estudio en donde se focalizó el interés en exponer los rasgos de la población y su entorno habitado, características que sitúan a estos grupos humanos en diferentes posiciones frente a las diversas amenazas latentes, propias del momento histórico y del lugar en que viven: ésta es la vulnerabilidad. El principal objetivo de este artículo fue presentar un indicador sintético de la vulnerabilidad que incorpore tanto las dimensiones individuales y personales de la población como aquellas públicas y/o constitutivas del entorno más cercano al hombre. El indicador sintético presentado, solo se relaciona con amenazas por inundación. A pesar de no abordar temas de riesgo por fenómenos tecnológicos proporciona bases para abordar el análisis de vulnerabilidad en términos ambientales.

Dávila Gutiérrez (2011) publicaron el método Dávila & Mc Donald (I) para la estimación de la fragilidad ambiental del territorio en la cuenca del río Toro, Costa Rica, el cual es resultado de una tesis de maestría. El método propuesto para determinar espacialmente la fragilidad ambiental del territorio parte del hecho de que todo espacio posee una fragilidad intrínseca, la cual se refleja directa e indirectamente en las características predominantes, según diferentes variables; entre ellas: paisaje, clima, suelos etc. Se limita solo a fragilidad intrínseca, no contempla el tema de vulnerabilidad. Adicionalmente, no discrimina ante qué fenómeno puede ser frágil el ecosistema. Ambas metodologías son unos puntos de partida para hacer una evaluación de los elementos expuestos en materia ambiental, Cardoso (2017) se enfoca en los impactos de la sociedad y Dávila Gutiérrez (2011) hace hincapié en las variables ambientales del entorno.

Pérez Vizcaíno (2010) define un marco lógico para la incorporación de la vulnerabilidad de los sistemas biológicos en la evaluación del impacto ambiental (EIA) como método para reducir la subjetividad de la evaluación y reconocer las particularidades regionales de un país tan biodiverso como Colombia. Se establecen factores ambientales y se desarrollan indicadores prácticos utilizando la información disponible en el Sistema de Información Ambiental (SIA) y concluye que los indicadores propuestos para la valoración de vulnerabilidad son básicos, por tanto, deben ser más específicos debido a que, Colombia es un país con alta biodiversidad.

Los anteriores autores mencionan, de una manera muy genérica, los elementos con vulnerabilidad ambiental. No obstante, no consideraron en los análisis de riesgos las áreas protegidas con importancia a nivel internacional y el impacto en la comunidad. Jiao et al. (2019) desarrolló una investigación donde definen que las áreas protegidas son un pilar fundamental en el intento de detener la pérdida de hábitats y especies. Los autores afirman que, las comunidades locales influyen en los resultados de la conservación, por lo cual, existe una comprensión limitada de la importancia económica de los recursos ambientales en las áreas protegidas para los ingresos y el bienestar de los hogares locales. Esto inhibe el desarrollo e implementación de políticas de conservación eficientes. Este documento, utilizando el caso icónico del Gran Ecosistema del Serengeti-Mara y las comunidades locales circundantes en Tanzania y Kenia, cuantifica la importancia económica a nivel familiar de esta área protegida.

En línea con la consideración que hizo Jiao et al. (2019) de los elementos ambientales, Hu et al. (2021) realizaron una investigación en la que se considera la premisa de que, con el desarrollo continuo de la sociedad, la contradicción entre el ser humano y la naturaleza se vuelve cada vez más prominente, y la evaluación de la vulnerabilidad ecológica es una herramienta eficaz para aliviar tal contradicción. Los autores utilizaron el modelo AHP-PSR (Proceso de jerarquía analítica - Prensa-Estado-Respuesta) para evaluar la vulnerabilidad ecológica de la ciudad de Weifang. Implementaron el modelo PSR para seleccionar parámetros. AHP se utilizó para determinar los pesos de los parámetros y se utilizó SIG para evaluar la vulnerabilidad ecológica.

Partiendo del análisis SIG de los autores, Wu et al. (2021), presentaron avances significativos en la implementación de las herramientas de teledetección en la evaluación de vulnerabilidad ambiental, en un estudio de caso de la región del corredor económico China-Pakistán. En el trabajo se menciona que hubo cambios dramáticos en la vulnerabilidad ecológica (EV) de la región del Corredor Económico China-Pakistán (CPEC) debido a los efectos del cambio climático y la actividad humana. La obtención de datos estadísticos y de observación de campo para la evaluación del VE de la región CPEC es difícil debido a su estatus transnacional. Este estudio propuso un nuevo índice de vulnerabilidad ecológica de percepción remota (RSEVI) basado en los productos del espectro radiómetro de imágenes de resolución

moderada (MODIS), STRM3, DMSP-OLS y NPP-VIIRS. El índice RSEVI se aplicó a la región CPEC para investigar los cambios espacio-temporales en EV y los factores de influencia durante 2000-2019. Este estudio muestra la importancia de relacionar el trabajo de campo, la dinámica de la actividad humana y los sistemas de la teledetección, como insumos indispensables para la evaluación del riesgo ambiental.

Desde finales del siglo XX, se han considerado los análisis de riesgo ambiental para el sector hidrocarburos, la GoreChernomyrdin Commission's Environmental Working Group (1998) la cual corresponde a la unión de los sistemas de seguridad nacional (NSS) de Rusia y los Estados Unidos, formó el Grupo de Trabajo Ambiental (EWG), implementó la utilización de mapas, diagramas e imágenes satelitales para abordar los siguientes temas: limpieza de bases militares, silvicultura, climatología ártica, monitoreo de desastres y desarrollo de petróleo y gas en las regiones árticas y subárticas. En el marco de estas investigaciones, realizaron estudios pioneros de riesgo ambiental en el campo petrolífero de Priobskoye, debido a que se localizaba en la llanura aluvial del río Ob, la cual presentaba ecosistemas con alta sensibilidad ambiental. Por lo cual, propusieron una metodología para la evaluación del riesgo ambiental basada en los Sistemas de Información Geográfica.

Alrededor del mundo se han venido realizando diversas, como es el caso del trabajo de Dziubinski et al. (2005). Ellos presentan una metodología de evaluación de riesgos para las amenazas asociadas con el transporte de sustancias peligrosas a largo plazo, a diferencia del trabajo anterior que se consideraba solo campos petroleros. La metodología propuesta comprende una secuencia de análisis y cálculos que se utilizan para determinar las razones básicas de las fallas de las tuberías y sus probables consecuencias, teniendo en cuenta el riesgo individual y social. Una característica específica de esta metodología es una combinación de técnicas cualitativas (análisis de datos históricos, prueba de conformidad y sistema de puntuación de la evaluación de peligros) y técnicas cuantitativas de evaluación de la seguridad de las tuberías. Esto permite un análisis detallado del riesgo asociado con Fuentes de peligro seleccionadas mediante técnicas cuantitativas. Este estudio se realizó en Polonia.

En países como China, se han realizado estudios de riesgo ambiental, como en el trabajo de Qing et al. (2011). Este trabajo fue realizado con base en la investigación de la situación y la tendencia en

desarrollo de la gestión y el riesgo ecológico con un caso de estudio del campo petrolero Shengli a través del análisis sobre sus características de respuesta al contaminante del petróleo. De acuerdo con las características de la contaminación por hidrocarburos y el proceso de evaluación de riesgos ecológicos opciones de receptores –efecto expuesto- evaluación. Utilizaron el método de la curva de probabilidad conjunta para evaluar el riesgo ecológico de PHAS en el campo petrolífero de Shengli. Con este trabajo se proporcionó una base más razonable y precisa para la gestión del petróleo Onshore (continental). Adicionalmente da lineamientos de mayor detalle en comparación con la metodología planteada por la GoreChernomyrdin Commission's Environmental Working Group (1998).

En contraste, Arzaghi et al. (2018) realizó un modelo de evaluación de riesgos ecológicos para los derrames de petróleo en el Ártico de un oleoducto submarino, lo cual cambia el escenario de evaluación de riesgo ecológico presentado por la GoreChernomyrdin Commission's Environmental Working Group (1998) y por Dziubinski et al. (2005), debido a que, considera un escenario Offshore (Costa afuera) en el océano Ártico, en el cual menciona que, los ecosistemas acuáticos presentan diversos riesgos, especialmente en términos ambientales por los cuales pueden ser mucho mayores que en los escenarios contemplados por los autores anteriores. Este artículo presenta una metodología probabilística para la Evaluación de Riesgo Ecológico (ERA) de derrames accidentales de petróleo en esta región. Adoptan un enfoque de fugacidad para modelar el destino y el transporte del petróleo liberado, teniendo en cuenta la incertidumbre de las variables de entrada. El modelo permite tener en cuenta la probabilidad de ocurrencia de los parámetros de entrada, así como analizar el perfil de riesgo variable en el tiempo causado por los cambios estacionales.

A diferencia de los autores anteriores que había considerado los análisis solamente con combustibles en estado líquido, Hosseini et al. (2019) realiza una evaluación del riesgo de incendio basada en costos en la industria del gas natural mediante FTA difuso y ETA. Definen que los incendios son los accidentes más frecuentes en las instalaciones de gas natural a diferencia de los trabajos de Arzaghi et al. (2018), Qing et al. (2011), Dziubinski et al. (2005), que resaltan que para combustibles líquidos el mayor riesgo son los originados por derrames. Para evaluar el riesgo de incendio en una

planta de procesamiento de gas, realizaron un análisis de árbol de fallas (FTA) y un análisis de árbol de eventos (ETA). Al utilizar FTA y ETA, los caminos que conducen a un evento final quedarían demostrados visualmente. El marco se aplicó a un estudio de caso de una planta de procesamiento en el complejo de gas de South Pars. En la metodología propuesta por los autores, el riesgo calculado tiene la unidad de costo por año que permite a los tomadores de decisiones discernir el beneficio de su inversión en medidas de seguridad y mitigación de riesgos.

El manual de referencia “*Reference Manual Bevi Risk Assessments version 3.2 - Introduction*” publicado por el Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente de Países Bajos RIVM, (2009), presenta conceptos sobre la evaluación cuantitativa del riesgo, hace referencia a la importancia de este análisis para la toma de decisiones sobre la aceptabilidad del riesgo, con relación a la actividad de una empresa, establecimiento o vía de transporte.

Por otro lado, como como referente se considera el directorio de datos de evaluación de riesgos publicado por la Asociación Internacional de Productores de Petróleo y Gas (2010), presentan conceptos relacionados con los procedimientos de estimación de probabilidades de fuga de hidrocarburo, relacionada con eventos de explosiones y/o incendios.

Adicional, el Instituto de Energía de Londres (2006), hace referencia que la probabilidad de ignición de emisiones inflamables de instalaciones en tierra y mar adentro es un factor clave en determinar los riesgos que dichas instalaciones presentan para las personas, los bienes y el medio ambiente. Adicionalmente, menciona que los datos y la practica modelos disponibles para permitir a los evaluadores asignar distribuciones de probabilidad de ignición adecuada en el análisis de riesgo cuantitativo aun no es suficiente para una correcta evaluación del riesgo.

Pescea, Paci, Garronea, Pastorino y Fabiano (2012) en el trabajo denominado “*Modelación de probabilidades de ignición dentro del marco de evaluaciones cuantitativas de riesgos*”, mencionan que la cuantificación numérica de estas probabilidades puede cambiar sustancialmente los escenarios resultantes y la evaluación de probabilidad de eventos, y en consecuencia el nivel de riesgo evaluado. Por otro lado, hacen referencia que el cálculo y modelación de probabilidades de ignición es frecuentemente abordado

con modelos muy simples, ampliamente utilizados a pesar de que los mismos autores a menudo declararon sus métodos como "*altamente especulativos*".

El libro denominado "*Classification of hazardous locations*", traducido como clasificación de lugares peligrosos, publicado por Cox, Lees, y Ang (1990), realizaron una investigación de la factibilidad de poner la clasificación de las áreas peligrosas sobre una base cuantitativa.

A su vez, el software PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool), es una herramienta diseñada para realizar análisis y modelación de consecuencias de sucesos finales (incendios, explosiones y/o nubes tóxicas) ante escapes de productos químicos, inflamables, combustibles y/o tóxicos (DNV, 2022), por ser un modelo numérico permite establecer unas áreas de afectación de acuerdo a las condiciones operacionales y de diseño para cada equipo o facilidad asociada a la industria de hidrocarburos.

Ruíz Rios (2014), presentó una propuesta metodológica con el objetivo de desarrollar el análisis de riesgo ambiental para una empresa dedicada a recubrimientos metálicos por electrólisis, ubicado en la ciudad de La Victoria - Perú, que servirá para el sector industrial y energético. Esta metodología abarca el análisis de los cuatro componentes (Fuentes de riesgo, sistemas de control primario, sistema de transporte y receptores vulnerables), indicados de un modo directo y de fácil aplicación, por lo que se estima de interés su consideración. Esta se basa en la evaluación de dos factores; las fuentes de peligro y los receptores vulnerables. Se divide en dos subfactores: área afectada, vulnerabilidad del entorno natural y socioeconómico. Este trabajo tiene un enfoque desde la seguridad industrial. Este tipo de temas se puede abarcar desde la gestión del riesgo de desastres. A pesar de no estar enfocado al sector hidrocarburos, como los estudios anteriores, contempla los elementos más importantes para realizar una evaluación del riesgo ambiental.

Por otra parte, basado en las disposiciones normativas propuestas por la norma UNE 150008 propuesta por Normalización Española para la determinación del riesgo ambiental UNE (2016), considera la determinación del índice de consecuencias ambientales, considerando la probabilidad de ocurrencia de

los eventos y partiendo de la definición de peligrosidad del producto, cantidad de sustancia, área afectada por el suceso final y la vulnerabilidad del entorno.

Como referentes de estos lineamientos para Latinoamérica, en Perú, el Viceministerio de Gestión Ambiental, Dirección General de Calidad Ambiental (2010), publicó una guía metodológica para la evaluación de riesgo ambiental, la cual es una herramienta de apoyo para la Gestión Ambiental, que se pone a disposición de las autoridades de los gobiernos regionales, para que los profesionales a cargo de las Gerencias de Recursos Naturales y Medio Ambiente o sus similares puedan desarrollar evaluaciones ambientales, con la finalidad de determinar los niveles de riesgos en un área geográfica, basados en indicadores y criterios de evaluación. Sin embargo, falta incluir casos de estudio con la finalidad de validar la metodología.

A nivel latinoamericano, respecto a estudios de vulnerabilidad y riesgo ambiental, se pueden resaltar los estudios de Dávila Gutiérrez (2011), Cardoso (2017) y Vera Rodríguez y Albarracín Calderón (2017). Este tipo de estudios son limitados y las referencias de los estudios de Polonia, China, Tanzania, Estados Unidos y Rusia mencionados anteriormente, no aplican del todo como referente para Colombia, debido a que los recursos ambientales y las características del territorio son muy diferentes.

En cuanto a nuestro país, los análisis asociados a la evaluación de riesgo ambiental se destacan los siguientes.

Martínez, Caro, Daza y Roa (2018) de la Universidad Nacional de Colombia publicaron una propuesta metodológica para la evaluación de riesgos ambientales en contextos complejos, en este trabajo los autores proponen la evaluación de 24 riesgos ambientales genéricos, plantean una lista de chequeo para verificar y evaluar las condiciones de operación que podrían incidir sobre la probabilidad de ocurrencia del riesgo y/o su impacto en caso de concretarse. A manera de conclusión, hacen referencia que, las condiciones ambientales y las condiciones de operación, pueden ser un enfoque efectivo para la evaluación de riesgos en contextos complejos.

La guía de Ecopetrol (2013) tiene como objetivo proveer un marco de referencia para elaborar los análisis de riesgo aplicables a las actividades de producción, transporte de hidrocarburos, almacenamiento

y procesamiento de hidrocarburos, que permita estandarizar los criterios y lineamientos para llevar a cabo el análisis del riesgo tecnológico, lograr objetividad en el ejercicio de análisis y obtener trazabilidad en los resultados de éste. La guía metodológica no da directrices para realizar un análisis de riesgo con el detalle requerido para caracterizar los elementos de importancia ambiental. Esto en la medida en que solo se presentan unas calificaciones de sensibilidad para cada tipo de cobertura y no establece criterios que vinculen variables del componente abiótico, así como su interacción discretizando análisis de vulnerabilidad. Sin embargo, Ecopetrol S.A., se basa en un análisis tendencial de tipo cuantitativo y estadístico para la determinación del riesgo a partir de la identificación de áreas sensibles y considerando la metodología propuesta en la norma API-RP581, así como las directrices definidas por la AICHE (American Institute of Chemical Engineers).

En la Tabla 1 se especifica la fuente y características de algunas de las referencias consultadas, que soportan y validan la construcción de los antecedentes.



**Tabla 1***Caracterización de los antecedentes*

Nombre de artículo	Año	País	Autores	Filiación	Revista	Google Scholar	Índice H	Categoría revista	Observación
A novel remote sensing ecological vulnerability index on large scale: A case study of the China-Pakistan Economic Corridor region. Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection – A case of Weifang City, China	2021	China	Hongwei Wu, Bing Guo, Junfu Fan, Fei Yang, Baomin Han, Cuixia Wei, Yuefeng Lu, Wenqian Zang, Xiaoyan Zhen, Chao Meng.	School of Civil Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China	Ecological Indicators.	—	127	Q1	Revista de alto impacto
Protected areas, household	2019	Tanzania	Xi Jiao, Solomon Zena Walelign, Martin Reinhardt	Global Development Section,	Forest Policy and Economics.	8 citaciones	68	Q1	Revista de alto impacto
Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection – A case of Weifang City, China	2021	China	Xiaojing Hu, Chuanming Ma, Peng Huang, Xu Guo	School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China	Ecological Indicators	6 citaciones	127	Q1	Revista de alto impacto

Nombre de artículo	Año	País	Autores	Filiación	Revista	Google Scholar	Índice H	Categoría revista	Observación
environmental incomes and well being in the Greater Serengeti-Mara Ecosystem			Nielsen, Carsten Smith-Hall	Department of Food and Resource Economics, University of Copenhagen, Frederiksberg C, Denmark Department of Geography Civil and Environmental Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran; University of Tehran, Tehran, Iran National Centre for Maritime Engineering and Hydrodynamics , Australian Maritime College (AMC), University of Tasmania, Launceston					
Cost-based fire risk assessment in natural gas industry by means of fuzzy FTA and ETA	2019	Irán	Navid Hosseini, Saeed Givvehchi, Reza Maknoon	University of Tehran, Tehran, Iran	Journal of Loss Prevention in the Process Industries	12 citaciones	79	Q1	Revista de alto impacto
An ecological risk assessment model for Arctic oil spills from a subsea pipeline	2019	Australia, Canadá	Ehsan Arzaghi, Rouzbeh Abbassi, Vikram Garaniya, Jonathan Binns, Faisal Khan	University of Tasmania, Launceston	Marine Pollution Bulletin	33 citaciones	179	Q1	Revista de alto impacto
Estudio de la vulnerabilidad socio-ambiental a	2017	Argentina	María Mercedes Cardoso	Departamento de Geografía de la FHUC-UNL	Caderno de Geografia	11 citaciones	—	—	Estudio hecho con rigor científico, referente

Nombre de artículo	Año	País	Autores	Filiación	Revista	Google Scholar	Índice H	Categoría revista	Observación
través de un índice sintético. Caso de distritos bajo riesgo de inundación: Santa Fe, Recreo y Monte Vera, Provincia de Santa Fe, Argentina. Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas.	2017	Colombia.	Jorge Mario Vera Rodríguez, Adriana Paola Albarracín Calderón	Universidad de Tolima, Colombia	Ciencia e Ingeniería Neogranadina	51 citaciones	—	—	latinoamerican o. Guía con altas citaciones
Guía de análisis de riesgo tecnológico para el sector hidrocarburos	2013	Colombia.	Gerencia Técnica De Activos - Vicepresidencia De Transporte Y Logística Ecopetrol S.A	Ecopetrol	N/A	—	—	—	Guía ampliamente utilizada en la evaluación de riesgos en la industria colombiana.
Ecological risk characterization and assessment of phases in the Shengli oil field	2011	China.	Qin Li Qing, Deng Xiang Zheng, Liu Bing	Shandong University of Science and Technology, Geomatics College, Qingdao	Procedia Environmental Sciences	1 citación	34	No tiene aún asignado cuartil	Es indispensable abordar análisis offshore

Nombre de artículo	Año	País	Autores	Filiación	Revista	Google Scholar	Índice H	Categoría revista	Observación
El método de Dávila & Mc Donald (I) para la estimación de la fragilidad ambiental del territorio, el caso de la cuenca del río Toro, Costa Rica	2011	Costa Rica	Homer Dávila Gutiérrez	Geo Group Resources & Projects. CEO.	N/A	—	—	—	Estudio publicado en Redalyc, con una propuesta muy acertada para la evaluación de la fragilidad
Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines	2005	Polonia	M. Dziubinski, M. Fraczak, A.S. Markowski	Department of Chemical Engineering, Faculty of Process and Environmental Engineering U.S. Environmental Protection Agency, U.S. National Imagery and Mapping Agency, U.S.	Journal of Loss Prevention	122 citaciones	79	Q1	Revista de alto impacto
Environmental risk assessments of oil and gas activities using national security and civilian data sources	1998	Estados Unidos, Rusia.	GoreChernomyrdin Commission's Environmental Working Group	Department of Energy, Russian Federal Center for Geoecological Systems, Ministry of Defense of the Russian Federation	N/A	Altamente citado	—	—	Estudio pionero en el área, realizado por dos naciones con alto poder económico y político.

Nombre de artículo	Año	País	Autores	Filiación	Revista	Google Scholar	Índice H	Categoría revista	Observación
Metodología de análisis de riesgo ambiental aplicado a una empresa de recubrimientos metálicos por electrólisis – La Victoria - Perú	2014	España	Christian Ruiz Rios	Universidad Politécnica de Valencia	N/A	1 citación	—	—	Uno de los pocos referentes de riesgo ambiental con caso de estudio en América Latina
Guía de evaluación de riesgos ambientales	2010	Perú	Viceministerio de Gestión Ambiental, Dirección General de Calidad Ambiental	Ministerio de Ambiente del Perú	N/A	—	—	—	Referente de una entidad gubernamental

## Objetivos

### Objetivo general

Generar una propuesta de análisis y evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo ambiental para los sucesos finales asociados a bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina, a partir del planteamiento matemático propuesto por Ecopetrol S.A., aplicado al campo petrolífero El Cerro.

### Objetivos específicos

- Representar la zonificación de la vulnerabilidad ambiental, a partir de los componentes biótico y abiótico tomados de la caracterización ambiental, para las áreas de consecuencias asociados a los sucesos finales de bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina para el campo petrolífero El Cerro.
- Proponer una modificación a la fórmula establecida por Ecopetrol S.A., para calcular el riesgo ambiental y su zonificación, aplicado al suceso final de bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina.
- Aplicar la fórmula modificada del riesgo ambiental para los sucesos finales de bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina en el campo petrolífero El Cerro con su respectiva zonificación.

### Marco Teórico

Cardona (1992) postula la siguiente definición:

*“El Riesgo puede reducirse si se entiende como el resultado de relacionar la Amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un evento, y la Vulnerabilidad de los elementos expuestos, o factor interno de selectividad de la severidad de los efectos sobre dichos elementos. Medidas estructurales, como el desarrollo de obras de protección y la intervención de la Vulnerabilidad de los elementos bajo Riesgo, y medidas no estructurales, como la regulación de usos del suelo, la incorporación de aspectos preventivos en los presupuestos de inversión y la realización de preparativos para la atención de emergencias pueden reducir las consecuencias de un evento sobre una región o una población”.* (Cardona O. D., 1992)

En concordancia con lo anterior, se describe a continuación el soporte conceptual de cada variable que hace parte de la definición del riesgo.

#### **Amenaza y consecuencia**

Según lo establece la Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes (SNGRD, 2017) define la amenaza como:

*“peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales”.* (p. 23)

A su vez, frente al análisis de consecuencias se considera su definición como la *“Estimación de las consecuencias de eventos usando modelos matemáticos, retorno de experiencias o resultados experimentales. Implica el cálculo de la energía transferida o masa liberada por el evento”* (CCPS, 1999, citado en SNGRD, 2017, p. 23).

De la misma manera, la amenaza tecnológica se relaciona con accidentes de tipo tecnológico o industrial, procedimientos peligrosos, fallos de infraestructura o de ciertas actividades humanas que pueden generar afectaciones lesiones, daños y degradación ambiental de acuerdo a lo citado por Lavell

(2007) y referenciado por la estrategia internacional para la reducción de desastres (UNISDR, 2009) y por la Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes (SNGRD, 2017 p. 40).

Los análisis y evaluación asociados a los eventos de origen tecnológico, se han fortalecido solo a partir de modelos numéricos relacionados con la definición de las áreas de consecuencias como es el caso del libro "*Classification of hazardous locations*", publicado por Cox, Lees, y Ang (1990), el estudio del Instituto de Energía de Londres (2006) que referencia la probabilidad de ignición de emisiones inflamables de instalaciones en tierra y mar adentro, entre otros, hasta llegar a modelos más confiables como es el caso del software PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) de la empresa proveedor de soluciones digitales para la gestión del riesgo y la seguridad (DNV, 2022) y que es implementado ampliamente en la industria de hidrocarburos para fortalecer los análisis de consecuencias para sucesos finales.

Para la definición de las áreas de consecuencia asociadas a los eventos finales de incendio de piscina, bola de fuego y chorro de fuego, se deben considerar las condiciones de descarga de los productos involucrados, así como las condiciones operacionales y de diseño para cada facilidad objeto de análisis.

El establecer las distancias de afectación y protección ante los efectos nocivos causados, las cuales dependen del nivel de intensidad resulta relevante, ya que, se entiende que ante mayor sea el nivel de radiación térmica por incendio, mayor es el nivel de daño (Tabla 2 y Figura 1).



**Tabla 2***Niveles de afectación por radiación térmica*

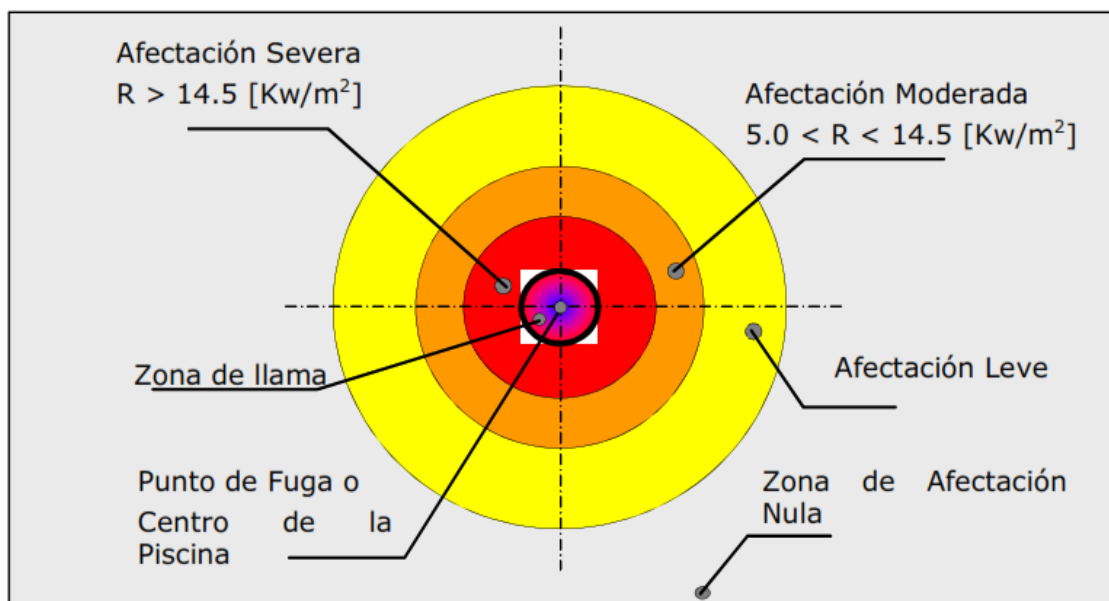
RADIACIÓN TÉRMICA (KW/m <sup>2</sup> )	CONDICIONES
> 37.5	Intensidad suficiente para causar daño a equipos de proceso.
> 20.9	Zona de probabilidad de 90% de muerte para tiempos de exposición mayores de 30 segundos.
> 14.5	Zona de probabilidad de fatalidad del 50% de muerte para tiempos de exposición mayores de 30 segundos.
>9.50	Por encima de este valor existe ignición de la madera sometida al flujo de calor durante un tiempo excesivo. Intensidad suficiente para fundir tuberías de plástico. Puede desarrollar fatalidad debido a quemaduras de tercer grado después de 100 segundos de exposición.
>7.5	Quemaduras de segundo grado después de 12 segundos de exposición. Zona de probabilidad de 1% de muerte para tiempos de exposición mayores de 30 segundos.
>5	Tiempo de exposición máximo de 1 minuto sin ropa de protección adecuada. Quemaduras de primer grado después de 30 segundos de exposición.  Quemaduras de segundo grado después de 180 segundos de exposición.  Las consecuencias estimadas del accidente producen un nivel de daño que justifica la aplicación inmediata de las medidas de seguridad.
1.6 - 5	Tiempo de exposición máximo de 3 minutos sin ropa de protección adecuada.  Quemaduras de primer grado después de 120 segundos de exposición.  Las consecuencias a este nivel del accidente provocan efectos que, aunque perceptibles por la población, no justifican la intervención inmediata de las medidas de protección sobre las personas.  Zona límite de intensidad calórica en áreas donde pueden emplearse acciones de emergencia que duren hasta varios minutos por personal con ropa adecuada.
< 1.6	En esta zona no se producen daños por exposición prolongada. Zona exterior que corresponde al área para establecer los cordones de protección.

*Nota:* Los tiempos de exposición que ocasionan quemaduras de primer segundo y tercer grado, están dados para personas expuestas a la radiación térmica sin ningún tipo de protección. Las probabilidades de fatalidad se definieron según lo expuesto en el documento “*Thermal radiation criteria for vulnerable population*”.2004 de la Health & Safety Executive.

*Fuente:* Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. American Institute of Chemical Engineering. New York, Página 268. Enero de 2000.

**Figura 1**

*Distancias de interés seleccionadas para incendio de chorro, piscina y bola de fuego*



*Fuente:* (ECOPETROL, 2013)

En esta medida resulta relevante identificar las condiciones atmosféricas y climatológicas del área de estudio para la modelación PHAST. Actualmente se cuenta con unas descripciones asociadas a las condiciones para cada radiación térmica, evaluando las distancias en las cuales se alcanzan porcentajes o probabilidades de afectación mortal de 90, 50 y 1% por exposición de 30 segundos a la radiación térmica de un incendio según la metodología Probit (ECOPETROL, 2013).

### **Vulnerabilidad**

La *vulnerabilidad* puede definirse como la fragilidad de los elementos expuestos ante la posible ocurrencia de un evento adverso. A continuación, se presenta una compilación de conceptos de vulnerabilidad desde el punto de vista de expertos y entidades oficiales:

Blaikie et al. (1996, p. 14) define la vulnerabilidad como las características de una persona o grupo desde el punto de vista de su capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza natural. Implica una combinación de factores que determinan el grado hasta el cual la vida y la

subsistencia de alguien queda en riesgo por un evento distinto e identificable de la naturaleza o de la sociedad.

Cardona (2001) expresa que la vulnerabilidad es la predisposición, susceptibilidad o factibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir daños en caso de que un fenómeno desestabilizador de origen natural o antrópico se manifieste.

La Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDDR) (2004) en la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres define la vulnerabilidad como una “condición determinada por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales, que aumentan la susceptibilidad de una comunidad al impacto por amenazas”.

La normativa legal vigente en el territorio colombiano en Gestión del Riesgo de Desastres (Ley 1523 del 2012), define la vulnerabilidad como la *“Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos”*.

De acuerdo con el *“protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas”* (MINAMBIENTE, 2014), del Ministerio de Ambiente para el termino de POMCAS se evalúa esencialmente 3 pilares de la vulnerabilidad ellos son: Social, Económica y Ambiental.

El concepto de Vulnerabilidad se despliega en una diáspora de ideas que encierran procesos sociales, económicos, político y Ambientales, generando así concepciones en una determinada población. La Vulnerabilidad habla en medio de una concepción de Riesgo por procesos de zonificación ambiental y posición legítima de la sociedad.

No obstante, a pesar de contar con pocos referentes se tienen asociados a los análisis y principalmente a la zonificación de la vulnerabilidad ambiental, Dávila & Mc Donald (1998), establecen que *“la Fragilidad ambiental unificada es la sumatoria algebraica de las fragilidades ambientales*

parciales”. Así pues, su análisis parte de la condición que *“La fragilidad ambiental es el grado de debilidad intrínseca que hace que un ambiente pueda deteriorarse con facilidad; en tanto que la fragilidad ambiental parcial se puede interpretar como el grado de debilidad intrínseca con respecto a una variable ambiental”* (p.e. geología, paisaje etc). De acuerdo con el planteamiento de los autores, para calcular el índice de fragilidad ambiental unificado se emplea la siguiente ecuación:

### **Ecuación 1**

$$IFAu = \sum_{i=1}^{10} IFAp_i (p_i)$$

Donde:

IFAu = Índice de fragilidad ambiental unificada

IFAp = Índice de fragilidad ambiental parcial

$p_i$  = Peso específico asignado para cada variable ambiental.

El límite superior se establece en 10 ( $i=1..10$ ), en la medida que la propuesta de Dávila & McDonald establecen esa cantidad de fragilidades ambientales parciales asociadas al Manual de Instrumentos Técnicos para el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (Decreto 32967 MINAE, Costa Rica) y que aplica para variables como geología, hidrología superficial y subterránea, geomorfología, zonas de vida y factores biológicos, capacidad de uso de la tierra, uso actual de la tierra, amenazas naturales, diversidad y riqueza paisajística, pedología y climatología – meteorología..

### **Riesgo**

El riesgo tecnológico, según la terminología sobre gestión del riesgo de desastres y fenómenos amenazantes, se estima como *“Daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos mayores generados por el uso y acceso a la tecnología, originados en sucesos antrópicos, naturales, socio-naturales y propios de la operación”* (SNGRD, 2017).

Los principales sucesos finales asociados al riesgo tecnológico corresponden a incendio de piscina (pool fire), que es una combustión estacionaria con llama de difusión del líquido de un charco de dimensiones conocidas (extensión), que se producen en un recinto descubierto, bola de fuego que se

refiere a la ignición de la nube de combustible que se produce por el estallido súbito y total, por calentamiento externo, de un recipiente que contiene un gas inflamable licuado a presión presentando efectos asociados a radiación térmica y chorro de fuego: (jet fire) y se relaciona con la llama estacionaria y alargada (de gran longitud y poca amplitud) provocada por la ignición de un chorro turbulento de gases o vapores combustibles (ECOPETROL, 2013).

Por su parte, Ecopetrol (2013), presentó la guía de análisis de riesgo tecnológico para el sector hidrocarburos. Esta guía tiene como objetivo proveer un marco de referencia para elaborar los análisis de riesgo aplicables a las actividades de producción, transporte de hidrocarburos, almacenamiento y procesamiento de hidrocarburos, que permita estandarizar los criterios y lineamientos para llevar a cabo el análisis del riesgo tecnológico, lograr objetividad en el ejercicio de análisis y obtener trazabilidad en los resultados de éste.

Esto se logra mediante el análisis las frecuencias de falla para infraestructura, así como la probabilidad de ocurrencia de los sucesos finales modelados para los eventos de bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina, de acuerdo con las áreas de afectación para estos escenarios objeto de análisis. Dichas áreas son obtenidas a partir de la modelación de consecuencias por medio del software PHAST<sup>1</sup>, el cual considera las condiciones operacionales y de diseño de cada equipo, así como el clima predominante como información base que alimenta el modelo numérico.

A continuación, se presenta de manera resumida, la estructura sobre la cual se realiza la definición del riesgo ambiental de acuerdo a la formulación establecida por Ecopetrol S.A., quien plantea la siguiente ecuación para su cálculo.

---

<sup>1</sup> <https://www.dnv.com/software/services/phast/phast-our-service.html>

**Ecuación 2**

$$R_j = \sum_i [(P1_i) * \underbrace{[Area(Pol_i \cap Pol_j) * Ie]}_{\text{Afectación}} * (P2_i)]$$

**Probabilidad**
**Afectación**

*Fuente:* (ECOPETROL, 2013)

Donde:

- $R_j$  = Riesgo total del área ambientalmente sensible
- $i$  = Suceso final: Definido para los escenarios de incendio de piscina, bola de fuego y chorro de fuego.
- $j$  = Área Ambientalmente Sensible: cobertura natural y figuras de protección, más la presencia de especies amenazadas en estas áreas.
- $P1_i$  = Frecuencia de ocurrencia del suceso final dada la pérdida de contención, Corresponde al resultado del cálculo de las frecuencias de los sucesos finales a partir de bases de datos internacionales y el histórico de incidentes, para establecer los valores de probabilidades para diferentes eventos. (ECOPETROL, 2013). Para el caso de  $P1_i$  se toma a partir de información de datos estadísticos a partir de análisis de falla que recopila dicha información para una fuga de un determinado tamaño. Para obtener la probabilidad de ocurrencia de cada evento amenazante, incendio de piscina y llamarada sigue la estadística de Bayes mediante el producto de la frecuencia base del incidente por las probabilidades condicionales y acorde a los valores de los registros definidos en la Guía de análisis de riesgos tecnológicos para el sector hidrocarburos.
- $Pol_i$  = Polígono del suceso final  $i$ , expresado en Ha, Si bien se interpreta que dichas condiciones asociadas a las consecuencias por radiación, estas obedecen a las áreas relacionadas con las distancias por radiación térmica obtenida a partir de la modelación con el software PHAST (Tabla 2).

- $\cap$  = Intersección, permite el análisis relacionado con la vulnerabilidad y su interacción con las áreas de afectación para cada uno de los escenarios de incendio de piscina, chorro de fuego y bola de fuego.
- $Pol_j$  = Polígono del área ambientalmente sensible, expresado en Ha, considera el componente biótico que puedan significar una vulnerabilidad ante la materialización de los escenarios de incendio de piscina, bola de fuego y chorro de fuego y que puedan verse inmersos dentro de las áreas de probable afectación y que corresponde a Cobertura natural y figuras de protección, presencia de especies amenazadas en estas áreas.
- $I_e$  = Importancia del área ambientalmente sensible, esto es, tomando como base los criterios y pesos asignados en la guía y que comprende coberturas, figuras de protección y especies amenazadas para calificar la sensibilidad del área.
- $P_{2_i}$  = Probabilidad afectación del ambientalmente sensible dado el suceso final  $i$ , esta probabilidad depende de la afectación que pueda generar el suceso final, que obedece a los escenarios de incendio de piscina, chorro de fuego y bola de fuego, los cuales presentan en la definición de sus áreas de radiación térmica los criterios en  $Kw/m^2$ , y los receptores que corresponden al componente biótico descrito. Estos valores toman como base los criterios definidos en la Guía análisis de riesgo tecnológico (ECOPETROL, 2013). Si bien se entiende que para cada uno de los escenarios objeto de análisis, se realiza la determinación del riesgo ambiental para cada equipo y que para la misma área se puede presentar una gran cantidad de polígonos con valoración de vulnerabilidad y frecuencias de ocurrencia de acuerdo al componente y tipo de radiación térmica, Ecopetrol S.A., establece una forma de promediar la frecuencia como se presenta en la Ecuación 3.

**Ecuación 3**

$$P2i = \frac{\sum_q \sum_k [Area(Poli,k \cap Polj) * P_{q,k}]}{\sum_q \sum_k [Area(Poli,k \cap Polj)]}$$

*Fuente:* (ECOPETROL, 2013)

Donde:

- P2i= Probabilidad de afectación promedio del área ambientalmente sensible dado el suceso final i
- i = Suceso final
- q = Posibles receptores dentro del área ambientalmente sensible: flora, fauna y cuerpos de agua.
- k = Nivel de efecto
- Polj = Polígono del área ambientalmente sensible, expresado en Ha
- Poli,k= Polígono del suceso final i para el nivel de efecto k, expresado en Ha
- $\cap$  = Intersección
- P<sub>q,k</sub> = Probabilidad de afectación del receptor q para el nivel de efecto k



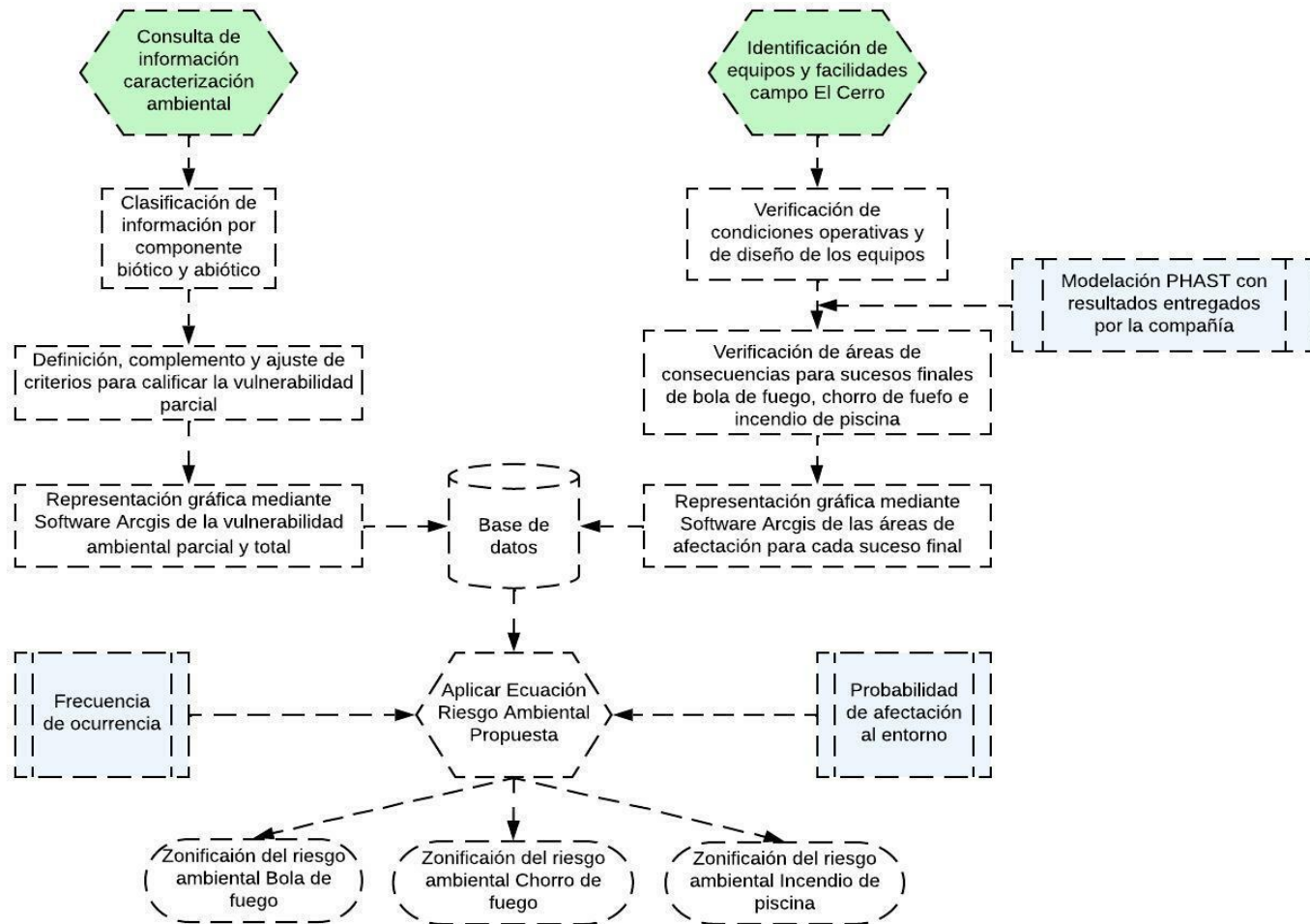
## Metodología

El presente trabajo es una investigación de tipo cuantitativo, aplicada a un caso específico, donde se buscó incorporar de manera holística los criterios de pesos utilizados como insumo para la zonificación de la vulnerabilidad de acuerdo al contexto externo y real del área de estudio. De acuerdo con la definición de áreas de afectación para los sucesos finales de bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina entregados por la compañía y la modificación de la Ecuación 2 relacionada con el riesgo ambiental, al aplicar estos análisis permitió obtener los resultados para el campo petrolífero El Cerro.

Se trata de un proceso que tomó información de línea base a partir del Estudio de Impacto Ambiental para el campo El Cerro, cartografía de la línea base a escala 1:25000 y cartografía del IGAC base 1:25000. Para establecer los criterios de selección se clasificó la información base para el componente biótico y abiótico y se definieron las variables a incorporar para la determinación de la vulnerabilidad y su respectiva zonificación. Una vez se definió la zonificación y se acotó a las áreas de afectación obtenidas mediante el software PHAST, entregadas por la compañía, para cada suceso final, se procedió a calcular el riesgo ambiental a partir de la modificación propuesta de la fórmula definida por Ecopetrol S.A., considerando las frecuencias de ocurrencia y las probabilidades de afectación al entorno. De manera resumida se presenta en la Figura 2 el proceso metodológico implementado para el desarrollo del presente trabajo.

Figura 2

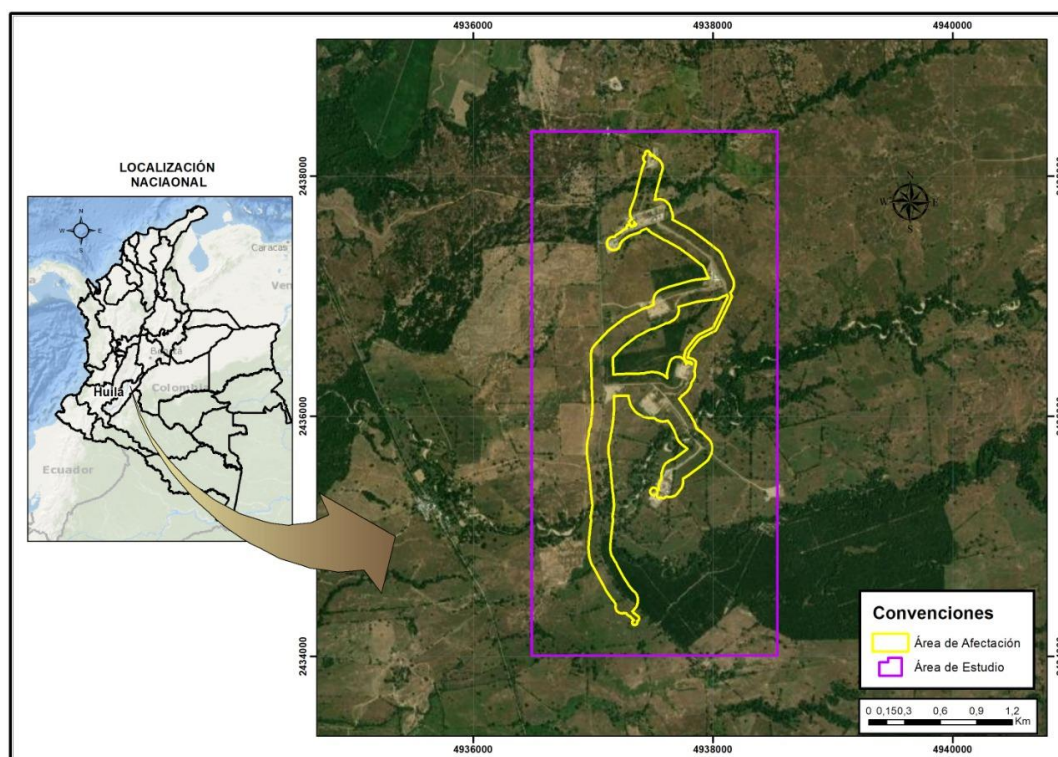
Diagrama metodológico



Como área objeto de análisis para la implementación de la metodología propuesta, se estableció un área de 895,18 hectáreas asociadas a la zona de estudio que pretende agrupar la mayor cantidad de infraestructura asociada a la industria de hidrocarburos de manera que se pudiese obtener las áreas de consecuencias a partir de la modelación numérica que establece las diferentes radiaciones para los escenarios de piscina de fuego, bola de fuego y chorro de fuego. A continuación, se presenta en la Figura 3, la definición del área de estudio general.

### Figura 3

*Área de estudio del proyecto*



De acuerdo con la identificación de la infraestructura principal del proyecto, se realiza una clasificación de los equipos que pueden presentar eventos de incendio asociados a los sucesos finales de bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina para el área de estudio agrupándolo con su respectiva cantidad como se presenta en la Tabla 3 y Figura 4.

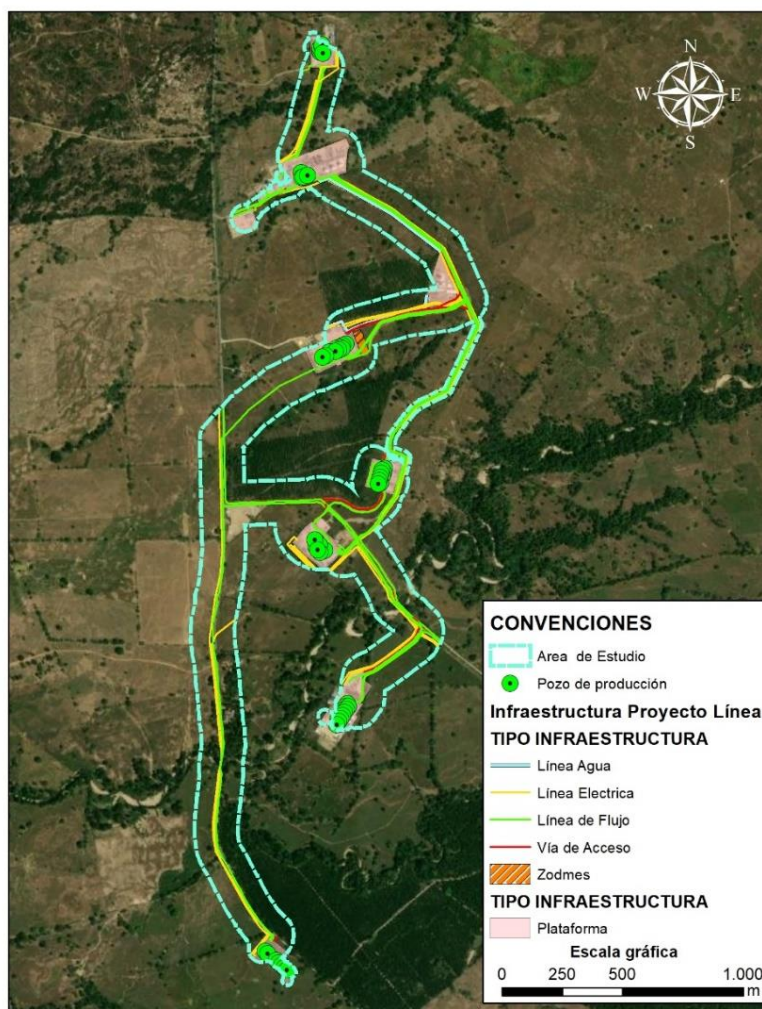
**Tabla 3***Infraestructura del proyecto*

<b>Equipos</b>	<b>Cantidad</b>
Bomba Cargadero	5
Bomba Generación	2
Brazo de Cargue	10
Caldera	2
Carrotanque	1
Compresor	2
FWKO	4
Generador	4
Intercambiador de Calor	12
KO Drum	1
Manifold de Crudo	14
Módulos de Gas	1
Pozo	10
Scrubber	3
Tanque Almacenamiento Crudo	10
Tanque Diésel	2
Tea	2
Tratador Electrostático	3
Unidad Descompresora	1
Líneas de Flujo	6

*Fuente:* Compañía, 2022.

**Figura 4**

*Infraestructura del campo El Cerro*



En función de dar cumplimiento a los tres objetivos planteados para el presente trabajo de investigación, se describe a continuación la metodología implementada en el desarrollo del proyecto de grado.

A nivel Nacional, de acuerdo a lo definido por el Decreto 1076 de 2015 en el Artículo 1.1.2.2 Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), se establece como objeto de la entidad:

*“encargada de que los proyectos, obras o actividades sujetos de licenciamiento, permiso o trámite ambiental cumplan con la normativa ambiental, de tal manera que contribuyan al desarrollo sostenible*

*ambiental del País*” y por tanto, como ente regulador presentó la metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales (2018), donde define la estructura para la presentación de la caracterización del componente abiótico y biótico, abordando las siguientes variables: geología, geomorfología, suelos y usos de tierra, hidrología, hidrogeología, paisaje, atmosfera, ecosistemas y áreas de interés ambiental.

De acuerdo a lo anterior, la información de caracterización ambiental se obtuvo del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), proporcionado por la compañía, con escala de detalle 1:25000 y con la descripción de cada componente de acuerdo con lo definido en la Guía metodológica para la presentación de estudios de impacto ambiental, esto permite reducir la incertidumbre frente a la información de referencia utilizada para la caracterización ambiental.

### **Vulnerabilidad**

Como ya se aclaró, de la verificación de la información del componente biótico y abiótico se realiza la selección de los parámetros de interés para la zonificación de la vulnerabilidad tomando como referente la propuesta de Dávila & Mc Donald (2011) asociado al cálculo del índice de fragilidad ambiental unificado. Sin embargo, se propone incorporar solo las variables relacionadas con el conflicto uso del suelo, proceso morfodinámico, unidad geomorfológica, unidad de paisaje, zonas de recarga y drenajes, esto en la medida que las variables asociadas a pedología, capacidad de uso de la tierra y uso actual del suelo se incorporan en la variable conflicto uso del suelo, y en esa medida se pretende reducir la subjetividad y sobrevaloración de dichas variables. El mismo caso se presenta para clima-meteorología, debido a que estas condiciones ya se incorporan en la modelación realizada con el software PHAST para la definición de las áreas de consecuencias por radiación térmica para los sucesos finales de bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina.

A su vez, para el caso de amenazas naturales la susceptibilidad se puede abordar desde la caracterización de línea base, por tanto, se considera pertinente que los análisis de riesgo asociados a amenazas naturales se aborden desde los análisis de riesgo NATECH <sup>2</sup>.

Adicional, para el componente biótico se consideró pertinente tener en cuenta las variables definidas en la guía de análisis de riesgo tecnológico para el sector de hidrocarburos (Ecopetrol, 2013, p. 143) relacionadas con coberturas naturales, especies amenazadas y figuras de protección (áreas ambientalmente sensibles).

A continuación, se relacionan las variables propuestas y actualizadas para cada componente con los respectivos criterios de calificación en función de la fragilidad intrínseca, tomando como base la propuesta de Dávila & Mc Donald y Ecopetrol S.A., y que se detallan en el **Anexo 1. Criterios calificación vulnerabilidad**. En ese sentido, se relaciona en la Tabla 4 las variables que hacen parte de las áreas de consecuencias para los eventos finales de chorro de fuego, bola de fuego e incendio de piscina y que son el objeto de calificación para la zonificación de la vulnerabilidad.

**Tabla 4**

*Variables utilizadas del componente abiótico para el análisis de vulnerabilidad*

<b>Variable Componente Abiótico</b>	<b>Variable Componente Biótico</b>
Aptitud física del terreno	Cobertura Tierra
Conflicto Uso Suelo	Especies Amenazadas
Pendientes	Áreas Ambientalmente Sensibles
Proceso Morfodinámico	
Unidad Geomorfológica	
Unidad paisaje	
Zonas de Recarga	
Drenajes	

Según Chapin et al. (2011) los factores abióticos o componentes abióticos son los componentes químicos y físicos sin vida del medio ambiente que afectan a los organismos y el funcionamiento de los

<sup>2</sup> Eventos de origen natural que desencadenan accidentes tecnológicos y se derivan del acrónimo en inglés, Natural hazard-triggered Technological accidents (Cruz et al., 2004; Showalter & Myers, 1994).

ecosistemas. Considerando lo anterior, para hacer una valoración objetiva de la vulnerabilidad ambiental, es necesario considerar los siguientes componentes abióticos del entorno

### ***Conflicto uso del suelo***

En la variable de Conflicto Uso del Suelo, se evalúa e identifica las áreas que, debido a su uso, generan degradación de los suelos, o, por el contrario, están siendo usados adecuadamente (Guerra, 2014). Es así, que, en la Tabla 5, se utilizan las siguientes categorías para la evaluación e identificación del conflicto de la utilización del suelo en el caso de estudio.

**Tabla 5**

*Parámetros de uso actual del suelo implementados en la categorización de vulnerabilidad.*

<b>Descripción</b>	<b>Tipo de conflicto</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Vulnerabilidad</b>	
Suelos con sobreutilización severa y sobreutilización moderada lo cual aumenta la sensibilidad del área	Sobreutilización severa y sobreutilización moderada	A	Muy Alta	5
Suelos con una sobreutilización ligera que presenta una condición de sensibilidad importante	Sobreutilización ligera	S1	Alta	4
Suelos con una subutilización moderada a subutilización severa que por sus condiciones asociadas a subutilización presenta condiciones moderadas asociadas a la sensibilidad	Subutilización moderada y subutilización severa	S2 Y S3	Media	3
Suelo con una subutilización ligera poseen una sensibilidad baja por su poco uso	Subutilización ligera	O1	Baja	2
Suelos usados adecuadamente poseen una vulnerabilidad muy baja a una afectación por sus condiciones asociadas a la sensibilidad	Uso adecuado	O3 Y O2	Muy baja	1

*Nota:* Adaptado de Guerra, (2014)

### ***Pendiente***

La pendiente de un terreno es la relación que existe entre la diferencia de altura de un terreno determinado y la distancia horizontal de este mismo, es usualmente expresada en % o en grados (°) (Ibáñez, 2010) y refleja que tan horizontal o vertical está un terreno. En la Tabla 6, se utilizan las siguientes categorías para subdividir las diferentes pendientes en el área de estudio.



**Tabla 6**

*Parámetros del tipo de pendiente implementados en la categorización de vulnerabilidad.*

Porcentaje de pendiente	Clasificación pendiente	Categoría vulnerabilidad	
>100%	Totalmente escarpada	Muy alta	5
75 - 100%	Fuertemente escarpada		
50 - 75%	Moderadamente escarpada	Alta	4
25 - 50%	Ligeramente escarpada		
12 - 25%	Fuertemente inclinada	Media	3
7 - 12%	Moderadamente inclinada		
3 - 7%	Ligeramente inclinada	Baja	2
1 - 3%	Ligeramente plana	Muy baja	1
0 - 1%	A nivel		

### ***Proceso morfodinámico***

Los procesos morfodinámicos son los agentes responsables de dar forma a la superficie terrestre a través de procesos repetitivos. Estos procesos están intrínsecamente relacionados con la topografía, la geología y la climatología de la zona que a su vez controlan la erosión, transporte y depositación de partículas que poco a poco van modelando la superficie (IGAC, 2021). En la Tabla 7 se utilizan diferentes categorías para subdividir los distintos procesos morfodinámicos en el área de estudio.

**Tabla 7**

*Parámetros de procesos morfodinámicos implementados en la categorización de vulnerabilidad.*

Procesos morfodinámicos	Categoría vulnerabilidad	
Deslizamientos, Desprendimientos, Flujos de suelo, erosión muy alta	Muy Alta	5
Sedimentación aluvial, reptación, socavación lateral, erosión alta	Alta	4
Surcos, cárcavas, erosión laminar, erosión moderada	Media	3
Sedimentación coluvial, erosión ligera	Baja	2
Sedimentación eólica, terracetos y pisadas de ganado, sedimentación marina o lacustre, erosión muy baja	Muy baja	1

### ***Unidad geomorfológica***

Las unidades geomorfológicas, son las subdivisiones de las formas de la tierra que pueden variar dependiendo de la composición, topografía, relieve y edad de formación. Las unidades geomorfológicas están subdivididas en los siguientes ambientes: Ambiente denudacional, ambiente fluvial y lagunar, ambiente marino – costero, ambiente eólico, ambiente estructural, ambiente volcánico y ambiente glacial

y periglacial (IGAC, 2021). En la Tabla 8 se utilizan diferentes parámetros para categorizar la vulnerabilidad de las unidades en el área de estudio, asociándolo a algunos ejemplos.

**Tabla 8**

*Parámetros de geomorfología implementados en la categorización de vulnerabilidad*

Descripción	Ejemplo unidades geomorfológicas	Categoría vulnerabilidad	
Tipo de relieve montañoso, con relieve relativo muy alto a extremadamente alto, con pendientes fuertemente a totalmente escarpada, forma de ladera compleja y/o compleja, longitud de ladera muy corta	Escarpe de erosión mayor (Deem), Inselberg (Di), Ladera erosiva (Del), Escarpe cárstico (Kec)	Muy alta	5
Tipo de relieve colinado, con relieve relativo alto, pendientes moderadamente escarpadas a fuertemente inclinada, forma de ladera irregular, longitud de ladera corta	Colina residual (Dcr), Cono de talus ( Dct), Ladera ondulada (Dlo) Colina estructural (Sces)	Alta	4
Tipo de relieve colinado, con relieve relativo moderado, pendiente moderadamente inclinada, forma de ladera convaca o convexa, longitud de ladera moderada	Pedimentos de erosión (Dpe), Escarpe de meseta (Sme)	Media	3
Tipo de relieve colinado, relieve relativo bajo, pendiente ligeramente inclinada, forma de ladera recta o convexa, longitud de ladera larga	Terraza de erosión (Fte), Manto de piroclastos (Vmp) Escarpe de abanico fluvial (Fea)	Baja	2
Tipo de relieve loma, planicie o montículo, relieve relativo bajo a muy bajo, pendiente ligeramente plana, forma de ladera recta, cóncava o convexa, longitud de ladera muy larga	Terraza de acumulación (Fta), Flujo lahárico aterrazado (Vfla), Abanico aluvial (Faa)	Muy baja	1

### *Unidad paisaje (fragilidad visual)*

La unidad de paisaje o fragilidad visual del paisaje de una zona, es la vulnerabilidad del paisaje al cambio cuando se desarrollan determinados usos y/u operaciones sobre él. Para el caso de estudio, se utilizan diferentes aspectos para la categorización de este mismo, basándose en la accesibilidad a los puntos de observación, la superficie desde la que se percibe y la calidad del paisaje (Codina, 2011). En la Tabla 9 se muestran los diferentes parámetros y las diferentes categorías.

**Tabla 9**

*Parámetros de categoría implementados en la categorización de vulnerabilidad.*

Calidad visual vulnerable del paisaje		Categoría vulnerabilidad	
Tipo de Paisaje	Calidad del paisaje		
Distinto o Singular	Espectacular	Muy Alta	5
	Soberbio	Alta	4
Común o Típico	Distinguido	Media	3
Indistinto - Deteriorado	Agradable	Baja	2
	Vulgar	Muy baja	1

*Nota:* Adaptado de Codina, (2001).

### **Zonas de recarga**

Las zonas de recarga son zonas dentro de una cuenca hidrográfica en las cuales, por sus condiciones geológicas, topográficas y climatológicas son propicias para que el agua se infiltre a través de las rocas y/o depósitos para recargar los acuíferos en las partes bajas de la cuenca (Peñuela y Carrillo, 2012). Para la categorización de la vulnerabilidad en la zona de estudio, la Tabla 10 divide las zonas de recarga en base a la capacidad de infiltración que poseen las rocas y/o depósitos.

**Tabla 10**

*Parámetros de las zonas de recarga implementados en la categorización de vulnerabilidad*

Zonas de recarga	Descripción	Categoría vulnerabilidad	
Muy alta	Áreas de recarga constituidas por depósitos no consolidados de muy alta capacidad de infiltración.	Muy Alta	5
Alta	Áreas de recarga constituidas por depósitos no consolidados de alta capacidad de infiltración.	Alta	4
Media	Áreas de recarga constituidas por depósitos no consolidados de Mediana capacidad de infiltración.	Media	3
Baja	Áreas de recarga constituida por depósitos no consolidados con muy baja capacidad de infiltración	Baja	2
Muy baja	Áreas de recarga constituidas por depósitos no consolidados de muy baja capacidad de infiltración.	Muy baja	1

*Nota:* Adaptado de Codina, (2001).

### **Drenajes**

Los drenajes son las zonas por las cuales, las aguas superficiales o escorrentías se encauzan para formar ríos o quebradas, principalmente, ocurre en las zonas con menor pendiente y más bajas de una cuenca. La Tabla 11 muestra la subdivisión de los drenajes basados en su permanencia en el tiempo y en su complejidad.

**Tabla 11**

*Parámetros de drenaje implementados en la categorización de vulnerabilidad parcial.*

Patrón de drenaje	Categoría vulnerabilidad parcial	
Drenajes dobles permanentes	Muy Alta	5
Drenajes dobles intermitentes	Alta	4
Drenajes sencillos permanentes	Media	3
Drenajes sencillos intermitentes	Baja	2
Sin drenaje	Muy baja	1

Frente a los factores bióticos, estos corresponden a todos los organismos vivos: animales, plantas, hongos, bacterias y otros microorganismos (es decir, el conjunto de Reinos de la Naturaleza), así como las interacciones que guardan entre ellos (Ecología Verde, 2021). Por lo cual para el análisis de vulnerabilidad ambientales es imprescindible, conocer las características específicas de los factores bióticos del área de interés.

### ***Coberturas naturales***

Las coberturas naturales de la Tierra son zonas de la superficie terrestre divididas en base a su ubicación geográfica, su naturaleza, uso e importancia (Di Gregorio y Jansen, 1998). La Tabla 12 tomada de Ecopetrol (2013) y actualizada de acuerdo con la Corine Land Cover (2018), subdivide las coberturas en 4 niveles de detalle, desde lo general hasta lo particular y específico de cada zona geográfica y natural, y se categoriza cada cobertura en base a su importancia y vulnerabilidad ecosistémica y económica.

**Tabla 12**

*Parámetros de coberturas en la categorización de vulnerabilidad parcial.*

Nivel 1	NIVELES DE DETALLE			Valor de Importancia	Categoría vulnerabilidad	
	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4			
<b>Territorios</b>	Zonas	Tejido Urbano Continuo		4	Alta	
<b>Artificializados</b>	Urbanizadas	Tejido Urbano Discontinuo		4	Alta	
	Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	Zonas industriales o comerciales		2	Baja	
		Red vial, ferroviaria y terrenos asociados		2	Baja	
		Zonas portuarias		3	Media	
		Aeropuertos		1	Muy baja	
		Obras hidráulicas		3	Media	
		Zonas de extracción	Zonas de extracción minera e hidrocarburos		3	Media

NIVELES DE DETALLE				Valor de Importancia	Categoría vulnerabilidad		
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4				
	minera, escombreras e hidrocarburos	Zonas de disposición de residuos		3	Media		
	Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	Zonas verdes urbanas Instalaciones recreativas		2 1	Baja Muy baja		
<b>Territorios Agrícolas</b>	Cultivos transitorios	Otros cultivos transitorios		2	Baja		
		Cereales		2	Baja		
		Oleaginosas y leguminosas		2	Baja		
		Hortalizas		2	Baja		
		Tubérculos		2	Baja		
	Cultivos permanentes	Cultivos permanentes herbáceos	Cultivos permanentes herbáceos	Otros cultivos permanentes herbáceos	4	Alta	
				Caña	3	Media	
				Plátano y banano	4	Alta	
				Tabaco	3	Media	
				Papaya	4	Alta	
				Amapola	1	Muy baja	
			Cultivos permanentes arbustivos	Otros cultivos permanentes arbustivos		4	Alta
				Café	4	Alta	
				Cacao	4	Alta	
				Viñedos	4	Alta	
				Coca	1	Muy baja	
			Cultivos permanentes arbóreos	Otros cultivos permanentes arbóreos		2	Baja
				Palma de aceite	2	Baja	
				Cítricos	3	Media	
				Mango	3	Media	
	Cultivos agroforestales	4		Alta			
	Pastos	Cultivos confinados		3	Media		
		Pastos limpios		2	Baja		
		Pastos arbolados		2	Baja		
	Áreas agrícolas heterogéneas	Pastos enmalezados		2	Baja		
		Mosaico de cultivos		3	Media		
		Mosaico de pastos y cultivos		3	Media		
		Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales		3	Media		
		Mosaico de pastos con espacios naturales		3	Media		
	Bosques	Bosque denso	Bosque denso alto de tierra firme	5	Muy alta		
			Bosque denso alto inundable	5	Muy alta		
			Bosque denso bajo de tierra firme	5	Muy alta		
			Bosque denso bajo inundable	5	Muy alta		
<b>Bosques y Áreas Seminaturationales</b>							

NIVELES DE DETALLE				Valor de Importancia	Categoría vulnerabilidad
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4		
		Bosque abierto	Bosque abierto alto de tierra firme	4	Alta
			Bosque abierto alto inundable	4	Alta
			Bosque abierto bajo de tierra firme	4	Alta
			Bosque abierto bajo inundable	4	Alta
		Bosque fragmentado		3	Media
		Bosque de galería y ripario		4	Alta
		Plantación forestal		3	Media
	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	Herbazal	Herbazal denso de tierra firme no arbolado y arbolado y con arbustos; inundable arbolado y no arbolado, arracachal y helechal	4	Alta
			Herbazal abierto arenoso y rocoso	1	Muy baja
			Herbazal abierto arenoso y rocoso	1	Muy baja
		Arbustal	Arbustal denso	5	Muy alta
			Arbustal abierto esclerófilo y mesófilo	5	Muy alta
			Arbustal abierto esclerófilo y mesófilo	5	Muy alta
		Vegetación secundaria o en transición	Vegetación secundaria alta	4	Alta
			Vegetación secundaria baja	2	Baja
	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Zonas arenosas naturales	Playas, arenales, campos de dunas	1	Muy baja
		Afloramientos rocosos		1	Muy baja
		Tierras desnudas y degradadas		4	Alta
		Zonas quemadas		3	Media
		Zonas glaciares y nivales		5	Muy alta
<b>Áreas Húmedas</b>	Áreas húmedas continentales	Zonas Pantanosas		3	Media
		Turberas		5	Muy alta
		Vegetación acuática sobre cuerpos de agua		4	Alta
	Áreas húmedas costeras	Pantanos costeros		5	Muy alta
		Salitral		2	Baja
		Sedimentos expuestos en bajamar		2	Baja
<b>Superficies de Agua</b>	Aguas continentales	Ríos (50 m)		5	Muy alta
		Lagunas, lagos y ciénagas naturales		5	Muy alta
		Canales		3	Media
		Cuerpos de agua artificiales		3	Media
	Aguas marítimas	Lagunas costeras		5	Muy alta
		Mares y océanos		5	Muy alta
		Estanques para acuicultura marina		4	Alta

*Nota:* Adaptado de (ECOPETROL, 2013)

### *Especies amenazadas*

Para la determinación de la vulnerabilidad que tienen las especies dentro de la zona de estudio, se hace uso de la Tabla 13, tomada de Ecopetrol (2013), la cual, divide y categoriza la vulnerabilidad que tendría cada especie en base al nivel de amenaza que posea cada una, y además, si es una especie temporal o permanente dentro del territorio.

**Tabla 13**

*Parámetros de especies amenazadas en la categorización de vulnerabilidad parcial.*

CATEGORÍAS	NIVELES		Puntuación	Categoría Vulnerabilidad Parcial
	Nivel 1	Nivel 2		
<b>ESPECIES AMENAZADAS</b>	Categoría UICN	Críticamente amenazado (CR)	5	Muy alta
		En peligro (EN)	5	Muy alta
		Vulnerable (VU)	5	Muy alta
		Casi amenazado (NT)	4	Alta
		Preocupación menor (LC)	3	Media
		Datos insuficientes (DD)	1	Muy baja
		No evaluado (NE)	1	Muy baja
		Apéndice I	5	Muy alta
		Apéndice II	4	Alta
		Apéndice III	2	Baja
<b>ESPECIES VEDADAS</b>	Permanentes		5	Muy alta
	Temporales		4	Alta
<b>ESPECIES ENDÉMICAS</b>	Nacional y específica		5	Muy alta
	Nacional		5	Muy alta
<b>ESPECIES MIGRATORIAS</b>	Nacional		5 cuando tienen importancia económica	Muy alta
			4 cuando son emblemáticas pero no tienen importancia económica	Alta
	Transnacionales		5	Muy alta

*Nota:* Adaptado de (ECOPETROL, 2013)

### *Áreas ambientalmente sensibles*

La sensibilidad ambiental es definida como la resistencia y capacidad que poseen determinadas áreas de soportar actividad y cambios dentro de ellas (EPMMQ, 2013). Las áreas ambientalmente

sensibles han sido asignadas como una prioridad ambiental y social y han empezado a ser protegidas por las autoridades dentro del territorio. En la Tabla 14, tomada y modificada de Ecopetrol (2013), se subdividen las áreas ambientalmente sensibles en 3 niveles de detalle, desde lo general a lo particular y se asignan mayores valores a zonas perennes, de conservación, interés histórico- cultural, entre otras.

**Tabla 14**

*Parámetros de áreas ambientalmente sensibles en la categorización de vulnerabilidad.*

FIGURAS	NIVELES DE LA ESTRUCTURA			Valor de Importancia	Categoría Vulnerabilidad parcial
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3		
Áreas de manejo especial de conformidad con lo establecido en el Decreto-Ley 2811 de 1974 y la reglamentaciones derivada	Distritos de Manejo Integrado de Recursos Naturales Renovables	Preservación		5	Muy alta
		Protección		5	Muy alta
		Recuperación para la		4	Alta
		Preservación			
		Recuperación para la		3	Media
		Producción		1	Muy baja
		Producción		3	Media
		Preservación y		5	Muy alta
		Conservación		4	Alta
		Restauración		1	Muy baja
		Desarrollo múltiple			
		Distritos de Conservación de Suelos			(3-4) Teniendo en cuenta la zonificación de manejo que tenga establecida el área, si es la recuperación de suelo la protección o conservación, el peso es 4os degradados para la producción el peso es 3, si es para
Áreas de Reserva Forestal Nacional	Reserva Forestal de Ley 2da de 1959		(1-5) El peso para esta figura depende		



FIGURAS	NIVELES DE LA ESTRUCTURA			Valor de Importancia	Categoría Vulnerabilidad parcial
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3		
				de la zona con la cual exista traslape: En zona de protección el valor a tomar es 5, si es de restauración 4, si es de uso sostenible es 3 y si es de alta densidad de uso será 1 o 2	
		Reserva Forestal Productoras		3	Media
		Reserva Forestal Protectora-Productora		(3-4) 4 Si en la reserva prevalece mas la función protectora que productora	Alta
		Reserva Forestal Productora		3 Si prevalece el uso productor por encima del protector	Media
		Reserva Forestal Productora		3	Media
		Reserva Forestal Protectora		(4-5) 4 si es protectora con especies introducidas	Alta
	<b>Áreas de Reserva Forestal Regional</b>			5 si son protectoras con especies nativas	Muy alta
		Reserva Forestal Protectora-Productora		(3-4) 4 Si en la reserva prevalece mas la función protectora que productora	Alta
				3 Si prevalece el uso productor por encima del protector	Media
<b>SINAP</b>			Zona primitiva	5	Muy alta

FIGURAS	NIVELES DE LA ESTRUCTURA			Valor de Importancia	Categoría Vulnerabilidad parcial
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3		
<b>Sistema Parques Nacionales Naturales</b>	Parques Naturales Nacionales		Zona de recuperación natural	5	Muy alta
			Zona histórico- cultural	5	Muy alta
			Zona de recreación general exterior	5	Muy alta
			Zona de alta densidad de uso	5	Muy alta
			Zona intangible	5	Muy alta
			Zona primitiva	5	Muy alta
			Zona de recuperación natural	5	Muy alta
			Zona histórico- cultural	5	Muy alta
			Zona de recreación general exterior	5	Muy alta
			Zona intangible	5	Muy alta
	Zona primitiva	5	Muy alta		
	Zona de recuperación natural	5	Muy alta		
	Reservas Naturales		Zona histórico- cultural	5	Muy alta
			Zona de recreación general exterior	5	Muy alta
			Zona intangible	5	Muy alta
			Zona primitiva	5	Muy alta
			Zona de recuperación natural	5	Muy alta
			Zona histórico- cultural	5	Muy alta
			Zona de recreación general exterior	5	Muy alta
			Zona intangible	5	Muy alta
Zona primitiva			5	Muy alta	
Zona de recuperación natural			5	Muy alta	
Áreas Naturales Únicas		Zona histórico- cultural	5	5	
		Zona de recreación general exterior	5	Muy alta	
		Zona de alta densidad de uso	5	Muy alta	
		Zona intangible	5	Muy alta	
		Zona primitiva	5	Muy alta	
		Zona de recuperación natural	5	Muy alta	
		Zona histórico- cultural	5	Muy alta	
		Zona de recreación general exterior	5	Muy alta	
		Zona intangible	5	Muy alta	
		Zona primitiva	5	Muy alta	
Santuarios de Fauna y Flora		Zona de recuperación natural	5	Muy alta	
		Zona histórico- cultural	5	Muy alta	
		Zona de recreación general exterior	5	Muy alta	
		Zona intangible	5	Muy alta	
		Zona primitiva	5	Muy alta	
		Zona de recuperación natural	5	Muy alta	
		Zona histórico- cultural	5	Muy alta	
		Zona de recreación general exterior	5	Muy alta	
		Zona intangible	5	Muy alta	
		Zona primitiva	5	Muy alta	
Vías Parque		Zona de recuperación natural	5	Muy alta	
		Zona histórico- cultural	5	Muy alta	

FIGURAS	NIVELES DE LA ESTRUCTURA			Valor de Importancia	Categoría Vulnerabilidad parcial
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3		
Áreas protegidas públicas			Zona de recreación general exterior	5	Muy alta
			Zona de alta densidad de uso	5	Muy alta
		Reservas Forestales	Zona de Preservación	5	Muy alta
		Protectoras (Nacionales y regionales)	Zona de Restauración	5	Muy alta
			Zona de Uso Sostenible	4	Alta

*Fuente:* (ECOPETROL, 2013)

A partir de los criterios generados para establecer la zonificación de la vulnerabilidad, considerando la propuesta de Dávila & Mc Donald para la Ecuación 1 y de Ecopetrol en la Ecuación 2, se propone calcular las vulnerabilidades parciales para cada variable y una vez identificadas calcular la vulnerabilidad total a partir del promedio de acuerdo con la cantidad de vulnerabilidades parciales identificadas. En ese orden, la obtención de la vulnerabilidad total, como un ponderado de todas las variables identificadas, permite reducir la subjetividad en la medida que no se asignen factores que multipliquen más peso a una variable con respecto a otra. En ese sentido, al promediar los las vulnerabilidades parciales, se obtuvieron los rangos para la vulnerabilidad ambiental.

### **Riesgo ambiental**

A partir de la Ecuación 2, los autores de este trabajo de tesis proponen una nueva estructura que permita identificar la variable de vulnerabilidad, de manera que se pueda a partir de su zonificación identificar las áreas con mayores niveles de vulnerabilidad, entendiéndola como una fragilidad o susceptibilidad integral, esto es, considerando las caracterizaciones de los componentes biótico y abiótico. Dicho lo anterior, se presenta a continuación en la Ecuación 4 la definición ajustada de riesgo ambiental que se aplicará al campo El Cerro.

## Ecuación 4

$$R_j = \sum_i^m [(P1_i) * [\text{Área} (Pol_j * Ie) \cap Pol_i] * P2_i]$$

Donde:

- $R_j$  = Riesgo total del área ambientalmente sensible
- $i$  = Suceso final: Definido para los escenarios de incendio de piscina, bola de fuego y chorro de fuego.
- $m$  = Cantidad de sucesos finales  $i$  que se puedan llegar a presentar
- $j$  = Área Ambientalmente Sensible: cobertura natural y figuras de protección, más la presencia de especies amenazadas en estas áreas.
- $P1_i$  = Frecuencia de ocurrencia del suceso final dada la pérdida de contención, Corresponde al resultado del cálculo de las frecuencias de los sucesos finales a partir de bases de datos internacionales y el histórico de incidentes, para establecer los valores de probabilidades para diferentes eventos. (ECOPETROL, 2013). Para el caso de  $P1_i$  se toma a partir de información de datos estadísticos a partir de análisis de falla que recopila dicha información para una fuga de un determinado tamaño. Para obtener la probabilidad de ocurrencia de cada evento amenazante, incendio de piscina y llamarada sigue la estadística de Bayes mediante el producto de la frecuencia base del incidente por las probabilidades condicionales y acorde a los valores de los registros definidos en la Guía de análisis de riesgos tecnológicos para el sector hidrocarburos.
- $Pol_i$  = Polígono del suceso final  $i$ , expresado en Ha, Si bien se interpreta que dichas condiciones asociadas a las consecuencias por radiación, estas obedecen a las áreas

relacionadas con las distancias por radiación térmica obtenida a partir de la modelación con el software PHAST (Tabla 2).

- $\cap$  = Intersección, permite el análisis relacionado con la vulnerabilidad y su interacción con las áreas de afectación para cada uno de los escenarios de incendio de piscina, chorro de fuego y bola de fuego.
- $Pol_j$  = Polígono del área ambientalmente sensible, expresado en Ha, considera el componente biótico que puedan significar una vulnerabilidad ante la materialización de los escenarios de incendio de piscina, bola de fuego y chorro de fuego y que puedan verse inmersos dentro de las áreas de probable afectación y que corresponde a Cobertura natural y figuras de protección, presencia de especies amenazadas en estas áreas.
- $I_e$  = Importancia del área ambientalmente sensible, esto es, tomando como base los criterios y pesos asignados en la guía y que comprende coberturas, figuras de protección y especies amenazadas para calificar la sensibilidad del área.
- $P2_i$  = Probabilidad afectación del ambientalmente sensible dado el suceso final  $i$ , esta probabilidad depende de la afectación que pueda generar el suceso final, que obedece a los escenarios de incendio de piscina, chorro de fuego y bola de fuego, los cuales presentan en la definición de sus áreas de radiación térmica los criterios en  $Kw/m^2$ , y los receptores que corresponden al componente biótico descrito. Estos valores toman como base los criterios definidos en la Guía análisis de riesgo tecnológico (ECOPETROL, 2013). Si bien se entiende que para cada uno de los escenarios objeto de análisis, se realiza la determinación del riesgo ambiental para cada equipo y que para la misma área se puede presentar una gran cantidad de polígonos con valoración de vulnerabilidad y frecuencias de ocurrencia de acuerdo al componente y tipo de radiación térmica, Ecopetrol S.A., establece una forma de promediar la frecuencia como se presenta en la Ecuación 3.

La importancia de caracterizar la vulnerabilidad ambiental de una manera detallada, parte del hecho que se pueden identificar las condiciones particulares y específicas del área identificando la incorporación de la información del componente abióticos y biótico en el análisis, la cual es un insumo imprescindible para el cálculo de riesgo ambiental.

Esto se interpreta en la medida que, como se propone inicialmente por Ecopetrol, sugiere asignar un valor de importancia a la intersección del área de afectación y el área sensible de manera indistinta, esto es, sin reconocer el tipo de consecuencia asociado a la radiación ya que se debe discretizar por  $P2i$  pero dependiendo del tipo de consecuencia y su respectiva área. En términos prácticos, es notoriamente diferente la afectación que pueda generarse por radiación de  $37.5 \text{ Kw/m}^2$  a una cobertura tipo bosque de galería en comparación a una cobertura tipo pastos limpios, ya que en términos de pérdidas notoriamente es más alto para el bosque de galería en función del servicio ecosistémico que puede prestar.

Considerando cada una de las variables definidas (Tabla 4), se presentan los criterios sobre los cuales se obtienen los resultados de cada variable de acuerdo a las normas técnicas y metodologías definidas para la definición de riesgo.

A partir de la propuesta asociada a la Ecuación 4, se presenta en la Tabla 15 las probabilidades de afectación parciales por tipo de variable y tipo de radiación térmica, así como el valor de  $P2i$  calculado para aplicar en la Ecuación 3 para cada polígono definido. Estos valores se toman como referentes de acuerdo a la fragilidad de cada componente y asociándolo a las condiciones de los niveles de afectación por radiación térmica (Tabla 2) y el referente de análisis de riesgo en instalaciones industriales abordado en la guía de riesgo tecnológico de Ecopetrol S.A.

**Tabla 15***Probabilidad de afectación promedio*

<b>Variables</b>	<b>&gt;20,5 Kw/m2</b>	<b>&gt;14,5 Kw/m2</b>	<b>&gt;9,5 Kw/m2</b>	<b>&gt;5 Kw/m2</b>
Conflicto Uso Suelo	0,9	0,66	0,4	0,2
Pendientes	0,5	0,3	0,2	0,1
Geomorfología	0,6	0,4	0,3	0,1
Paisaje	0,9	0,7	0,66	0,3
Cobertura Tierra	0,9	0,7	0,66	0,3
Especies Amenazadas	0,9	0,5	0,3	0,01
P2i	0,78	0,54	0,42	0,17

*Nota: Adaptado de (ECOPETROL, 2013)***Sistemas de información geográfica**

Para la elaboración de la cartografía y análisis espacial se tomó como información existente la cartografía del estudio de impacto ambiental del campo El cerro, en el que se contaba con la información temática primaria y se utilizó como insumo para la generación de vulnerabilidad ambiental y riesgo ambiental. La información temática tenida en cuenta es:

- Coberturas
- Geomorfología
- Conflicto Uso del Suelo
- Pendientes
- Paisaje
- Coberturas

El Software empleado fue ArcGis ® versión 10.8 como principal herramienta de sistemas de información geográfica. Para la generación de la cartografía de vulnerabilidad se realizaron las calificaciones de acuerdo a los criterios establecidos, y a partir de geoprocursos en ArcGis, se unieron estas capas y se promediaran las calificaciones, estos resultados se analizaron y se les asignó un valor de Vulnerabilidad.

Dentro de la elaboración de la cartografía temática se tuvieron en cuenta los geoprocursos y modelación para la obtención de información y unidades temáticas. Estos procesos consisten en

interpolación de datos, cruce de información de diferentes temáticas para generar otras, calificación de atributos.

El manejo de la información estuvo representado en el Marco de referencia MAGNA – SIRGAS, asociado al elipsoide GRS80 (Global Reference System 1980), Coordenadas planas Gauss Krüger Proyección Transversa de Mercator, Falso oeste 5.000.000, Falso norte 5.000.000 meridiano central -73 Origen Oeste, latitud de origen 4, factor de escala:0,9992 y unidades metros. También se realizó control de calidad digital de las diferentes unidades temáticas y cartografía base a partir de reglas topológicas y revisión de consistencia temática en los atributos de cada capa y además se tuvo en cuenta la simbología adoptada corresponde al catálogo de objetos CO-25 IGAC. Versión 2. Así como la definida por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).



## Resultados

### Caracterización área de estudio

Como se mencionó con anterioridad, para la caracterización de las condiciones bióticas y abióticas del área de estudio relacionada con el campo el Cerro, se tomó información de línea del Estudio de Impacto Ambiental realizado para el campo petrolífero El Cerro y considerando los criterios establecidos en la Tabla 4, se identificaron las siguientes variables en la caracterización del componente abiótico, tomadas a partir del Estudio de Impacto Ambiental Campo Petrolífero el Cerro (2021) y que se describen de manera general a continuación.

Con relación al conflicto uso del suelo se obtuvo en mayor medida suelos con subutilización moderada con un 68,05%, en menor proporción tierras sin conflicto o de uso adecuado con un 11,48% y suelos con subutilización severa con un 10,89%; localmente se presentan suelos con sobreutilización severa (2,83%) y cuerpos de aguas naturales con un 6,21%.

Las pendientes del terreno en la zona de estudio son predominantemente ligeramente inclinadas (3-7%) con un 62,74%, en segundo lugar, se presentan pendientes ligeramente planas (1-3%) correspondientes a un 26,89%. Localmente se presentan pendientes a nivel (0-1%), fuertemente inclinadas (12-25%) y moderadamente inclinadas (7-12%), con los siguientes porcentajes del área de estudio respectivamente 4,93%, 0,20% y 5,24%.

La geomorfología de la zona de estudio corresponde a subunidades de origen fluvial, la unidad predominante corresponde a las laderas denudadas del abanico aluvial con un 78,83%, en segundo lugar, se presentan barras de terrazas fluviales con un 20,88% y localmente se presentan barras de llanuras de inundación con un 0,29%.

Para las condiciones de paisaje del área de estudio relacionada con el campo El Cerro, se presentan en mayor medida paisajes de categoría “*común o típico*” con un 85,71%, los cuales corresponden a cuerpos de agua artificiales, cultivos de palma de aceite y pastos limpios y arbolados. En menor proporción, se presentan paisajes de categoría “*distinto o singular*”, con un porcentaje del 11,46%, los cuales corresponden a arenales, bosques, cuerpos de agua naturales, vegetación secundaria y zonas

pantanosas. Localmente, se presentan paisajes de categoría “*indistinto - deteriorado*” con un porcentaje del 2,83%, correspondientes a áreas de explotación de hidrocarburos asociadas al campo El Cerro.

En cuanto a las coberturas presentes en el área de estudio, se presenta un predominio de pastos limpios con un 70,30%, en segundo lugar se presentan cultivos de palma de aceite con un 12,50%, de importancia ambiental, se debe resaltar la presencia de bosque de galería y/o ripario con un 5,47%, también se evidencia vegetación secundaria baja con un 4,24%, adicionalmente, presenta de manera local las siguientes coberturas de origen natural: arenales 0,25%, lagunas, lagos y ciénagas naturales 0,20%, pastos arbolados 2,83%, ríos (50m) 1,21% y zonas pantanosas 0,27. Finalmente, es importante hacer referencia a las siguientes coberturas de origen antrópico presentes en el área de estudio: cuerpos de agua artificiales y áreas de explotación de hidrocarburos.

Frente a las especies amenazadas en la plataforma (Tremarctoscolombia.org, 2022), se evidenció que el 100 % del área de estudio presenta especies amenazadas con categoría Vulnerable.

Como soporte de los resultados acá presentados, se amplía la información obtenida asociado a la caracterización ambiental en el **Anexo 2 Resultados**.

### **Estimación de áreas de consecuencias**

Para la definición de las áreas de afectación a partir de las consecuencias para los sucesos finales de bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina, se parte de la clasificación de cada uno de los tres sucesos bajo parámetros operativos, de diseño, caracterización de los tipos de fluidos, condiciones climatológicas del área y tipo de rotura. Así pues, a partir del uso del modelo basado en el Software PHAST, se establecen los contornos de afectación de acuerdo al tipo de radiación térmica (Tabla 2), de manera que permita zonificar las áreas de consecuencias. Estas áreas resultan ser el insumo principal que permite acotar y definir las áreas de consecuencias sobre la cual se establece la zonificación de la vulnerabilidad ambiental. Se resalta que los resultados obtenidos de la modelación fueron proporcionados por la compañía para cada suceso final, si bien, se presentan las áreas de afectación para diferentes condiciones asociadas al tipo de rotura del equipamiento y se contemplan a su vez las condiciones días y

noche, se toman las áreas más críticas definidas con el objeto de abarcar las condiciones más hostiles ante la materialización de un evento (Tabla 16 hasta la Tabla 18).

### Áreas de afectación bola de fuego

Se presenta a continuación, los resultados más críticos de la modelación PHAST para el escenario de Bola de Fuego (Tabla 16) y su respectiva representación cartográfica (Figura 5).

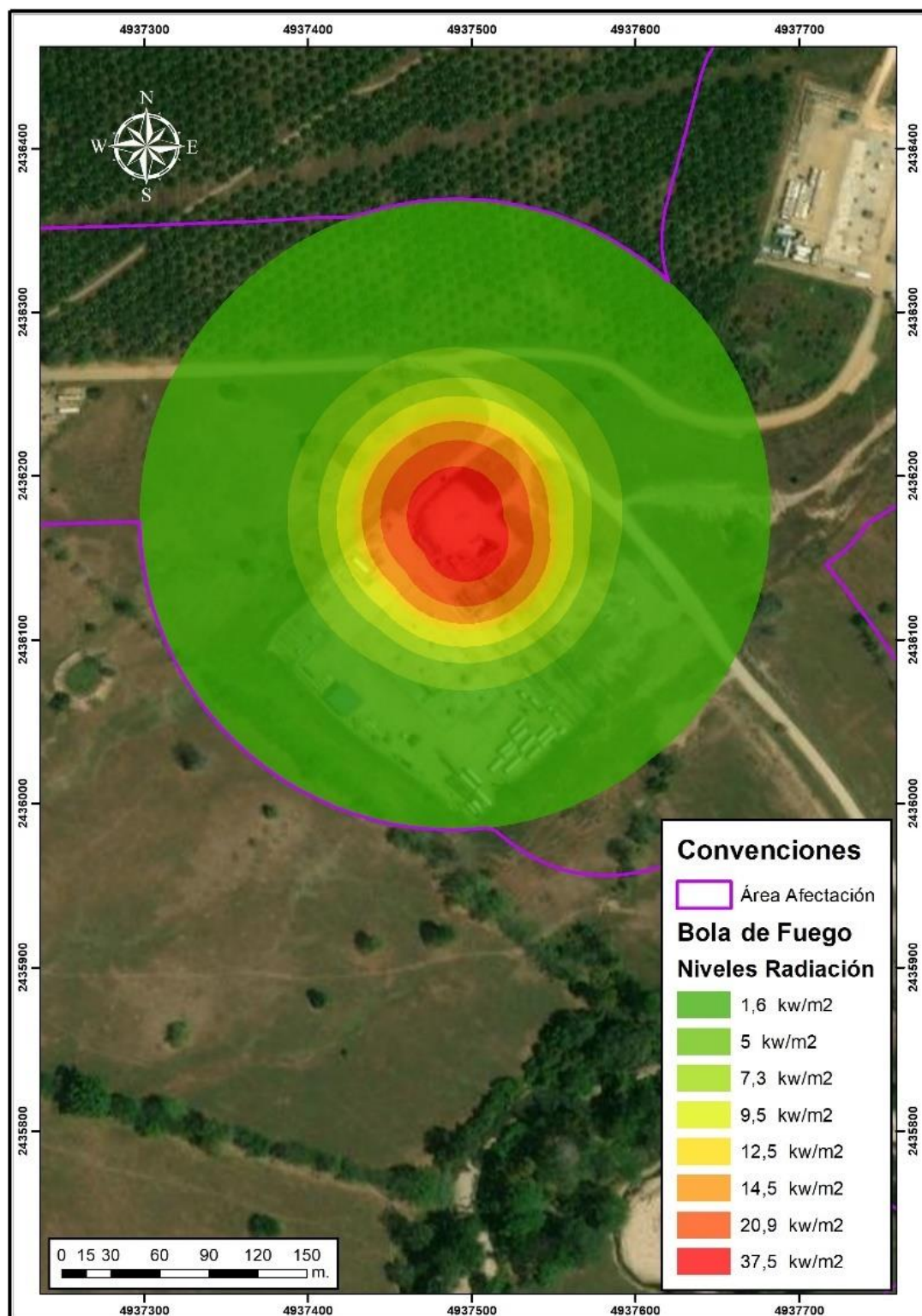
**Tabla 16**

*Distancias de Afectación por Bola de Fuego*

Equipo	Modo de Falla	Nivel de Radiación (kW/m <sup>2</sup> )							
		1,6	5	7,3	9,5	12,5	14,5	20,9	37,5
Módulos de Gas	Fuga Instantánea	191,41	101,08	82,29	71,13	60,81	55,70	44,25	28,19
Unidad descompresora de Gas	Fuga Instantánea	162,02	92,82	76,41	66,40	57,01	52,32	41,71	26,67

*Fuente: Compañía (2021)*

Figura 5

*Área de afectación Bola de fuego*

## Áreas de afectación Chorro de fuego

Se presenta a continuación en la Tabla 17 y en la Figura 6 los resultados críticos obtenidos de la modelación PHAST, entregados por la operadora para el escenario de chorro de fuego.

**Tabla 17**

### *Distancias de Afectación por Chorro de Fuego*

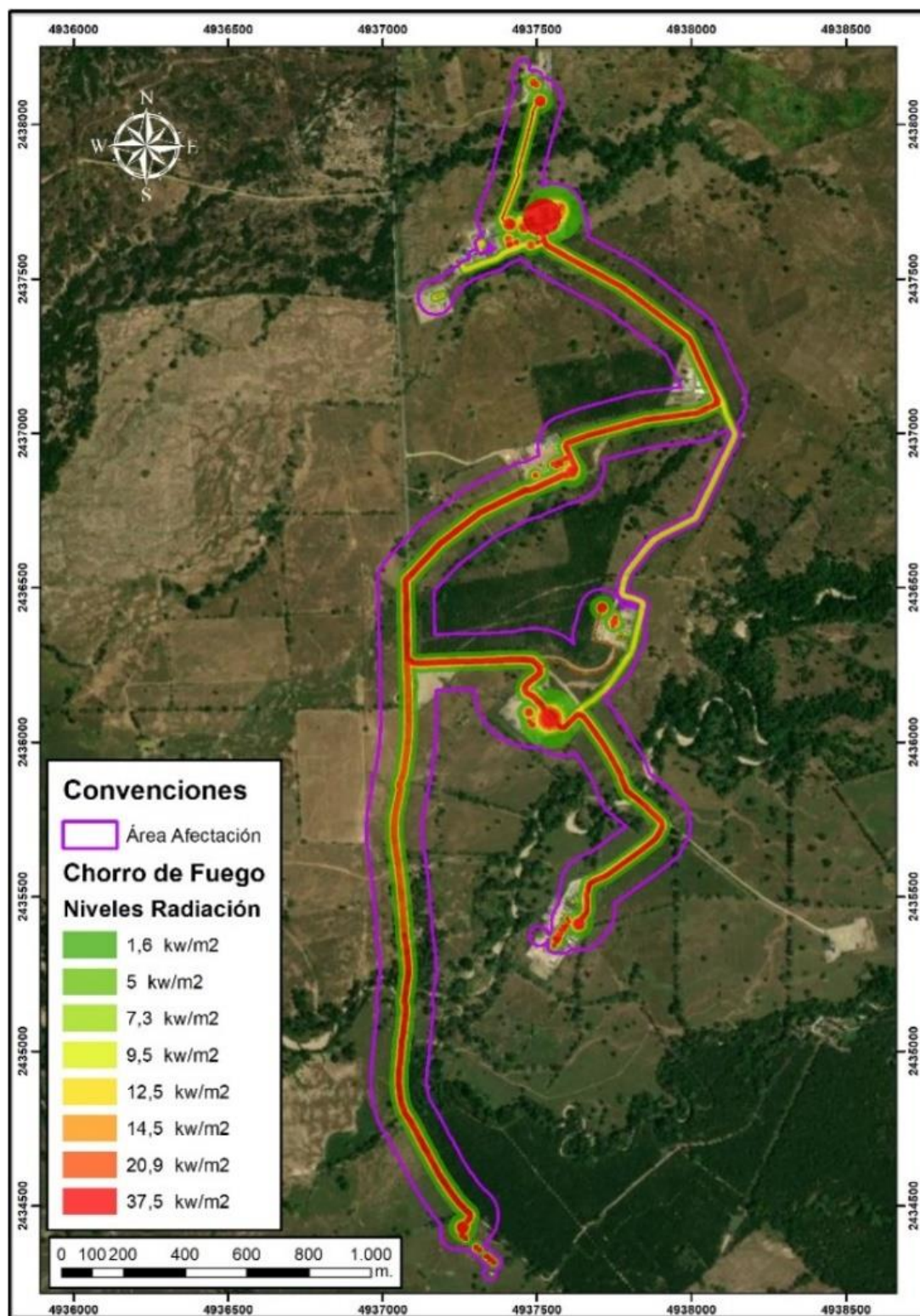
Equipo	Modo de Falla	Nivel de Radiación (kW/m <sup>2</sup> )							
		1,6	5	7,3	9,5	12,5	14,5	20,9	37,5
Pozo 1	Rotura total	30,6	19,5	17,03	15,4	13,6	12,8	11,4	4,99
Pozo 5	Rotura total	23,4	15	13,5	12,6	11,8	11,3	10,2	8,46
Pozo 7	Rotura total	18,4	11,4	10,36	9,73	9,14	8,84	8,15	7,08
Pozo 9	Rotura total	22,3	14,2	12,83	12	11,2	10,8	9,92	8,16
Manifold Crudo CPF 1	Rotura total	46,6	29	26,08	24,3	22,6	21,7	19,5	16,2
Manifold Crudo CPF 2	Rotura total	42,6	26,8	23,96	22,2	20,5	19,6	17,2	14,4
Manifold Crudo CPF 3	Rotura total	43,8	27	24,37	22,8	21,3	20,6	18,9	15,6
Manifold Crudo CPF 4	Rotura total	49,6	31,2	27,02	24,2	21,2	20,3	17,9	8,2
Manifold Crudo CPF 5	Rotura total	44,8	28,3	24,83	22,6	20	18,6	16,7	10,5
Manifold Crudo CPF 6	Rotura total	46	29	25,79	23,8	21,8	20,6	17,6	14,5
Caldera	Rotura total	29,1	17,7	15,96	14,9	13,9	13,3	12	9,5
Bomba P-1	Rotura total	29,2	17,6	16,04	15,1	14,2	13,7	12,7	11,2
Bomba P-2	Rotura total	29,2	17,6	16,04	15,1	14,2	13,7	12,7	11,2
FWKO 3	Rotura total	54,2	34,2	30,29	27,8	25,3	23,8	20,7	58,4
FWKO 4	Rotura total	54,2	34,2	30,29	27,8	25,3	23,8	20,7	58,4
Bomba A	Rotura parcial	27,5	16,4	13,72	12,2	11,1	10,5	8,64	n/a
Bomba B	Rotura parcial	27,5	16,4	13,72	12,2	11,1	10,5	8,64	n/a
Bomba C	Rotura parcial	27,5	16,4	13,72	12,2	11,1	10,5	8,64	n/a
Intercambiador de Calor A	Rotura total	81,9	49,6	41,64	37,3	34	32	26,2	10,6
Intercambiador de Calor B	Rotura total	81,9	49,6	41,64	37,3	34	32	26,2	10,6
Intercambiador de Calor 5	Rotura total	47,7	29,6	25,32	22,3	20,3	19,4	16,6	7,05
Intercambiador de Calor 6	Rotura total	47,7	29,6	25,32	22,3	20,3	19,4	16,6	7,05
Tratador Termo electrostático 1	Rotura total	94,2	53,5	45,66	40,7	35,1	31,4	17,8	n/a
Tratador Electrostático 2	Rotura total	78,6	46,8	38,86	35,2	31,4	29,2	21,8	n/a
Intercambiador de Calor A	Rotura total	68,4	40,8	34,04	30,9	27,8	25,9	20,1	4,55
Intercambiador de Calor B	Rotura total	68,4	40,8	34,04	30,9	27,8	25,9	20,1	4,55
Intercambiador de Calor C	Rotura total	68,4	40,8	34,04	30,9	27,8	25,9	20,1	4,55
Intercambiador de Calor D	Rotura total	68,4	40,8	34,04	30,9	27,8	25,9	20,1	4,55
Bomba 1A	Rotura parcial	45,8	27,8	23,78	21,6	19,3	18	14,1	n/a
Bomba 1B	Rotura parcial	45,8	27,8	23,78	21,6	19,3	18	14,1	n/a
Bomba P8	Rotura parcial	32,7	19,2	15,89	14,3	12,9	12,1	9,42	n/a
Bomba P2	Rotura parcial	32,7	19,2	15,89	14,3	12,9	12,1	9,42	n/a
Compresor Generación A	Rotura total	19,6	11,5	9,89	8,57	6,26	n/a	n/a	n/a
Compresor Generación B	Rotura total	19,6	11,5	9,89	8,57	6,26	n/a	n/a	n/a
Turbogenerador 1	Rotura total	10,9	6,41	5,54	4,88	3,85	n/a	n/a	n/a
Turbogenerador 2	Rotura total	10,9	6,41	5,54	4,88	3,85	n/a	n/a	n/a
Turbogenerador 3	Rotura total	10,9	6,41	5,54	4,88	3,85	n/a	n/a	n/a
Turbogenerador 4	Rotura total	10,9	6,41	5,54	4,88	3,85	n/a	n/a	n/a
Bomba 03	Rotura parcial	43,6	26,6	22,6	20,5	18,5	17,3	14	3,3
Bomba 04	Rotura parcial	43,6	26,6	22,6	20,5	18,5	17,3	14	3,3
Bomba 05	Rotura parcial	43,6	26,6	22,6	20,5	18,5	17,3	14	3,3

Equipo	Modo de Falla	Nivel de Radiación (kW/m <sup>2</sup> )							
		1,6	5	7,3	9,5	12,5	14,5	20,9	37,5
Bomba 06	Rotura parcial	43,6	26,6	22,6	20,5	18,5	17,3	14	3,3
Bomba Cargadero A	Rotura total	14,1	8,92	8,13	7,66	7,21	6,99	6,49	5,78
Bomba Cargadero B	Rotura total	14,1	8,92	8,13	7,66	7,21	6,99	6,49	5,78
Bomba Cargadero C	Rotura total	14,1	8,92	8,13	7,66	7,21	6,99	6,49	5,78
Brazo de Cargue 1	Rotura total	16,7	10	8,59	7,45	6	5,52	n/a	n/a
Brazo de Cargue 2	Rotura total	16,7	10	8,59	7,45	6	5,52	n/a	n/a
Brazo de Cargue 3	Rotura total	16,7	10	8,59	7,45	6	5,52	n/a	n/a
Brazo de Cargue 4	Rotura total	16,7	10	8,59	7,45	6	5,52	n/a	n/a
Brazo de Cargue 5	Rotura total	16,7	10	8,59	7,45	6	5,52	n/a	n/a
Brazo de Cargue 6	Rotura total	16,7	10	8,59	7,45	6	5,52	n/a	n/a
TEA	Descarga máxima eventual con expulsión de líquido	4,35	2,57	2,23	1,97	1,53	n/a	n/a	n/a
Scrubber A	Fuga de todo el contenido	31,1	18,2	15,61	13,5	9,91	n/a	n/a	n/a
Scrubber B	Fuga de todo el contenido	31,1	18,2	15,61	13,5	9,91	n/a	n/a	n/a
Scrubber C	Fuga de todo el contenido	31,1	18,2	15,61	13,5	9,91	n/a	n/a	n/a
Separador 01	Fuga de todo el contenido	10,2	6,04	5,16	4,35	n/a	n/a	n/a	n/a
Separador 02	Fuga de todo el contenido	10,2	6,04	5,16	4,35	n/a	n/a	n/a	n/a
KO Drum	Fuga de todo el contenido	47,4	27,7	23,72	20,6	15,7	10,8	n/a	n/a

Fuente: Compañía (2021)

Figura 6

Área de afectación por chorro de fuego



## Áreas de afectación incendio de piscina

Los resultados obtenidos de la modelación PHAST para el escenario más crítico de incendio de piscina se presentan en la Tabla 18 así como en la Figura 7.

**Tabla 18**

*Distancias de Afectación por Incendio de Piscina*

Equipo	Modo de Falla	Nivel de Radiación (kW/m <sup>2</sup> )							
		1,6	5	7,3	9,5	12,5	14,5	20,9	37,5
Pozo 1	Rotura total	22,8	13,6	11,5	10,4	9,32	8,73	7,14	3,75
Pozo 5	Rotura total	22,8	13,6	11,5	10,4	9,32	8,73	7,14	3,75
Pozo 7	Rotura total	22,8	13,6	11,5	10,4	9,32	8,73	7,14	3,75
Pozo 9	Rotura total	22,8	13,6	11,5	10,4	9,32	8,73	7,14	3,75
Manifold Crudo CPF 1	Rotura total	31,8	18,8	16	14,4	12,8	11,8	9,14	4,76
Manifold Crudo CPF 2	Rotura total	31,8	18,8	16	14,4	12,8	11,8	9,14	4,76
Manifold Crudo CPF 3	Rotura total	31,8	18,8	16	14,4	12,8	11,8	9,14	4,76
Manifold Crudo CPF 4	Rotura total	28,1	16,6	14,2	12,8	11,4	10,6	8,46	4,37
Manifold Crudo CPF 5	Rotura parcial	38	15	19,1	10,9	14,9	8,42	6,33	5,13
Manifold Crudo CPF 6	Rotura total	28,1	16,6	14,2	12,8	11,4	10,6	8,46	4,37
Caldera	Rotura total	23,7	14,1	12	10,8	9,67	9,05	7,38	3,87
Bomba P-1	Rotura total	23,7	14,1	12	10,8	9,67	9,05	7,38	3,87
Bomba P-2	Rotura total	23,7	14,1	12	10,8	9,67	9,05	7,38	3,87
FWKO 3	Rotura total	84,8	46,5	34	25,7	19,4	17,2	17,2	n/a
FWKO 4	Rotura total	84,8	46,5	34	25,7	19,4	17,2	17,2	n/a
Bomba A	Rotura total	84,8	46,5	34	25,7	19,4	17,2	17,2	n/a
Bomba B	Rotura total	84,8	46,5	34	25,7	19,4	17,2	17,2	n/a
Bomba C	Rotura total	84,8	46,5	34	25,7	19,4	17,2	17,2	n/a
Intercambiador de Calor A	Rotura total	75,6	42,4	32	24,3	18,2	15,5	14,3	n/a
Intercambiador de Calor B	Rotura total	75,6	42,4	32	24,3	18,2	15,5	14,3	n/a
Intercambiador de Calor 5	Rotura total	75,6	42,4	32	24,3	18,2	15,5	14,3	n/a
Intercambiador de Calor 6	Rotura total	75,6	42,4	32	24,3	18,2	15,5	14,3	n/a
Tratador Termo electrostático 1	Rotura total	91,5	49,7	35,8	27,1	20,7	19,2	19,2	n/a
Intercambiador de Calor A	Rotura total	75,6	42,4	32	24,3	18,2	15,5	14,3	n/a
Intercambiador de Calor B	Rotura total	75,6	42,4	32	24,3	18,2	15,5	14,3	n/a
Intercambiador de Calor C	Rotura total	75,6	42,4	32	24,3	18,2	15,5	14,3	n/a
Intercambiador de Calor D	Rotura total	75,6	42,4	32	24,3	18,2	15,5	14,3	n/a
Bomba 1A	Rotura total	43,8	25,7	21,9	19,4	16,7	15,2	10,5	5,28
Bomba 1B	Rotura total	43,8	25,7	21,9	19,4	16,7	15,2	10,5	5,28
Bomba P8	Rotura total	54,1	31,8	26,5	22,8	18,4	15,7	10,5	7,32
Bomba P2	Rotura total	54,1	31,8	26,5	22,8	18,4	15,7	10,5	7,32
Bomba Generación C	Rotura total	8,7	5,29	4,55	4,08	3,69	3,5	2,99	1,66
Bomba Generación P	Rotura total	8,7	5,29	4,55	4,08	3,69	3,5	2,99	1,66
Generador Back Up 1	Rotura total	26,8	15,9	13,5	12,2	10,9	10,2	8,21	4,2
Generador Back Up 2	Rotura total	26,8	15,9	13,5	12,2	10,9	10,2	8,21	4,2
Bomba 03	Rotura total	35	20,5	17,6	15,8	13,9	12,8	9,66	4,93
Bomba 04	Rotura total	35	20,5	17,6	15,8	13,9	12,8	9,66	4,93
Bomba 05	Rotura total	35	20,5	17,6	15,8	13,9	12,8	9,66	4,93
Bomba 06	Rotura total	35	20,5	17,6	15,8	13,9	12,8	9,66	4,93
Bomba Cargadero A	Rotura total	33,3	19,6	16,8	15	13,3	12,3	9,39	4,81

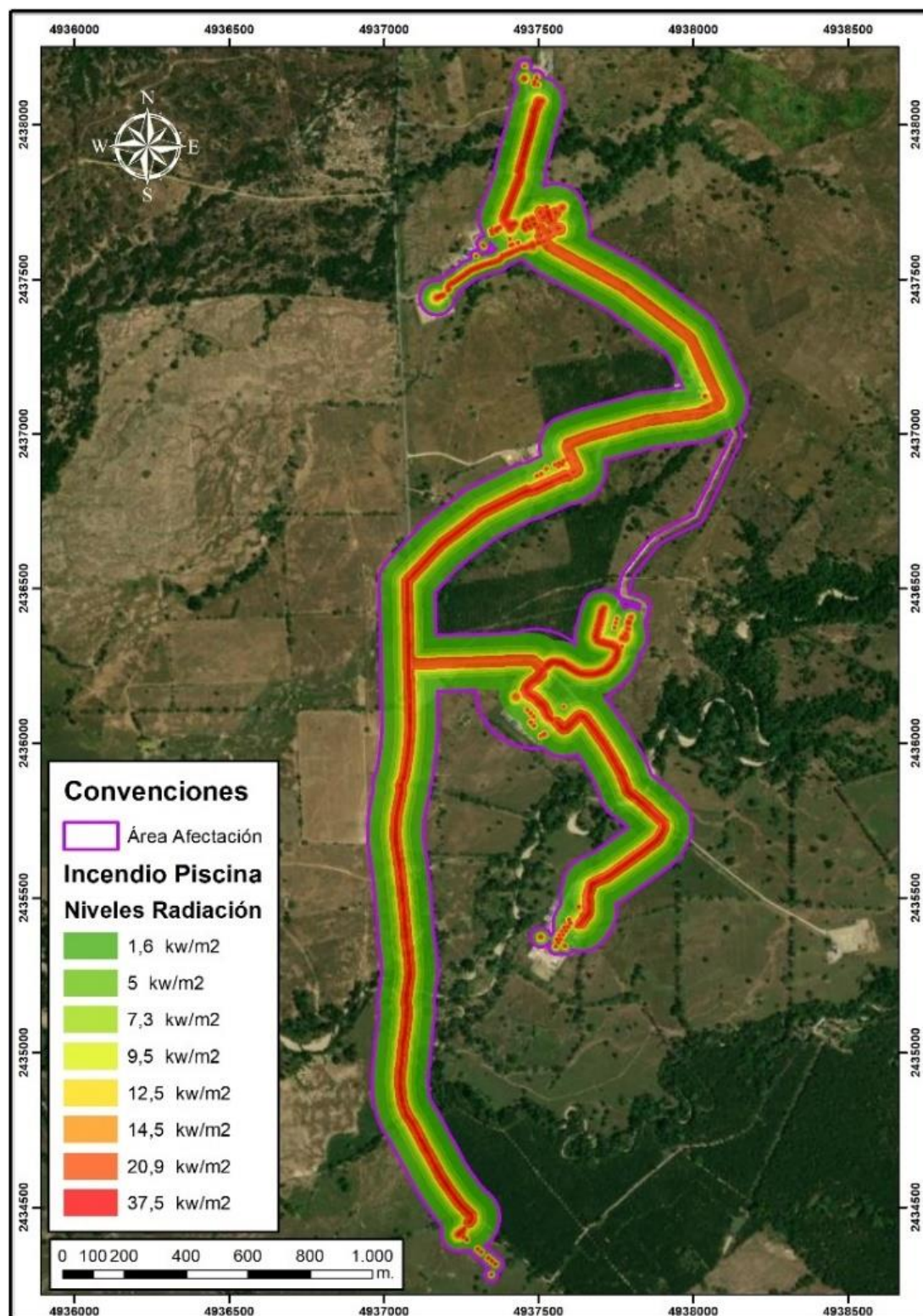


Equipo	Modo de Falla	Nivel de Radiación (kW/m <sup>2</sup> )							
		1,6	5	7,3	9,5	12,5	14,5	20,9	37,5
Bomba Cargadero B	Rotura total	33,3	19,6	16,8	15	13,3	12,3	9,39	4,81
Bomba Cargadero C	Rotura total	33,3	19,6	16,8	15	13,3	12,3	9,39	4,81
Brazo de Cargue 1	Rotura total	33,3	19,6	16,8	15	13,3	12,3	9,39	4,81
Brazo de Cargue 2	Rotura total	33,3	19,6	16,8	15	13,3	12,3	9,39	4,81
Brazo de Cargue 3	Rotura total	33,3	19,6	16,8	15	13,3	12,3	9,39	4,81
Brazo de Cargue 4	Rotura total	33,3	19,6	16,8	15	13,3	12,3	9,39	4,81
Brazo de Cargue 5	Rotura total	33,3	19,6	16,8	15	13,3	12,3	9,39	4,81
Brazo de Cargue 6	Rotura total	33,3	19,6	16,8	15	13,3	12,3	9,39	4,81
TEA	Descarga máxima eventual con expulsión de líquido	21	12,6	10,7	9,64	8,63	8,09	6,66	3,56
Separador 01	Fuga continua de todo el contenido	57,3	33,3	27,3	23	17,7	15,1	9,95	6,73
Separador 02	Fuga continua de todo el contenido	57,3	33,3	27,3	23	17,7	15,1	9,95	6,73
TK Diesel 1	Fuga continua de todo el contenido	29,6	17,5	14,9	13,5	12	11,1	8,78	4,42
TK Diesel 2	Fuga continua de todo el contenido	29,6	17,5	14,9	13,5	12	11,1	8,78	4,42
Tanque de Almacenamiento 1	Fuga de todo el contenido	68,9	39,4	30,8	23,8	17,7	15	12,1	n/a
Tanque de Almacenamiento 2	Fuga de todo el contenido	68,9	39,4	30,8	23,8	17,7	15	12,1	n/a
Tanque de Almacenamiento 3	Fuga de todo el contenido	68,9	39,4	30,8	23,8	17,7	15	12,1	n/a
Tanque de Almacenamiento 4	Fuga de todo el contenido	68,9	39,4	30,8	23,8	17,7	15	12,1	n/a
Tanque de Almacenamiento A	Fuga de todo el contenido	98,6	53,2	38,2	29	22,4	21,3	21,3	n/a
Tanque de Almacenamiento B	Fuga de todo el contenido	98,6	53,2	38,2	29	22,4	21,3	21,3	n/a
Tanque de Almacenamiento C	Fuga de todo el contenido	98,6	53,2	38,2	29	22,4	21,3	21,3	n/a
Tanque Diésel Vertical	Fuga de todo el contenido	39,1	23,5	20,3	18,1	15,9	14,5	9,98	5,6
Carrotanque	Fuga de todo el contenido	55,58	32,39	26,72	22,69	17,72	15,08	10,07	6,35

Fuente: Compañía (2021)

Figura 7

Área de afectación por incendio de piscina



## **Análisis de vulnerabilidad**

De acuerdo a la metodología planteada en este documento, donde se considera la integralidad del ambiente a partir de la caracterización del componente biótico y abiótico para entender y generar una mayor aproximación a la zonificación de la vulnerabilidad. Se realizaron las calificaciones a cada uno de los componentes identificados y que se presentan en la Tabla 19 y Tabla 20 para las áreas de consecuencias para los eventos finales de chorro de fuego, bola de fuego e incendio de piscina.

### **Tabla 19**

*Variables utilizadas del componente abiótico para el análisis de vulnerabilidad*

<b>Variable</b>
Conflicto Uso Suelo
Pendientes
Geomorfología
Paisaje

### **Tabla 20**

*Variables utilizadas del componente biótico para el análisis de vulnerabilidad*

<b>Variable</b>
Cobertura Tierra
Especies Amenazadas

De acuerdo a lo anterior, se relacionan los resultados de las calificaciones de vulnerabilidad parcial de cada variable y componente, así como su representación gráfica tanto para los resultados parciales como para la vulnerabilidad total. Los resultados presentados a continuación pueden visualizarse con mayor detalle en el **Anexo 2 Resultados**.

A continuación, se hace referencia a los niveles de vulnerabilidad parcial obtenidos para el área de probable afectación para los factores abióticos correspondientes a conflicto uso del suelo, pendientes, geomorfología y paisaje.

#### ***Conflicto uso del suelo***

La definición de la vulnerabilidad por conflicto de uso del suelo se clasificó con vulnerabilidad muy baja las tierras sin conflicto de uso o uso adecuado, con vulnerabilidad baja los suelos con

subutilización ligera, con vulnerabilidad media, los suelos con subutilización moderada, con vulnerabilidad muy alta suelos con sobreutilización severa. Los cuerpos de agua naturales no aplican para la valoración de conflicto de uso del suelo, lo anterior se puede evidenciar en la Tabla 21 y la Figura 8.

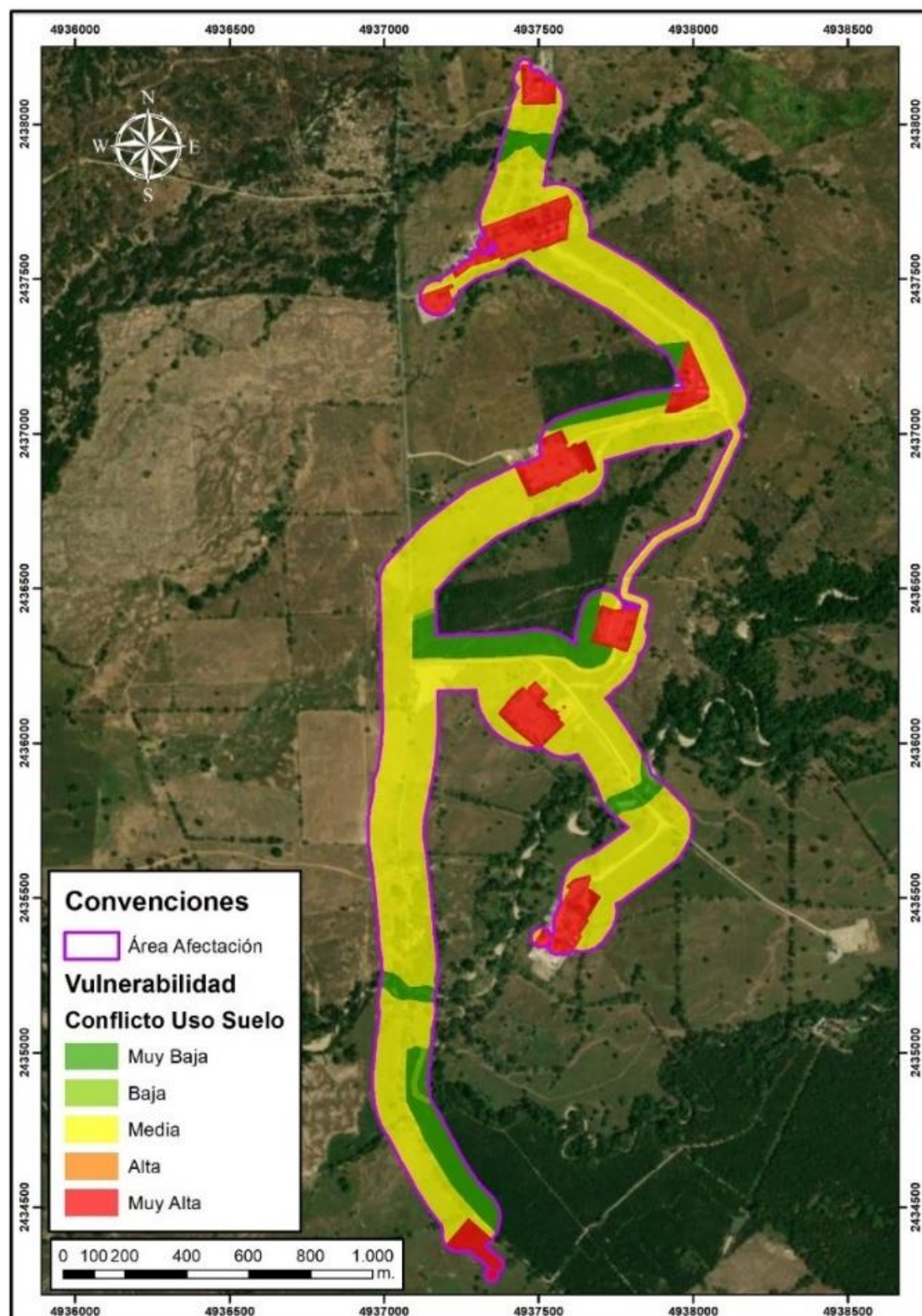
**Tabla 21**

*Clasificación de vulnerabilidad parcial por conflicto de uso del suelo para el área de estudio*

<b>Vulnerabilidad</b>	<b>Área</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Muy alta</b>	<b>19,03</b>	14,30%
Suelos con sobreutilización severa (O3)	19,03	14,30%
<b>Media</b>	<b>96,79</b>	72,71%
Suelos con subutilización moderada (S2)	88,94	66,82%
Suelos con subutilización severa (S3)	7,85	5,89%
<b>Baja</b>	<b>0,55</b>	0,41%
Suelos con subutilización ligera (S1)	0,55	0,41%
<b>Muy baja</b>	<b>12,61</b>	9,47%
Tierras sin conflicto de uso o uso adecuado (A)	12,61	9,47%
<b>N/A</b>	<b>4,13</b>	3,11%
Cuerpos de agua naturales (CAN)	4,13	3,11%
<b>Total</b>	<b>133,11</b>	100,00%

Figura 8

*Vulnerabilidad parcial por conflicto de uso del suelo*



### ***Pendientes***

Con relación a la vulnerabilidad parcial por pendientes para el área de afectación probable, se clasificó con vulnerabilidad media las pendientes moderadamente inclinadas con vulnerabilidad baja las pendientes ligeramente inclinadas y con vulnerabilidad muy baja las pendientes ligeramente planas y a nivel como se presentan en la Tabla 22 y la Figura 9.

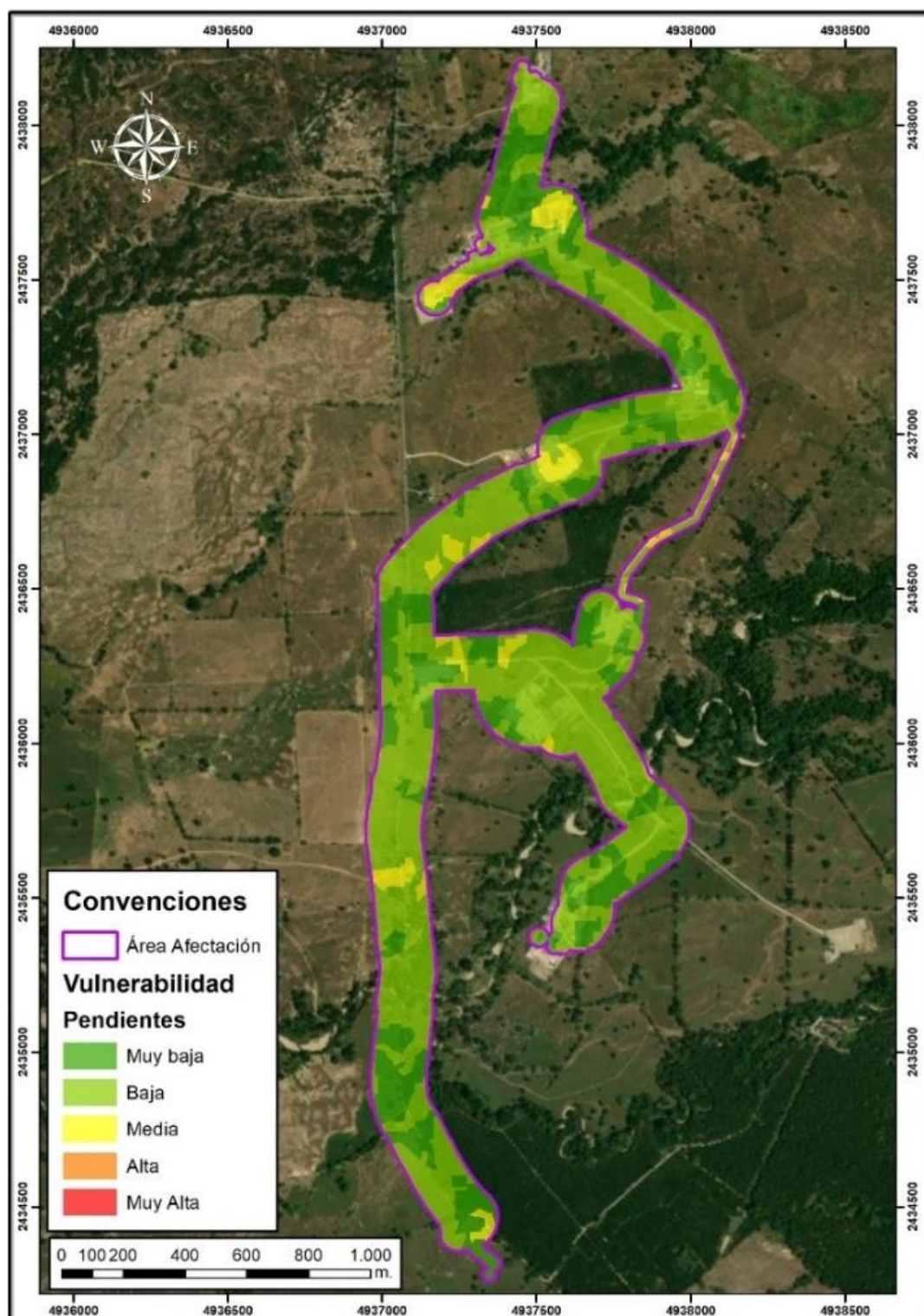
**Tabla 22**

*Clasificación de vulnerabilidad parcial por pendientes para el área de estudio*

<b>Vulnerabilidad</b>	<b>Área ha</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Media</b>	<b>5,34</b>	<b>4,01%</b>
Moderadamente inclinada (7-12%)	5,34	4,01%
<b>Baja</b>	<b>90,30</b>	<b>67,84%</b>
Ligeramente inclinada (3-7%)	90,30	67,84%
<b>Muy baja</b>	<b>37,47</b>	<b>28,15%</b>
A nivel (0-1%)	4,92	3,70%
Ligeramente plana (1-3%)	32,55	24,45%
<b>Total</b>	<b>133,11</b>	<b>100%</b>

Figura 9

*Vulnerabilidad parcial por pendientes*



### **Geomorfología**

En cuanto a la vulnerabilidad parcial de las subunidades geomorfológicas, se determinó una categoría baja para la geoforma relacionada con el abanico disectado y las barras, y un nivel de vulnerabilidad muy baja para las planicies o llanuras aluviales. En esta clasificación no se consideró el lecho actual del río puesto que no se relaciona una eventual susceptibilidad a esta geoforma por fenómenos asociados a radiación, los resultados mencionados se detallan en la Tabla 23 y la Figura 10.

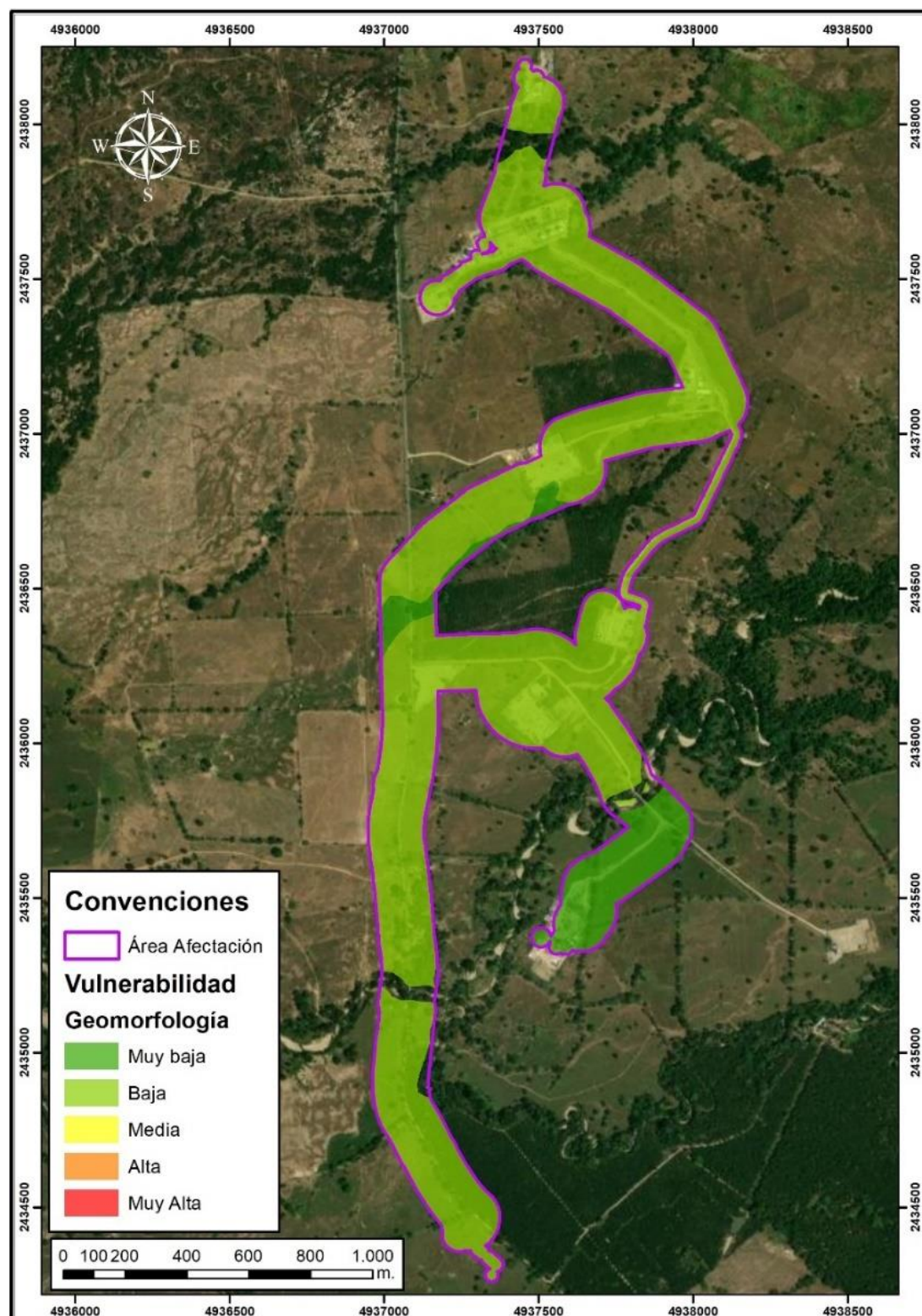
**Tabla 23**

*Clasificación de vulnerabilidad parcial por geomorfología para el área de estudio*

<b>Vulnerabilidad</b>	<b>Área ha</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Baja</b>	<b>114,31</b>	<b>85,88%</b>
Abanico Disectado	114,14	85,75%
Barras	0,17	0,13%
<b>Muy baja</b>	<b>14,84</b>	<b>11,15%</b>
Planicies o Llanuras Aluviales	14,84	11,15%
<b>N/A</b>	<b>3,96</b>	<b>2,97%</b>
Cauce o Lecho Actual	3,96	2,97%
<b>Total</b>	<b>133,11</b>	<b>100%</b>



Figura 10

*Vulnerabilidad parcial por geomorfología*

### *Paisaje*

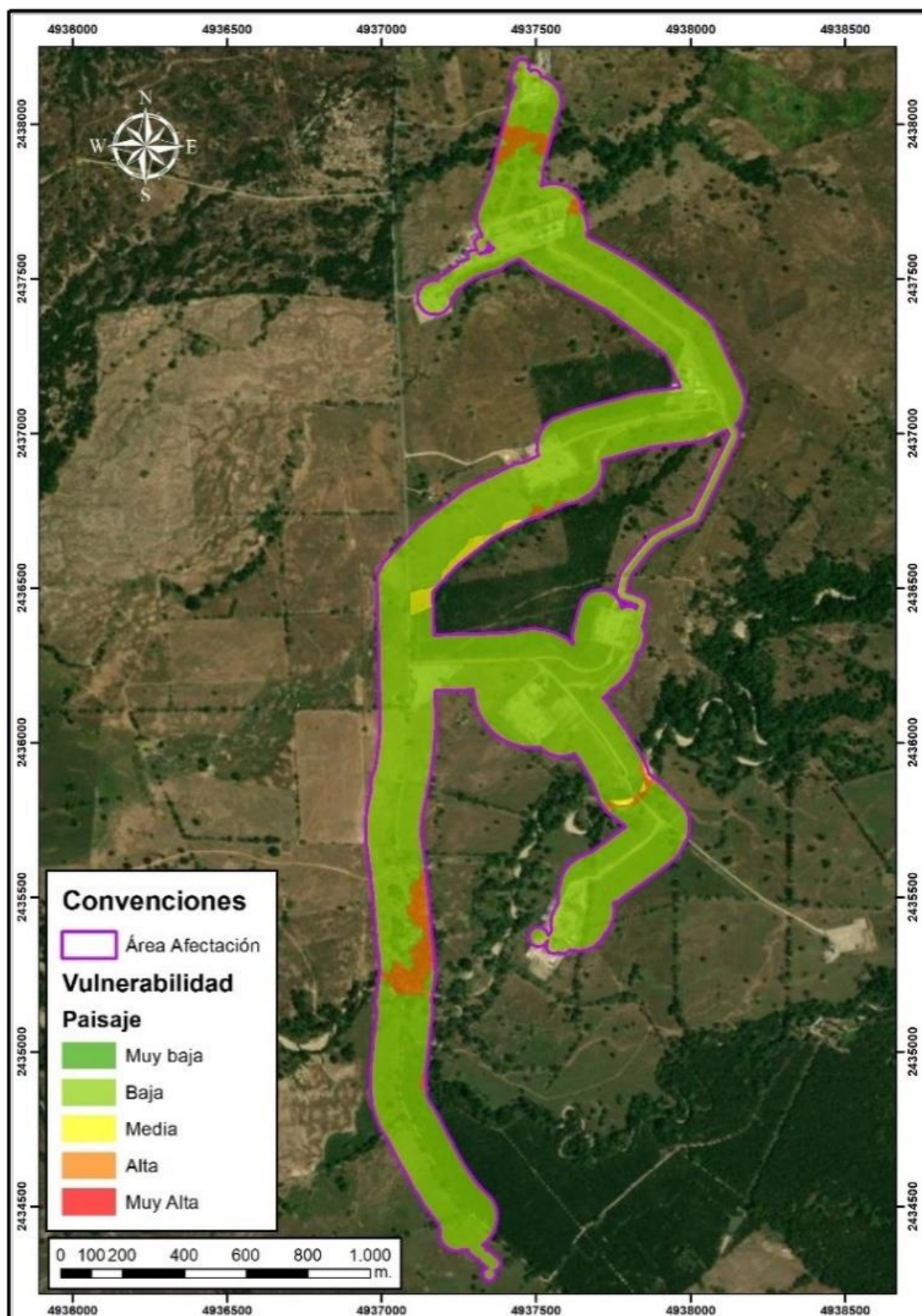
Para el presente estudio los paisajes de categoría “*indistinto – deteriorado*”, se clasificaron con una vulnerabilidad parcial baja, con una vulnerabilidad media los paisajes de categoría “*común o típico*” y con una categoría alta los paisajes de categoría “*distinto o singular*” como se presenta en la Tabla 24 y la Figura 11.

**Tabla 24**

*Clasificación de vulnerabilidad parcial por paisaje para el área de estudio*

<b>Vulnerabilidad</b>	<b>Área ha</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Alta</b>	<b>5,10</b>	<b>3,83%</b>
Distinto o Singular	5,10	3,83%
<b>Media</b>	<b>110,14</b>	<b>82,75%</b>
Común o Típico	108,98	81,87%
<b>Baja</b>	<b>19,03</b>	<b>14,30%</b>
Indistinto- Deteriorado	19,03	14,30%
<b>Total</b>	<b>133,11</b>	<b>100%</b>

Figura 11

*Vulnerabilidad parcial por paisaje*

A continuación, se hace referencia a los niveles de vulnerabilidad parcial obtenidos para el área de probable afectación para los factores bióticos correspondientes a coberturas y especies amenazadas identificadas dentro del área de consecuencias para los escenarios de incendio de piscina, bola de fuego y chorro de fuego.

### ***Coberturas***

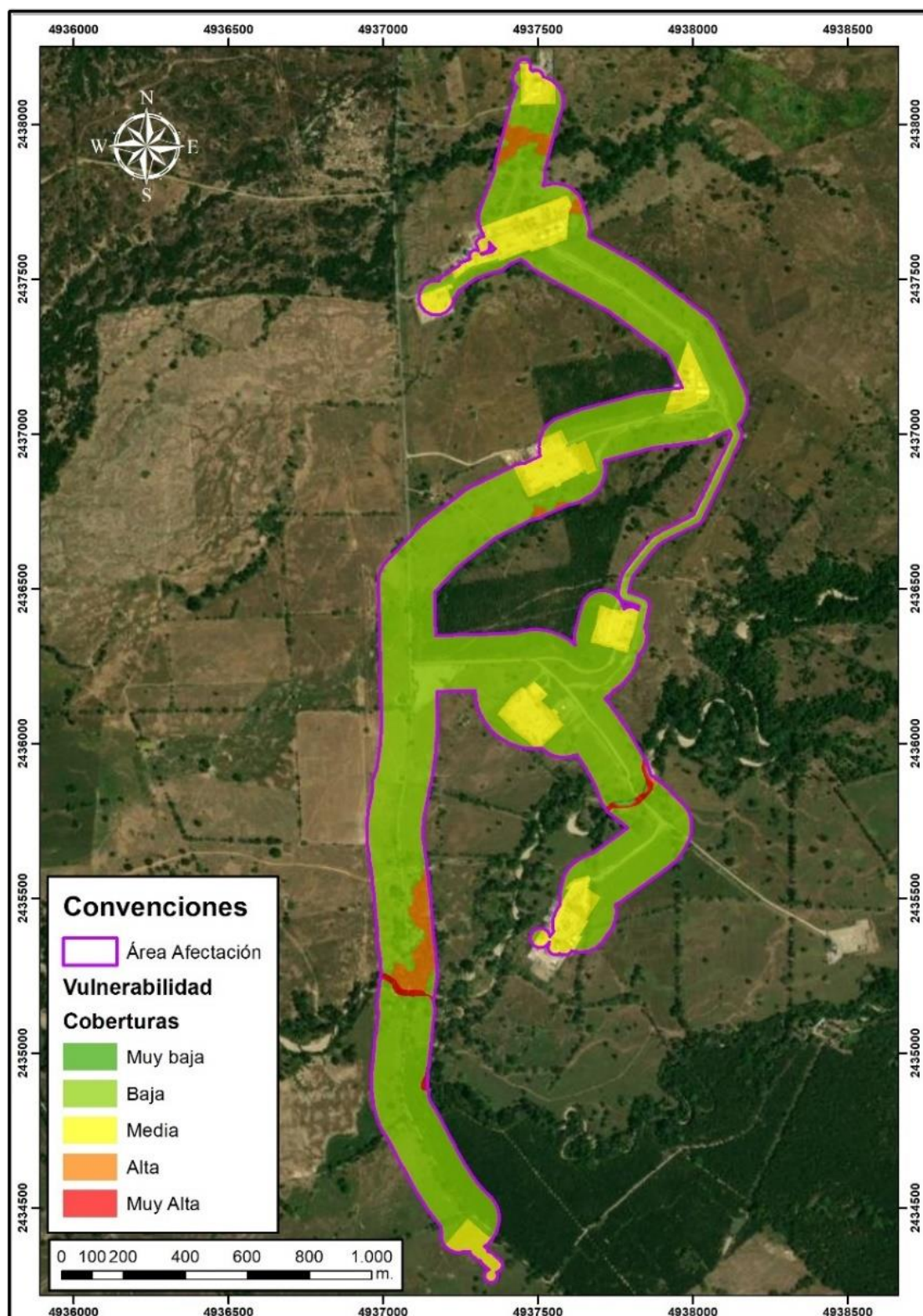
Para el área de probable afectación, los ríos (50 m), se clasificaron con una categoría de vulnerabilidad parcial muy alta, los bosques de galería y/o ripario con un nivel de vulnerabilidad alta, los cuerpos de agua artificiales y las áreas de explotación de hidrocarburos con un nivel de vulnerabilidad parcial media, los cultivos de palma de aceite, los pastos limpios y los pastos arbolados presentan una clasificación de vulnerabilidad baja, finalmente los arenales presentan una clasificación de vulnerabilidad muy baja, lo anterior se evidencia de manera detallada en la Tabla 25 y Figura 12.

**Tabla 25**

*Clasificación de vulnerabilidad parcial por coberturas para el área de estudio*

<b>Vulnerabilidad</b>	<b>Área ha</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Muy alta</b>	<b>0,86</b>	<b>0,65</b>
Ríos (50 m)	0,86	0,65
<b>Alta</b>	<b>4,07</b>	<b>3,05</b>
Bosque de galería y/o ripario	4,07	3,05
<b>Media</b>	<b>19,05</b>	<b>14,31</b>
Cuerpos de agua artificiales	0,03	0,02
Explotación de hidrocarburos	19,03	14,30
<b>Baja</b>	<b>108,95</b>	<b>81,85</b>
Palma de aceite	13,44	10,10
Pastos arbolados	1,27	0,96
Pastos limpios	94,23	70,79
<b>Muy baja</b>	<b>0,17</b>	<b>0,13</b>
Arenales	0,17	0,13
<b>Total</b>	<b>133,11</b>	<b>100,00</b>

Figura 12

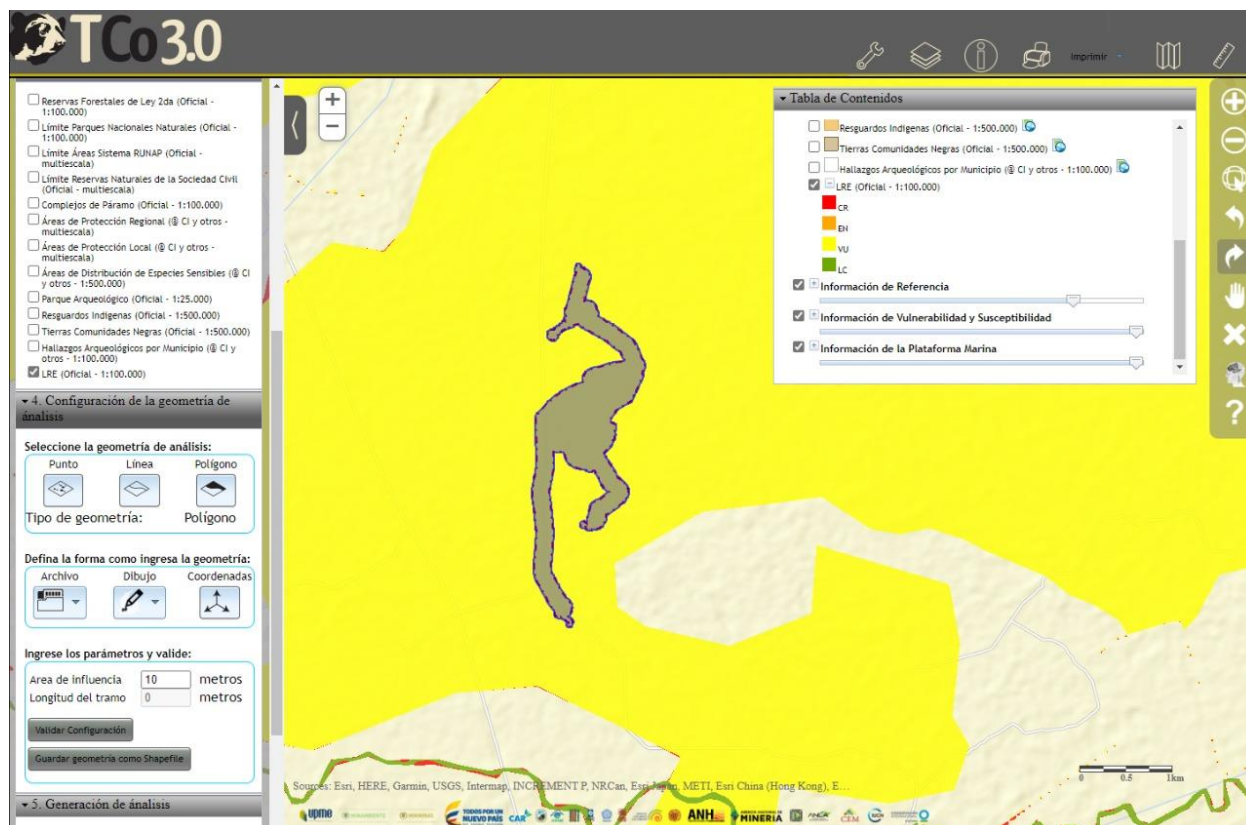
*Vulnerabilidad parcial por coberturas*

## Especies amenazadas

Para la verificación de especies sensibles y amenazadas se realizó la consulta en la página de Tremarctos (Tremarctoscolombia.org, 2022) donde se logra identificar que, para el área de afectación definida, se identifica la presencia de especies amenazadas con categoría Vulnerable como se muestra en la Figura 13, en la Figura 14 y la Tabla 26.

**Figura 13**

*Especies amenazadas categoría vulnerable*



Fuente: (Tremarctoscolombia.org, 2022)

Figura 14

*Vulnerabilidad por especies amenazadas*

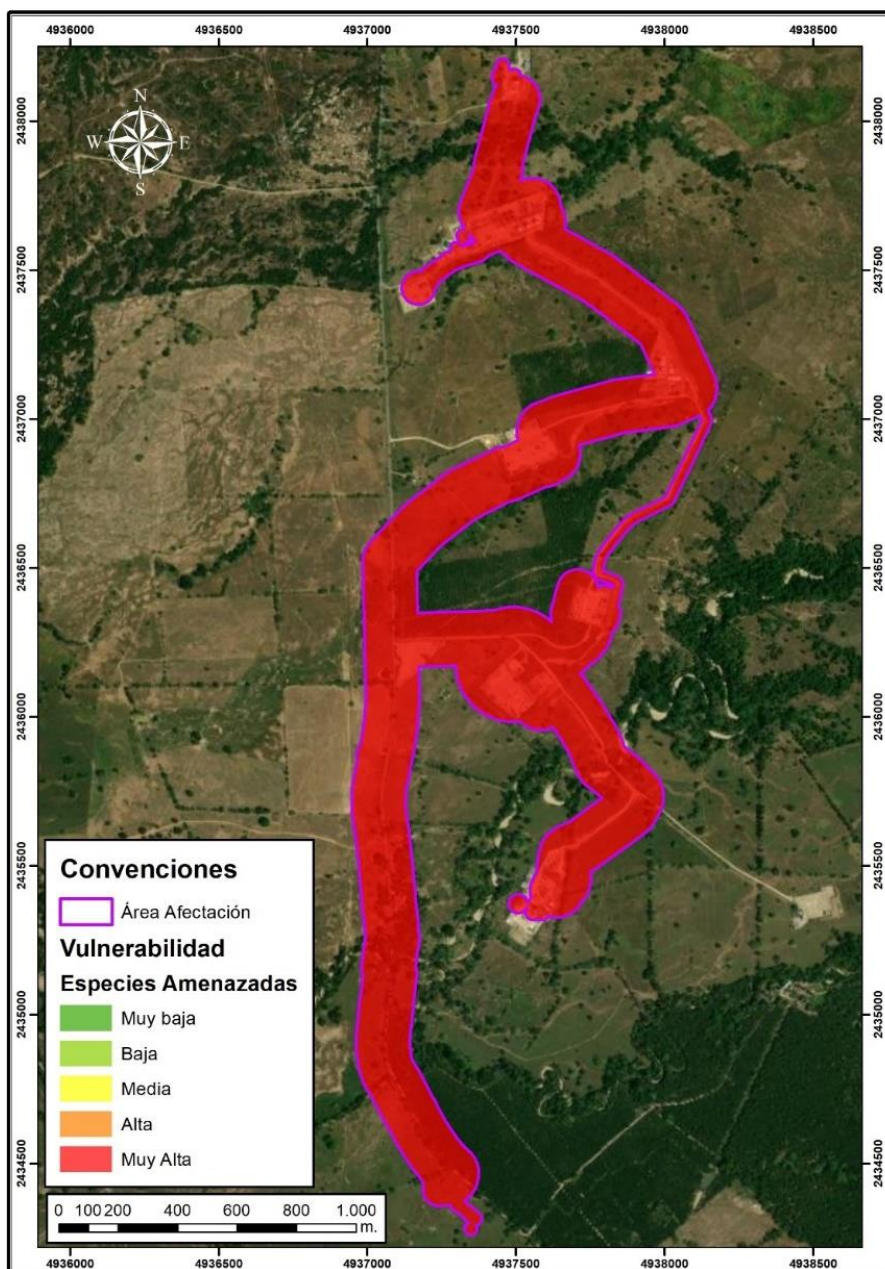


Tabla 26

*Vulnerabilidad especies amenazadas*

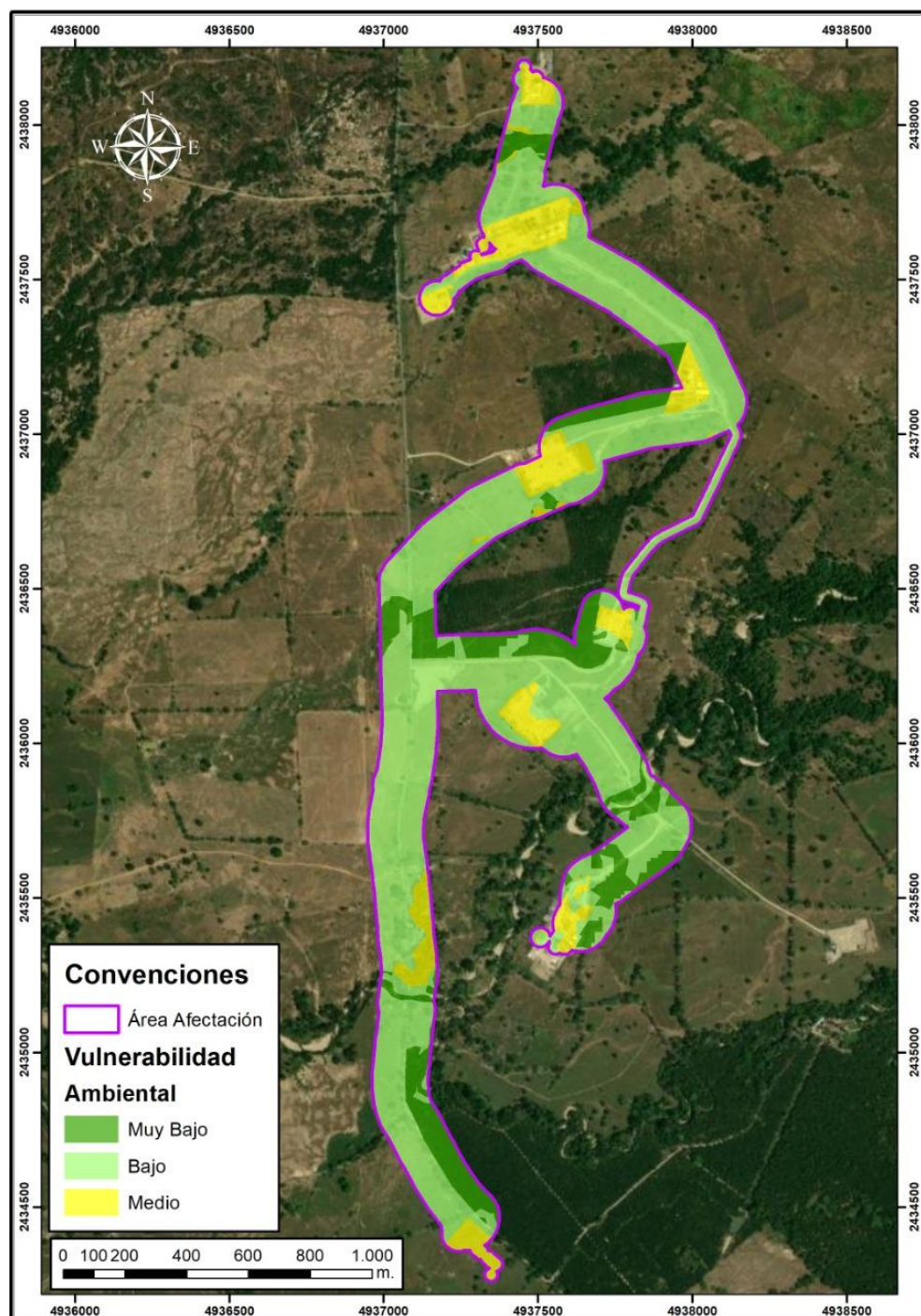
Categoría	Área (ha)	Porcentaje
Alta	133,10	100
<b>Total general</b>		<b>100</b>

Fuente: (Tremarctoscolombia.org, 2022)

Para la obtención de la vulnerabilidad total, a partir del promedio de las cinco vulnerabilidades parciales se presenta a continuación en la Figura 15 los resultados obtenidos.

**Figura 15**

*Vulnerabilidad Ambiental Total*





## Determinación del riesgo ambiental

Aplicando la Ecuación 4, propuesta por los presentes autores para la determinación del riesgo ambiental, se procedió a integrar la información con los criterios calificados para las condiciones críticas de acuerdo a las consecuencias obtenidas a partir de la modelación PHAST, en ese sentido, se establecieron condiciones del evento iniciador la rotura total cuyos resultados establecen las áreas con mayor extensión para cada suceso final en cada equipo e infraestructura analizada. Los resultados de riesgo ambiental pueden visualizarse con mayor detalle en el **Anexo 2 Resultados**.

## Riesgo Bola de Fuego

De acuerdo al uso de la herramienta SIG para calcular el riesgo ambiental conforme a la Ecuación 4, la cantidad de resultados obtenidos para los dos equipos identificados para el suceso final de bola de fuego arroja un total de 533 atributos (Figura 16) que se toman como base para definir los rangos asociados a niveles de riesgo con categorías bajo y medio como se presenta en la Figura 16 y Tabla 27 y su resultado cartográfico representado en la Figura 17.

### Figura 16

*Atributos asociados al cálculo de riesgo ambiental bola de fuego*

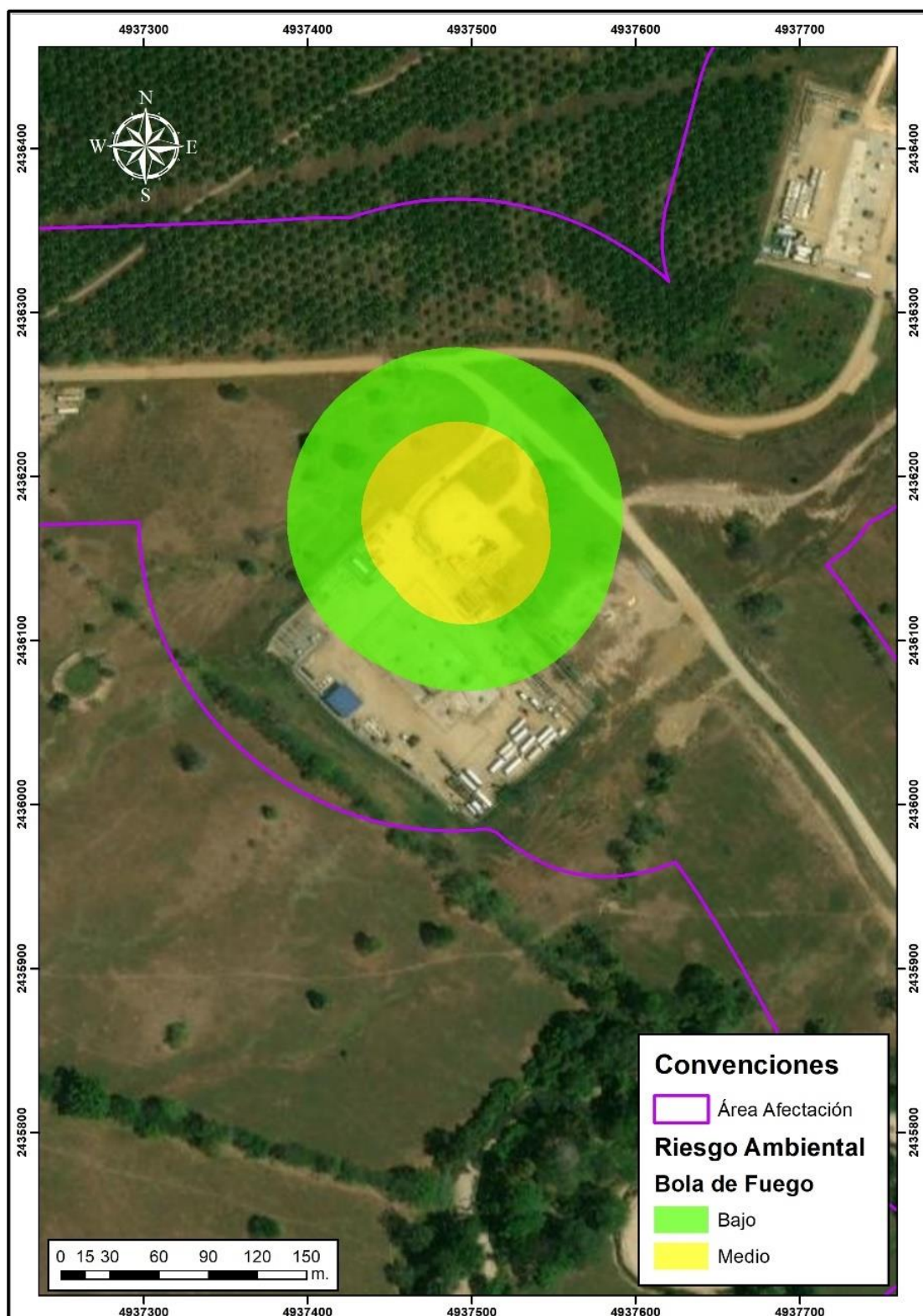
FID	Shape	FID Bola F	Equipo	Sustancia	Ubicación	Suceso	BUFF DIST	Nivel	P1	Call sus	Vulnerabil	P2	Ries Equip	Riesgo Amb	Area	Ries Amb2
30	Polygon	2	Unidad descompresora de Gas	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	57,01	12,5	0	2,5	Bajo	0,42	0	0,000012	0,006076	Bajo
31	Polygon	16	Modulo de Gas 2	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	71,1319	9,5	0	2,5	Bajo	0,42	0	0,000014	0,006076	Bajo
32	Polygon	0	Modulo de Gas 1	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	82,2985	7,3	0	2,666667	Bajo	0,17	0	0,000006	0,000021	Bajo
33	Polygon	2	Unidad descompresora de Gas	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	57,01	12,5	0	2,666667	Bajo	0,42	0	0,000012	0,000021	Bajo
34	Polygon	16	Modulo de Gas 2	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	71,1319	9,5	0	2,666667	Bajo	0,42	0	0,000014	0,000021	Bajo
35	Polygon	0	Modulo de Gas 1	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	82,2985	7,3	0	2,5	Bajo	0,17	0	0,000006	0,003593	Bajo
36	Polygon	2	Unidad descompresora de Gas	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	57,01	12,5	0	2,5	Bajo	0,42	0	0,000012	0,003593	Bajo
37	Polygon	20	Modulo de Gas 2	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	82,2985	7,3	0	2,5	Bajo	0,17	0	0,000006	0,003593	Bajo
38	Polygon	0	Modulo de Gas 1	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	82,2985	7,3	0	2,666667	Bajo	0,17	0	0,000006	0,000816	Bajo
39	Polygon	2	Unidad descompresora de Gas	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	57,01	12,5	0	2,666667	Bajo	0,42	0	0,000012	0,000816	Bajo
40	Polygon	20	Modulo de Gas 2	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	82,2985	7,3	0	2,666667	Bajo	0,17	0	0,000006	0,000816	Bajo
41	Polygon	0	Modulo de Gas 1	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	82,2985	7,3	0	2,666667	Bajo	0,17	0	0,000006	0,009761	Bajo
42	Polygon	10	Modulo de Gas 2	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	101,081	5	0	2,666667	Bajo	0,17	0	0,000005	0,009761	Bajo
43	Polygon	21	Unidad descompresora de Gas	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	76,414	7,3	0	2,666667	Bajo	0,17	0	0,000006	0,009761	Bajo
44	Polygon	0	Modulo de Gas 1	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	82,2985	7,3	0	2,666667	Bajo	0,17	0	0,000006	0,031593	Bajo
45	Polygon	10	Modulo de Gas 2	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	101,081	5	0	2,666667	Bajo	0,17	0	0,000005	0,031593	Bajo
46	Polygon	22	Unidad descompresora de Gas	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	92,8276	5	0	2,666667	Bajo	0,17	0	0,000005	0,031593	Bajo
47	Polygon	0	Modulo de Gas 1	Gas	Pad 4	Bola de fuego día	82,2985	7,3	0	2,666667	Bajo	0,17	0	0,000006	0,000021	Bajo

### Tabla 27

*Riesgo ambiental bola de fuego*

Categoría	Área (ha)
Medio	6,31
Bajo	2,80
<b>Total general</b>	<b>9,11</b>

Figura 17

*Riesgo Ambiental Bola de Fuego*

## Riesgo Chorro de Fuego

De acuerdo los resultados obtenidos correspondiente a las variables de la Ecuación 4 para el escenario de chorro de fuego, se obtienen un total de 537040 atributos (Figura 18) calificados con los respectivos rangos asociados a las categorías bajo y medio como se presenta en la Tabla 28 y la Figura 19.

### Figura 18

*Atributos asociados al cálculo de riesgo ambiental chorro de fuego*

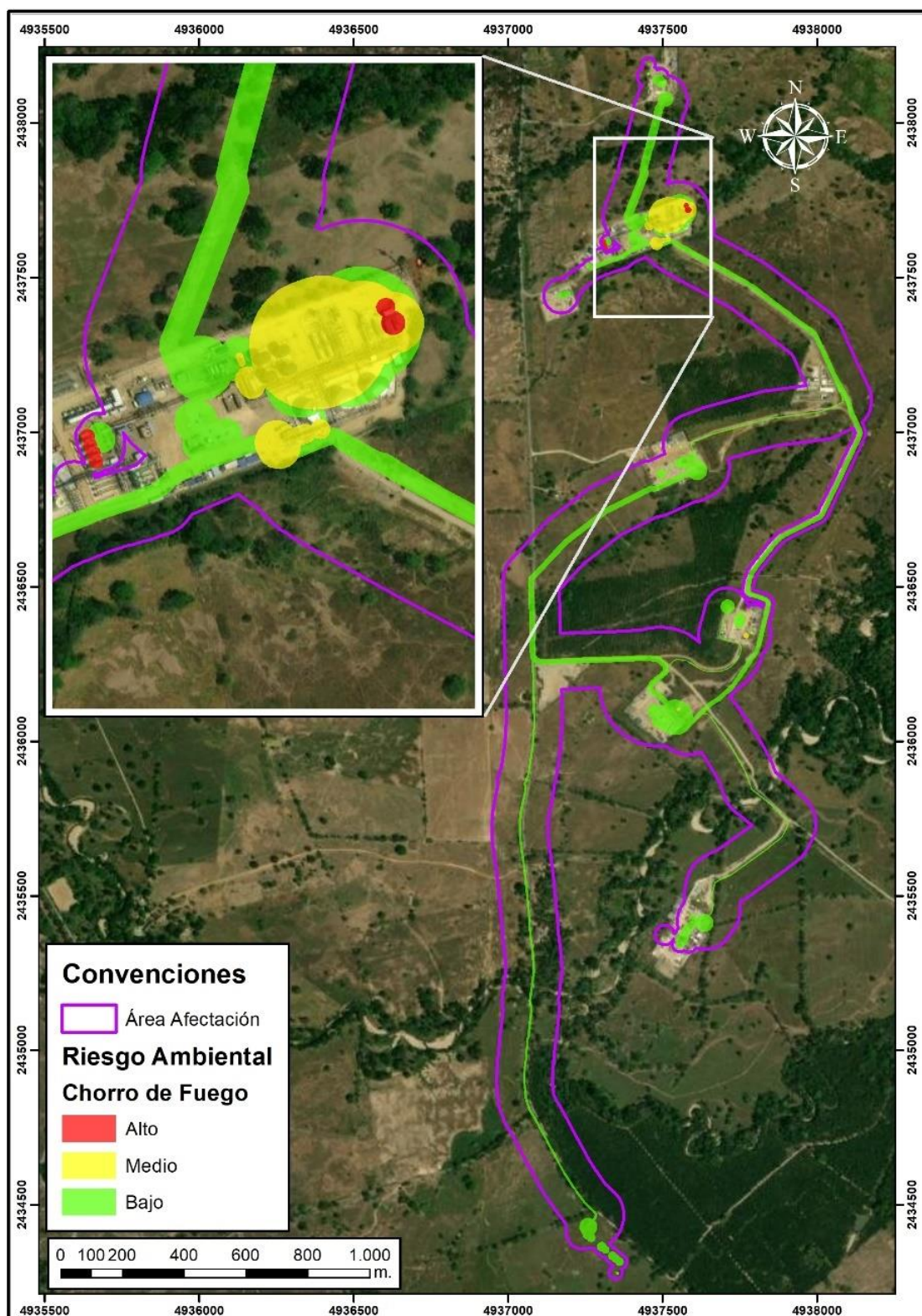
Shape	Eg	Iniciador	Sustancia	BUFF	DIST	Nivel	P1i	P2i	Vulnerabil	Cali	Vuln	Ries Equip	Ries Amb2	Area ha
Polygon	FW	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	58,38	37,5	0	0,78	Medio	3,333333	0	Medio	0,000005	0,000005	
Polygon	Inte	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	19,37	14,5	0	0,54	Medio	3,333333	0	Medio	0,000005	0,000005	
Polygon	Trat	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	17,83	20,9	0	0,78	Medio	3,333333	0	Medio	0,000005	0,000005	
Polygon	Trat	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Gas	10,02	9,5	0	0,42	Medio	3,333333	0	Medio	0,000005	0,000005	
Polygon	Inte	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	26,16	20,9	0	0,78	Medio	3,333333	0	Medio	0,000005	0,000005	
Polygon	Trat	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	21,75	20,9	0	0,78	Medio	3,333333	0	Medio	0,000005	0,000005	
Polygon	Inte	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	20,08	20,9	0	0,78	Medio	3,333333	0	Medio	0,000005	0,000005	
Polygon	FW	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	58,38	37,5	0	0,78	Medio	3,333333	0	Medio	0,000005	0,000005	
Polygon	Inte	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	26,16	20,9	0	0,78	Medio	3,333333	0	Medio	0,000005	0,000005	
Polygon	Inte	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	20,08	20,9	0	0,78	Medio	3,333333	0	Medio	0,000005	0,000005	
Polygon	Inte	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	19,37	14,5	0	0,54	Medio	3,333333	0	Medio	0,000061	0,000061	
Polygon	Inte	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	25,93	14,5	0	0,54	Medio	3,333333	0	Medio	0,000061	0,000061	
Polygon	Inte	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	25,93	14,5	0	0,54	Medio	3,333333	0	Medio	0,000061	0,000061	
Polygon	FW	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	58,38	37,5	0	0,78	Medio	3,333333	0	Medio	0,000061	0,000061	
Polygon	Inte	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	19,37	14,5	0	0,54	Medio	3,333333	0	Medio	0,000061	0,000061	
Polygon	Trat	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	29,21	14,5	0	0,54	Medio	3,333333	0	Medio	0,000061	0,000061	
Polygon	Trat	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	17,83	20,9	0	0,78	Medio	3,333333	0	Medio	0,000061	0,000061	
Polygon	Trat	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Gas	10,02	9,5	0	0,42	Medio	3,333333	0	Medio	0,000061	0,000061	
Polygon	Inte	L1=Rotura total (100% del diámetro).	Crudo	26,16	20,9	0	0,78	Medio	3,333333	0	Medio	0,000061	0,000061	

### Tabla 28

*Riesgo ambiental chorro de fuego*

Categoría	Área (ha)
Alto	0,10
Medio	15,61
Bajo	1,66
<b>Total general</b>	<b>17,37</b>

Figura 19

*Riesgo Ambiental Chorro de Fuego*

## Riesgo Incendio de Piscina

De acuerdo al cruce algebraico de los valores correspondientes a las variables de la Ecuación 4 para el escenario de incendio de piscina en cada equipo y de acuerdo con los niveles de radiación obtenido, se identifica un total de 809752 atributos (Figura 20) para la definición del riesgo ambiental Así pues, se identificaron los rangos asociados a las categorías de riesgo ambiental bajo y medio y alto como se presenta en la Tabla 29 y Figura 21.

**Figura 20**

*Atributos asociados al cálculo de riesgo ambiental incendio de piscina*

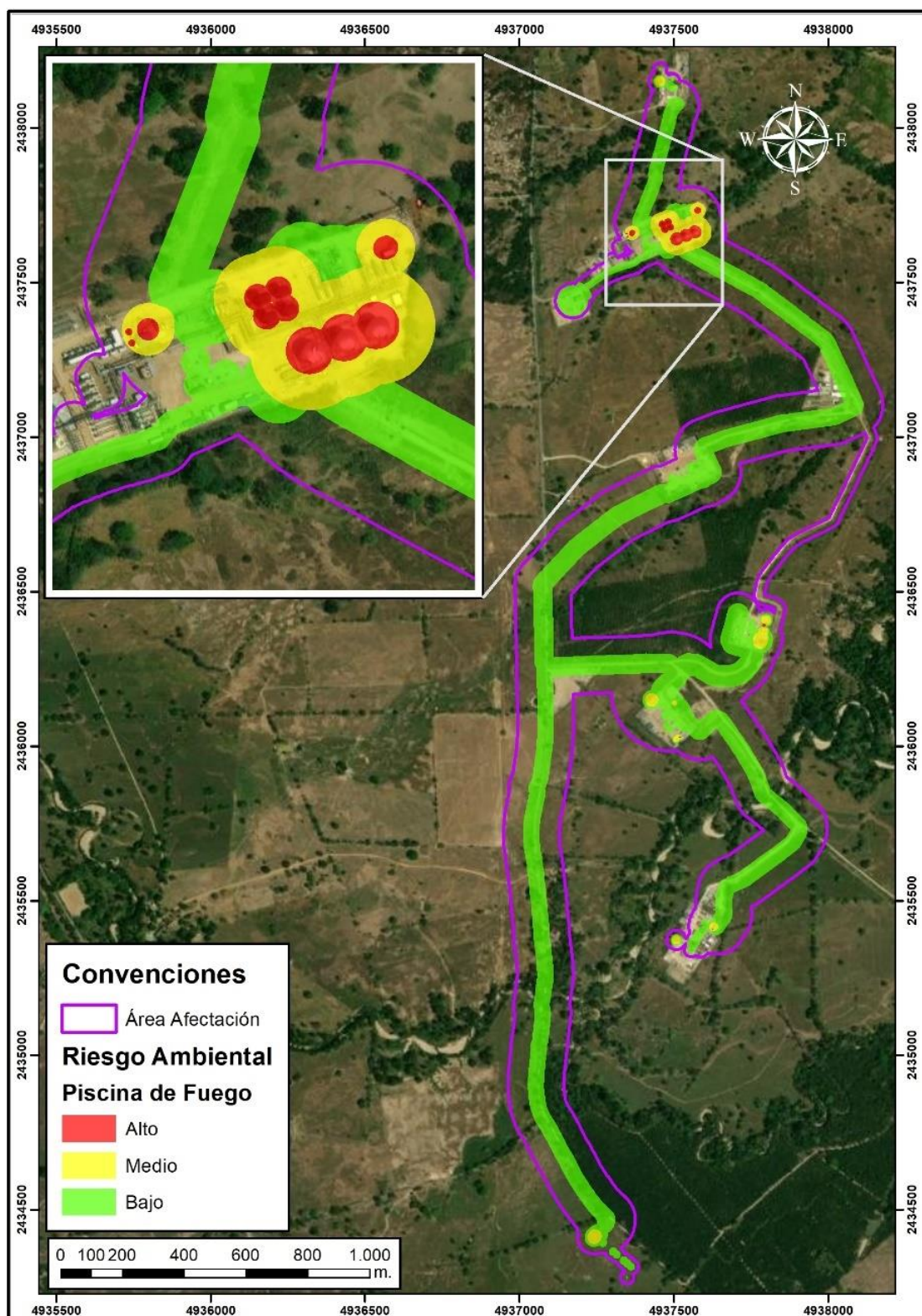
FID	Shape	Ed	Sustancia	Suceso	BUFF DIST	Nivel	P1i	Vulnerabil	Cali	Vuln	P2i	Ries Equip	Rigs. Amb2	Area ha
15728	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	13,25	14,5	0,000003	Muy Bajo	2,333333	0,54	0,000004	Medio	0,000006	0,000006
15729	Polygon	Bq	Crudo	Incendio de piscina temprano di	14,7	9,5	0,000004	Muy Bajo	2,333333	0,42	0,000004	Medio	0,000006	0,000006
15729	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	15,08	14,5	0,000003	Muy Bajo	2,333333	0,54	0,000004	Medio	0,000006	0,000006
15729	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	23,76	9,5	0,000003	Muy Bajo	2,333333	0,42	0,000003	Medio	0,000006	0,000006
15729	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	17,61	12,5	0,000003	Muy Bajo	2,333333	0,42	0,000003	Medio	0,000006	0,000006
15730	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	13,25	14,5	0,000003	Medio	3	0,54	0,000005	Medio	0,000002	0,000002
15730	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	11,9	20,9	0,000003	Medio	3	0,78	0,000007	Medio	0,000002	0,000002
15730	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	23,76	9,5	0,000003	Medio	3	0,42	0,000004	Medio	0,000002	0,000002
15730	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	17,61	12,5	0,000003	Medio	3	0,42	0,000004	Medio	0,000002	0,000002
15731	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	13,25	14,5	0,000003	Medio	3	0,54	0,000005	Medio	0,000038	0,000038
15731	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	15,08	14,5	0,000003	Medio	3	0,54	0,000005	Medio	0,000038	0,000038
15731	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	23,76	9,5	0,000003	Medio	3	0,42	0,000004	Medio	0,000038	0,000038
15731	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	17,61	12,5	0,000003	Medio	3	0,42	0,000004	Medio	0,000038	0,000038
15732	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	13,25	14,5	0,000003	Medio	3	0,54	0,000005	Medio	0,000091	0,000091
15732	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	15,08	14,5	0,000003	Medio	3	0,54	0,000005	Medio	0,000091	0,000091
15732	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	23,76	9,5	0,000003	Medio	3	0,42	0,000004	Medio	0,000091	0,000091
15733	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	17,61	12,5	0,000003	Medio	3	0,42	0,000004	Medio	0,000091	0,000091
15733	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	13,25	14,5	0,000003	Muy Bajo	2,333333	0,54	0,000004	Medio	0,000001	0,000001
15733	Polygon	TK	Crudo	Incendio de piscina temprano di	11,9	20,9	0,000003	Muy Bajo	2,333333	0,78	0,000005	Medio	0,000001	0,000001
15733	Polygon	Bq	Crudo	Incendio de piscina temprano di	12,05	14,5	0,000004	Muy Bajo	2,333333	0,54	0,000005	Medio	0,000001	0,000001

**Tabla 29**

*Riesgo ambiental incendio de piscina*

Categoría	Área (ha)
Alto	0,63
Medio	45,49
Bajo	3,31
<b>Total general</b>	<b>49,43</b>

Figura 21

*Riesgo Ambiental Incendio de Piscina*

A partir de los resultados obtenidos asociados al riesgo ambiental para cada uno de los escenarios se identifica que la relación entre la cantidad de equipos y la cantidad de escenarios discretizados resulta exponencial de acuerdo con las diferentes condiciones asociadas a la vulnerabilidad. Esto permite discretizar el riesgo ambiental por equipo de manera independiente a partir de las iteraciones y relación con las diferentes radiaciones térmicas que pueden presentarse en un solo polígono, más aún cuando se cruzan áreas de dos o más equipos con diferentes condiciones de riesgo.

La sumatoria relacionada en la ecuación 2 para cada área relacionada con la definición de riesgo ambiental orienta a la operación de unión de áreas con la misma calificación, a partir de ello, se logró identificar los valores de riesgo que definen los niveles en bajo, medio y alto. Para la definición de dichos niveles se toma como base los niveles de tolerabilidad planteados en la Guía análisis de riesgo tecnológico (ECOPETROL, 2013) que a partir de una base de datos internacional de tolerabilidad del riesgo individual define los criterios para su parametrización.

Los niveles de radiación térmica con valores de  $1.6 \text{ Kw/m}^2$  obtienen un valor de riesgo insignificante, esto es relacionado a las consecuencias de este nivel tan baja y a la interacción con la vulnerabilidad y específicamente al valor ponderado de  $P2_i$ , considerando que la probabilidad de afectación se reduce considerablemente en la medida que más se aleja el área de radiación sus consecuencias son menores para todos los componentes, esto reduce el nivel del riesgo y permite descartarlo.

De manera clara se puede establecer que no necesariamente la relación de las áreas de consecuencias para cada nivel de radiación térmica obtenida de la modelación PHAST obedece al nivel de riesgo. Esto en la medida que no se consideran las condiciones de vulnerabilidad total e integral de componentes bióticos y abióticos para cada escenario de análisis. De esta manera, resulta pertinente resaltar que la definición del riesgo no corresponde a la intersección del área de afectación por radiación térmica y los elementos expuestos ambientales asociado a la cobertura, como normalmente se presenta en los Estudios de Impacto Ambiental, ya que esto corresponde únicamente a un análisis de consecuencias y no a la definición de riesgo. Por el contrario, se debe considerar dentro del análisis los criterios asociados

a la frecuencia de ocurrencia del suceso final dada la pérdida de contención y su interacción con la vulnerabilidad, el tipo de radiación térmica y la probabilidad de afectación del área ambientalmente sensible dado el suceso final.

Con respecto los equipos, tanques y líneas identificados, la mayor probabilidad de ocurrencia en relación a incendios de piscina seguido por chorro de fuego y por último escenarios de bola de fuego e incendio en la superficie.

Entre los escenarios de riesgo evaluados, las bombas, los generadores y los intercambiadores de calor presentan las mayores frecuencias de derrame o fuga con valores de  $1,21 \times 10^{-3}$ ,  $2,13 \times 10^{-3}$  y  $3,54 \times 10^{-3}$  expresado en fallas por año.

Comparando los tres escenarios asociados a bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina se identificó una mayor extensión de área relacionada con el riesgo para los equipos de incendio de piscina, esto se condiciona a la cantidad de equipos, las condiciones y cantidades de almacenamiento. Sin embargo, para el escenario de bola de fuego solo se logró determinar dos niveles de riesgo donde predomina la categoría de bajo con 6,31 ha seguido por la categoría medio con ,80 ha. Para el caso del escenario de chorro de fuego las áreas de riesgo con categoría alta se identifican en un área de 0,10 hectáreas, seguido con nivel de riesgo medio con 1,66 ha y con predominio de riesgo bajo en 15,61 ha. Frente al escenario de incendio de piscina las áreas de riesgo con categoría alta, corresponde a 0,63 ha, seguido con nivel de riesgo medio con 3,31 ha y con predominio de riesgo bajo en 45,49 ha.



## Discusión

De manera general este trabajo plantea la implementación de las variables del componente abiótico asociado a conflicto uso del suelo, pendiente, proceso morfodinámico, unidad geomorfológica, paisaje, zonas de recarga y drenajes. Para el componente biótico se contempla coberturas naturales, especies analizadas y áreas ambientalmente sensibles.

No obstante, de acuerdo a las particularidades de la zona de estudio para el campo El Cerro y conforme a la información asociada a la caracterización de línea base tomada del Estudio de Impacto Ambiental disponible para el presente análisis, se validó y corroboró la consecución de la información para las variables relacionadas con conflicto uso del suelo, pendientes, geomorfología, paisaje, coberturas y especies amenazadas. En ese sentido resulta relevante contar con información a una escala lo más detallada posible de tipo 1:25.000 o mayor, ya que permite establecer unas condiciones más precisas y mayor especificidad en la determinación de las áreas de vulnerabilidad ambiental soportadas en un mayor grado de confianza y representatividad.

Las variables que se descartaron como fuente de análisis para la zonificación de la vulnerabilidad, se asocian a la no presencia o evidencia de variables como procesos morfodinámicos en la zona, puesto que, es una zona de bajas pendientes en su predominancia. Por otro lado, en el sector no se identificaron zonas de recarga hidrogeológica y drenajes de importancia regional. También, se debe mencionar que no se presentan en el área del campo El Cerro superposiciones con Áreas Ambientalmente Sensibles, publicadas en las plataformas oficiales de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible como es el caso de Trecmartos. Sin embargo, se recomienda el uso de otras plataformas con mayor nivel de detalle como del instituto Humboldt.

Las variables y criterios mencionados en el presente trabajo marcan un diferenciador en los análisis de riesgo ambiental, considerando que resaltan condiciones intrínsecas de los territorios de importancia ambiental y no se reduce a una clasificación aleatoria de una cobertura, puesto que la cobertura en específico puede presentar diversas particularidades, como el conflicto en el uso del suelo, la

presencia de una especie en vía de extensión, la relación con un cuerpo de agua o zona de recarga, entre otros.

Con relación a la vulnerabilidad parcial de los elementos considerados del campo El Cerro, para el conflicto de uso del suelo, se evidencia que las tierras con sobreutilización severa presenta un nivel de vulnerabilidad muy alta, para los suelos con subutilización moderada y sobreutilización ligera presentan niveles de vulnerabilidad media y baja respectivamente, esto podría relacionarse a la condición de intervención antrópica que presenta estos sectores, considerándose que a mayor intervención antrópica, pueden presentarse aumento de las condiciones de vulnerabilidad del sector.

Para el área de análisis la pendiente no es un parámetro diferenciador con relación a vulnerabilidad parcial. Esto se debe a que el sector corresponde a una zona llana con bajos gradientes de inclinación. No obstante, para áreas de análisis de riesgos que comprenda diferentes tipos de pendientes, puede resultar en una variable predominante para la caracterización de la vulnerabilidad.

Con relación a la geomorfología, en términos de vulnerabilidad parcial, se presentan geoformas relacionadas con abanicos, barras y llanuras de origen aluvial, los cuales en termino de probable afectación no presentarían alteraciones por la ocurrencia de escenarios relacionados con fenómenos de radiación.

En cuanto a las condiciones de paisaje del área de estudio, puede resaltar los paisajes de categoría “*distinto o singular*”, presentan una categoría de vulnerabilidad parcial alta. Esto se debe a que estos paisajes presentan elementos de importancia ambiental, considerando que se relacionan directamente con arenales, bosques, cuerpos de agua naturales, vegetación secundaria y zonas pantanosas.

De las coberturas naturales presentes en el área de probable afectación del campo El Cerro, se destacan los ríos (50 metros) y los bosques de galería y/o ripario, con niveles de vulnerabilidad parcial muy alta y alta respectivamente. Esto se debe a la presencia de mayor cantidad de hábitat de flora y fauna en estos sectores, por lo que presentan una sensibilidad importante a nivel ambiental.

Con relación a las especies amenazadas el área de estudio el área de probable afectación en su totalidad presenta una vulnerabilidad parcial alta, puesto que, corresponde a una clasificación de vulnerable según la plataforma web Tremarctos Colombia.

El análisis asociado a la zonificación de la vulnerabilidad debe considerarse como un promedio entre las variables objeto de análisis. Esto con la finalidad de reducir la incertidumbre que puede darse al asignar factores de importancia de manera separada. Dicha zonificación bajo la metodología propuesta permite cuantificar las pérdidas ecosistémicas en términos de análisis de riesgos. A su vez, la zonificación de la vulnerabilidad basado en la caracterización ambiental de un área, permitirá entregar un insumo relevante ante la materialización de un evento contingente, en el sentido de proporcionar herramientas base para la evaluación de daños ambientales y de esta manera cuantificar la afectación a los servicios ecosistémicos de la zona a partir de la estandarización de criterios.

La definición del riesgo ambiental se debe basar claramente en los resultados obtenidos de la vulnerabilidad ambiental y del nivel de detalle sobre el cual se valora. Aunado a lo anterior, resulta preponderante mencionar que las valoraciones asociadas a la frecuencia de ocurrencia del suceso final dada la pérdida de contención y la probabilidad de afectación del área ambientalmente sensible otorgan el criterio de riesgo. Esta última va ligada directamente a las variables identificadas y analizadas de línea base, lo que refleja la importancia y validez de incorporar información primaria asociada a la caracterización ambiental de manera que refleje la integralidad del entorno.

Para la zonificación del riesgo se debe considerar condicionar en la herramienta de ArcGis®, la opción de priorizar los valores máximos, esto con la finalidad que refleje principalmente las áreas con niveles más críticos debido a la cantidad de atributos que pueden generarse al zonificar el riesgo ambiental para cada polígono.

El análisis de riesgos se debe presentar de manera independiente por tipo de suceso final, esta condición se da por la probabilidad afectación al entorno y por la frecuencia de ocurrencia del evento.

## Conclusiones

De acuerdo con la revisión de la información de línea base de un estudio de impacto ambiental, se logró analizar, discretizar y clasificar para el área de estudio definida cada variable objeto de incorporación en la zonificación de la vulnerabilidad para el área de alta consecuencia considerando cada suceso final de bola de fuego, chorro de fuego, e incendio de piscina.

La integración de la sumatoria y ponderación de las vulnerabilidades parciales a partir de los factores bióticos y abióticos en los análisis de vulnerabilidad ambiental ofrecen un amplio espectro de las características ambientales en los territorios y un mejor entendimiento de la vulnerabilidad de manera integral y coherente, así como la manera en que se interrelaciona con el entorno.

El área de estudio, presenta diversos contrastes en la caracterización ambiental, lo cual permitió de manera efectiva implementar la propuesta de la presente investigación definiendo sectores vulnerables de una manera específica y detallada con diferentes categorías. Esto permitirá a futuro priorizar el monitoreo y la reducción del riesgo a los elementos expuestos vulnerables.

Con relación al componente abiótico, las variables que marcaron un diferenciador correspondieron a conflicto uso del suelo, paisaje y coberturas naturales.

Los sectores asociados a cuerpos de agua naturales y bosques de galería y/o ripario, son los sectores con más sensibilidad intrínseca en función de vulnerabilidad. Esto se debe a los recursos naturales, especialmente los relacionados con flora y fauna que engloban de manera esencial.

Comparando los tres escenarios asociados a bola de fuego, chorro de fuego e incendio de piscina se identificó una mayor extensión de área relacionada con el riesgo para los equipos de incendio de piscina, esto se debe a la cantidad de equipos, las condiciones y cantidades de almacenamiento. Sin embargo, para el escenario de bola de fuego solo se logró determinar dos niveles de riesgo donde predomina la categoría de bajo seguido por la categoría medio. Para el caso del escenario de chorro de fuego las áreas de riesgo con categoría alta son considerablemente menores, seguido con nivel de riesgo medio y con predominio de riesgo bajo. Frente al escenario de incendio de piscina predominan las áreas de riesgo con categoría media seguido por la categoría baja, esta última con mayor extensión.

La fórmula de riesgo ambiental ajustada permite identificar inicialmente la vulnerabilidad de manera que puede establecer bajo unas condiciones prácticas y con criterios estandarizados la zonificación de esta variable para cada área relacionada con el suceso final de incendio de piscina, chorro de fuego y bola de fuego. Se debe tener claridad sobre las fuentes de información estadísticas para la toma de datos asociados a la frecuencia de ocurrencia por la pérdida de contención relacionada con la frecuencia de falla final, así como considerar el promedio de la probabilidad de afectación del área ambiental a partir de los criterios generados. En ese sentido, se pudo estandarizar los valores y obtener datos justificados en la valoración cuantitativa del riesgo ambiental.

## **Recomendaciones**

Implementar los criterios de valoración establecidos en la metodología con la finalidad de validar su representatividad en áreas con condiciones de mayor sensibilidad ambiental para establecer su relación y aplicabilidad en la definición de la zonificación de la vulnerabilidad ambiental.

Tomar los criterios de vulnerabilidad para el análisis de riesgos en escenarios con sucesos finales como sobrepresión ajustando las valoraciones de probabilidad de afectación del área ambientalmente sensible de manera que pueda determinarse el riesgo ambiental para otros escenarios.

El riesgo ambiental depende claramente del tipo de escenario final que lo genere, en tal sentido se debe presentar las estrategias metodológicas y los resultados, para que puedan así realizarse las validaciones respectivas de los resultados obtenidos.

Realizar una guía para la determinación del riesgo ambiental considerando la discretización de los factores bióticos y abióticos para la determinación del riesgo ambiental, la cual sea sistémica, repetible, exhaustiva y auditable, considerando los criterios y premisas de la presente investigación.

Implementar la propuesta metodológica para estos sucesos finales en otros sectores como agroquímicos, infraestructura, energía, minería, entre otros para proyectos objeto de licenciamiento ambiental, con el objetivo de estandarizar dichos análisis ya que en la actualidad las empresas allegan solo un cruce entre áreas de afectación y elementos expuestos vulnerables asociados a coberturas, lo que aumenta la incertidumbre frente a la definición del riesgo ya que los resultados entregados corresponden a un análisis de afectaciones y no incorpora variables de probabilidades y frecuencias en su determinación

### Referencias bibliográficas

- ANLA. (2018). *Metodología General para la Elaboración y Presentación de Estudios Ambientales*. Bogotá.
- Arzaghi, E., Abbassi, R., Garaniya, V., Binns, J., & Khan, F. (2018). An ecological risk assessment model for Arctic oil spills from a subsea pipeline. *Marine Pollution Bulletin*, 1117-1127.
- Blaikie, P., Cannon, T., David, I., & Wisner, B. (1996). *Vulnerabilidad. El Entorno Social, Político y Económico de los Desastres*. Panamá.
- Cardona, O. D. (1992). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. *II Simposio Latinoamericano de Riesgo Geologico Colombiano y II conferencia Colombiana de Geologia Ambiental*. Pereira.  
[http://www.planesmojana.com/documentos/estudios/19\\_Evaluacion%20de%20la%20amenaza%2081%29%20Omar%20D.%20Cardona.pdf](http://www.planesmojana.com/documentos/estudios/19_Evaluacion%20de%20la%20amenaza%2081%29%20Omar%20D.%20Cardona.pdf)
- Cardona, O. D. (2001). *Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos*. Barcelona, Cataluña, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cardoso, M. (2017). *Estudio de la vulnerabilidad socio-ambiental a través de un índice sintético. Caso de distritos bajo riesgo de inundación: Santa Fe, Recreo y Monte Vera, Provincia de Santa Fe, Argentina*. Belo Horizonte, Brasil.
- Chapin, I., Matson, P., & Vitousek, P. (2011). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: New York, NY Springer Science+Business Media, LLC 2011.
- Codina, R. (2011). *Calidad visual vulnerable del paisaje: un indicador para evaluar el impacto ambiental*. Congreso de la República de Colombia. (2012). *Ley 1523 de 2012*. Bogotá.
- Cox, A., Lees, F., & Ang, M. (1990). *Classification of hazardous locations*. Hampshire: Institution of Chemical Engineers.
- Dávila Gutiérrez, H. (2011). *El método Dávila & Mc Donald (I) para la estimación de la fragilidad*. San José.

- Departamento Administrativo de la Función Pública. (26 de Mayo de 2015). Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, Colombia.
- Departamento administrativo de la presidencia de la república de Colombia. (2017). *Decreto 2157 de 2017*. Bogotá.
- DNV. (2022). DNV. <https://www.dnv.com/software/services/plant/consequence-analysis.html>
- Dziubinski, M., Frateza, M., & Markowski, A. (2005). Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention*, 399-408.
- Ecología Verde. (1 de marzo de 2021). *Factores bióticos: qué son, características, clasificación y ejemplos*. <https://www.ecologiaverde.com/factores-bioticos-que-son-caracteristicas-clasificacion-y-ejemplos-3084.html>
- ECOPETROL. (2013). *Guía de análisis de riesgo tecnológico para el sector hidrocarburos*. Bogotá.
- Energy Institute of London. (2006). *Ignition probability review, model development and look-up correlations*. London.
- GoreChernomyrdin Commission's Environmental Working Group. (1998). *Environmental Risk Assessments of Oil and Gas Activities Using National Security and Civilian Data Sources*.
- Guerra, S. A. (2014). Determinación del conflicto de uso de suelo para las veredas las petacas y la correa del municipio de puerto rondón dentro de la cuenca del río Cravo Norte en el departamento de Arauca.
- Hosseini, N., Givehchi, S., & Maknoon, R. (2019). Cost-based fire risk assessment in natural gas industry by means of fuzzy FTA and ETA. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.
- Hu, X., Ma, C., Huang, P., & Xu, G. (2021). Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection – A case of Weifang City, China. *Ecological Indicators*.
- IGAC. (2021). Glosario de términos geomorfológicos aplicados a levantamientos de suelo.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2011). *NORMA ISO 31000. Gestión de Riesgos*. Bogotá.



- International Association of Oil and Gas Producers. (2010). *Ignition probabilities*.
- Jiao, X., Zena Waleligna, S., Reinhardt Nielsena,, M., & Smith-Hall, C. (2019). Protected areas, household environmental incomes and well-being in the Greater Serengeti-Mara Ecosystem. *Forest Policy and Economics*.
- Martínez, L. F., Caro, A. L., Daza, Y. X., & Roa, K. A. (2018). Gestión y Ambiente 21(2), 220-232, 2018Propuesta metodológica para la evaluación de riesgos ambientales en contextos complejos: aplicación en instituciones de educación superior (IES). *Gestión y Ambiente*, 220-232.
- MINAMBIENTE. (2014). *Protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Retrieved 08 de 2018.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Hacienda, Fondo Nacional de Adaptación. (2014). *Protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas*. Bogotá.
- Naciones Unidas. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. Sendai.
- National Institute of Public Health and the Environment (RIVM). (2009). Reference Manual Bevi Risk Assessments. Bilthoven.
- Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres UNDDR. (2004). Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres.
- Pérez Vizcaíno, I. R. (2010). *Análisis de vulnerabilidad de los sistemas biológicos aplicado a la evaluación de impacto ambiental (EIA) en Colombia*. Bogotá. Bogotá.
- Pescea, M., Paci, P., Garronea, S., Pastorino, R., & Fabiano, B. (2012). Modelling Ignition Probabilities within the Framework of Quantitative Risk Assessments. *Chemical Engineering Transactions*, 141-146.
- Qing, Q., Deng Xiang, Z., & Bing, L. (2011). Ecological Risk Characterization and Assessment of PHAS in the Shengli oil field. *Procedia Environmental Sciences*, 1685 - 1691.

- Real Academia de la Lengua Española. (2021). *Diccionario de la lengua española Edición del Tricentenario Actualización 2021*. [https://dle.rae.es/vulnerable?m=30\\_2](https://dle.rae.es/vulnerable?m=30_2)
- Ruíz Rios, C. (2014). *Metodología de análisis de riesgo ambiental aplicado a una empresa de recubrimientos metálicos por electrólisis – distrito de la Victoria - Perú*. Valencia.
- SNGRD. (2017). *Terminología sobre gestión del riesgo de desastres y fenómenos amenazantes*. Bogotá: UNGRD.
- Tremarctoscolombia.org. (10 de 05 de 2022). *Tremarctoscolombia.org*.  
<http://www.tremarctoscolombia.org/>
- UNE. (19 de 12 de 2016). *UNE, Normalización Española*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0040747>
- UNISDR. (2009). *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. Ginebra, Suiza: UNISDR.
- Universidad Nacional de Colombia. (s.f.). *Metodología de Evaluación de Riesgos Ambientales*. Bogotá.
- Vera Rodríguez, J., & Albarracín Calderón, A. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenaza de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 109-136.
- Viceministerio de Gestión Ambiental, Dirección General de Calidad Ambiental . (2010). *Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales*. Lima.
- Wu, H., Guo, B., Fan, J., Fei, Y., Han, B., Wei, C., . . . Meng, C. (2021). A novel remote sensing ecological vulnerability index on large scale: A case study of the China-Pakistan Economic Corridor region. *Ecological Indicators*.

## **Anexos**

Anexo 1 Criterios de vulnerabilidad

Anexo 2 Resultados

Anexo 3 Cartografía