

Maestría en Ingeniería Civil

**Metodología para evaluación cuantitativa del riesgo por rotura en
líneas de hidrocarburos debido a deslizamientos**

Paula Andrea Rodriguez Jiménez

Bogotá, D.C., 05 de agosto de 2016



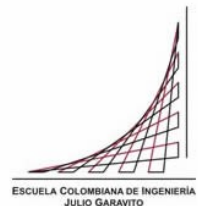
**Metodología para evaluación cuantitativa del riesgo por rotura en
líneas de hidrocarburos debido a deslizamientos**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en geotecnia**

PhD. Carlos Rodríguez Pineda

Director

Bogotá, D.C., 05 de agosto de 2016



La tesis de maestría titulada “Metodología para evaluación cuantitativa del riesgo por rotura en líneas de hidrocarburos debido a deslizamientos”, presentada por Paula Andrea Rodríguez Jiménez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Director de la tesis

Carlos Rodríguez Pineda

Jurado

José Vicente Amórtegui

Jurado

Edgard Robert Barbosa Cruz

Bogotá, D.C., 24 de mayo de 2016

Resumen

En el desarrollo de este Trabajo final de Maestría se plantea una metodología para la evaluación cuantitativa del riesgo por rotura en líneas de hidrocarburos debido a deslizamientos. Establecer esta metodología, cobra gran importancia debido a que la materialización del mismo ha generado impactos de manera negativa que han afectado a la población causando muertes, daños en la infraestructura y daños ambientales, se han reportado 84 roturas por amenazas naturales en la red Nacional de Poliductos, Oleoductos y Gasoductos de Colombia en mas de 12.000Km en los últimos 40 años.

La metodología tiene su fundamento en los desarrollos de diferentes autores sobre cada tema en particular, que basados en el concepto de probabilidad combinada y teniendo en cuenta las condiciones de frontera de los estudios previos, permite su adaptabilidad al objeto de estudio y con ello dimensionar el riesgo que se esté evaluando

Este trabajo enfatiza en la parte conceptual que da origen a la metodología, revisando los planteamientos, la metodología planteada conserva el concepto de análisis de riesgo basada en la amenaza por deslizamientos, vulnerabilidad por rotura de la tubería y cuantificación de daños por efectos de derrame y la parada de bombeo.

INDICE GENERAL

<i>Capítulo 1</i>	12
1. <i>Aspectos Generales o Introdutorios</i>	12
1.1. Introducción	12
1.2. Objetivos del Estudio	13
1.1.1 objetivo general.....	13
1.1.2 objetivos específicos.....	13
1.3. Componentes del estudio	14
1.1.3 componente I.....	14
1.1.4 componente II.....	14
1.1.5 componente III.....	15
<i>Capítulo 2</i>	16
2. <i>Marco Teórico y Conceptual</i>	16
2.1. Marco Teórico de la Amenaza	16
2.1.1. resistencia al corte.....	16
2.1.2. análisis de estabilidad.....	17
2.1.3. método de análisis superficial infiltración del suelo.....	19
2.1.4. métodos probabilísticos.....	22
2.1.5. análisis de probabilidad de falla.....	23
2.2. Marco Teórico de Evaluación de la Vulnerabilidad	26
2.2.1. desplazamiento del suelo.....	27
2.2.2. fuerzas resistentes del suelo sobre la tubería.....	29
2.2.3. deformación de la tubería.....	33
2.2.4. comportamiento de la tubería.....	36
2.2.5. grados del acero.....	38
2.3. Marco Teórico de Evaluación Índice de Daños	39
2.3.1. la valoración del factor de impacto (FI) por derrame del producto.....	41
<i>Capítulo 3</i>	45
3. <i>Sitio de Estudio y Parámetros de la Tubería</i>	45

3.1.	Selección del Sitio.....	45
3.1.1.	localización de la zona de estudio.	45
3.1.2.	geología de la zona.	46
3.1.3.	modelo geológico – geotécnico.	50
3.2.	Parámetros de la Tubería	53
3.2.1.	parámetros del suelo de relleno.....	53
3.2.2.	ancho del deslizamiento.	54
3.2.3.	parámetros de la tubería.....	54
<i>Capítulo 4</i>		55
4.	<i>Desarrollo y Resultados</i>	55
4.1.	Evaluación de la Amenaza.....	55
4.1.1.	determinación de parámetros geomecánicos.	55
4.1.2.	determinación de parámetros probabilísticos.....	56
4.1.3.	determinación de factores detonantes.	57
4.1.4.	determinación de variables.	61
4.1.5.	escenarios de diseño.....	66
4.1.6.	modelación SLIDE 6.0 - cálculo de probabilidad de falla.	66
4.2.	Evaluación de la Vulnerabilidad	78
4.2.1.	calculo de fuerzas resistentes del suelo.....	78
4.2.2.	metodología 1: cálculo de deformación critica de la tubería y el terreno juntos. 79	
4.2.3.	metodología 2: cálculo de desplazamiento del terreno.	89
4.3.	Evaluación del Riesgo.....	90
4.3.1.	determinación de la peligrosidad del producto.	90
4.3.2.	calculo del volumen liberado.....	92
4.3.3.	fase IV: cálculo del factor de dispersión.....	93
4.3.4.	características del receptor.....	94
4.3.5.	fase VI: cálculo de factor de impacto al medio ambiente.	94
4.3.6.	fase VII: cálculo de probabilidad.	95
4.3.7.	cálculo de cuantificación del riesgo relativo.	99
4.3.8.	calculo índice de riesgo.	99

<i>Capítulo 5</i>	102
5. <i>Análisis de Resultados y Conclusiones</i>	102
5.1. Análisis de Resultados de la Amenaza	102
5.2. Análisis de Resultados de la Vulnerabilidad	108
5.3. Análisis de Resultados del Riesgo	112
<i>Capítulo 6</i>	115
6. <i>Metodología para la Evaluación del Riesgo</i>	115
6.1. Metodología de Evaluación de la Amenaza	115
6.2. Metodología de evaluación de la vulnerabilidad	124
6.3. Metodología de Evaluación de los Daños	130
7. <i>Bibliografía</i>	141

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2-1. Factores de capacidad portante lateral para diferentes ángulos de fricción</i>	31
<i>Tabla 2-2. Parámetros de Ramberg y Osgood para tuberías de acero</i>	37
<i>Tabla 2-3. Propiedades Mecánicas de la Tubería</i>	38
Tabla 3-1. Descripción de los niveles estratigráficos	51
<i>Tabla 3-2. Suelo de Relleno</i>	53
<i>Tabla 3-3. Anchos de Deslizamiento considerados</i>	54
Tabla 3-4. Parámetros de la Tubería (Proyecto Piloto)	54
<i>Tabla 4-1. Parámetros Geomecánicos</i>	56
<i>Tabla 4-2. Parámetros Probabilísticos</i>	57
<i>Tabla 4-3. Profundidad del Frente Húmedo</i>	59
<i>Tabla 4-4. Profundidad de Infiltración y probabilidad de ocurrencia del mismo</i>	59
<i>Tabla 4-5. Aceleraciones y probabilidad de ocurrencia del sismo</i>	60
Tabla 4-6. Variación de los Parámetros Geotécnicos	62
<i>Tabla 4-7. Variación Nivel freático</i>	63
<i>Tabla 4-8. Análisis Estadístico de precipitación máxima en 24</i>	64
<i>Tabla 4-9. Variación de los Parámetros Geotécnicos</i>	65
<i>Tabla 4-10. Resultados de Modelación Sinn Nivel Freático y Cálculo de Probabilidad de Falla</i>	68
<i>Tabla 4-11. Resultados de Modelación Con Nivel Freático y Cálculo de Probabilidad de Falla</i>	72
<i>Tabla 4-12. Calculo de Resistencia Lateral Última</i>	78
<i>Tabla 4-13. Calculo de Resistencia Axial Última</i>	79
<i>Tabla 4-14. Calculo de Deformación a Flexión de la Tubería</i>	80
<i>Tabla 4-15. Calculo de Deformación axial de la tubería</i>	81
<i>Tabla 4-16. Calculo de Deformación Crítica</i>	82
<i>Tabla 4-17. Calculo de Deformación Unitaria - % Vulnerabilidad</i>	83
<i>Tabla 4-18. Calculo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 30m</i>	84
<i>Tabla 4-19. Calculo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 60m</i>	85
<i>Tabla 4-20. Calculo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 90m</i>	86
<i>Tabla 4-21. Calculo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 120m</i>	87
<i>Tabla 4-22. Calculo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 150m</i>	88
<i>Tabla 4-23. Calculo del desplazamiento del terreno</i>	89
<i>Tabla 4-24. Valores de Inflamabilidad</i>	90
<i>Tabla 4-25. Valores de Reactividad</i>	91

<i>Tabla 4-26. Valores de toxicidad</i>	91
<i>Tabla 4-27. Valores de peligro crónico</i>	92
<i>Tabla 4-28. Volumen liberado (lb) después de 10 minutos</i>	93
<i>Tabla 4-29. Dispersión</i>	93
<i>Tabla 4-30. Densidades Poblacionales</i>	94
<i>Tabla 4-31. Tabla de puntaje</i>	95
<i>Tabla 4-32. Probabilidad de Falla</i>	96
<i>Tabla 4-33. Vulnerabilidad</i>	96
<i>Tabla 4-34. Puntaje de Costos Asociados</i>	98
<i>Tabla 4-35. Calculo de Probabilidad</i>	98
<i>Tabla 6-1. Valores de Inflamabilidad</i>	132
<i>Tabla 6-2. Valores de Reactividad</i>	132
<i>Tabla 6-3. Valores de toxicidad</i>	133
<i>Tabla 6-4. Valores de peligro crónico</i>	133
<i>Tabla 6-5. Volumen liberado (lb) después de 10 minutos</i>	134
<i>Tabla 6-6. Dispersión</i>	135
<i>Tabla 6-7. Puntaje de acuerdo a densidades poblacionales</i>	135
<i>Tabla 6-8. Tabla de puntaje</i>	136
<i>Tabla 6-9. Probabilidad de Falla</i>	137
<i>Tabla 6-10. Vulnerabilidad</i>	138
<i>Tabla 6-11. Puntaje de Costos Asociados</i>	138

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2-1. Representación gráfica de la Ecuación de Coulomb. Fuente: Suarez,2009.</i>	17
<i>Figura 2-2. Esquema Típico de análisis con dovelas. Fuente: Duncan y Wright, 2005.</i>	18
<i>Figura 2-3. Esquema de Fuerzas sobre una dovela en el método Bishop simplificado. Fuente: Duncan y Wright, 2005.</i>	18
<i>Figura 2-4. Mecanismo de Saturación de un talud</i>	20
<i>Figura 2-5. Movimiento y Distancia de viaje de un deslizamiento</i>	28
<i>Figura 2-6. Fuerzas Actuantes y Resistentes</i>	30
<i>Figura 2-7. Deformación de la tubería y deslizamiento juntos para W=30m. Fuente: Liu y O'Rourke,1997</i>	32
Figura 2-8. Tubería Sometida a Deformaciones permanentes del terreno en sentido transversal.	33
<i>Figura 2-9. Curva esfuerzo deformación. Fuente: API,1990.</i>	38
<i>Figura 2-10 Modelo para la Evaluación de Riesgo por Operación de Ductos</i>	40
<i>Figura 3-1 Localización general del Poliducto Medellín – Cartago</i>	45
<i>Figura 3-2 . Panorámica Tramo de Estudio</i>	46
<i>Figura 3-3. Geología Regional del Área de Estudio. Fuente: Estudio suelos Ecopetrol,2014</i>	48
<i>Figura 3-4. Geología Local. Fuente: Estudio suelos Ecopetrol,2014</i>	49
Figura 3-5. Localización de la Exploración. Fuente: Estudio suelos Ecopetrol,2014	51
Figura 3-6. Perfil Estratigráfico sondeo 13 y 14. Fuente: Estudio suelos Ecopetrol,2014	51
<i>Figura 3-7. Planta Topográfica Sección K14+675</i>	52
<i>Figura 3-8. Perfil Topográfico y geotécnico Sección 1_1 K14+675</i>	53
<i>Figura 4-1 Curva de amenaza Sísmica. Fuente: Datos Asociación colombiana de ingeniería sísmica de Medellín</i>	61
<i>Figura 4-2. Modelación Condición Actual Nivel Freático 2.50m, Fuente: Modelación datos propios,2016</i>	64
<i>Figura 4-3. Geometría del talud y Mecanismo de falla. Fuente: Datos propios,2016</i>	89
<i>Figura 4-4. Modelo Adaptado al proyecto. Fuente: Datos propios,2016</i>	95
<i>Figura 4-5. Costo de reparación tubería en zona de cordillera, contaminación de aguas o suelos cultivados. Fuente: Galvis,2014.</i>	97
<i>Figura 4-6. Costo de reparación en zona de cordillera, sin contaminación de aguas o suelos. Fuente: Galvis,2014.</i>	97
<i>Figura 4-7. Matriz de Probabilidad de Riesgo</i>	100

<i>Figura 4-8. Matriz de Índice de riesgo asociado</i>	100
<i>Figura 6-1. Esquema de la Metodología para la evaluación de la Amenaza</i>	123
<i>Figura 6-2. Esquema de la Metodología para la evaluación de la Vulnerabilidad</i>	129
<i>Figura 6-3. Modelo Adaptado al proyecto, Fuente: Datos propios</i>	137
<i>Figura 6-4. Esquema de la Metodología para la evaluación de la Vulnerabilidad</i>	140

ANEXOS

Anexo: análisis de amenaza

Anexo 1: parámetros geotécnicos

Anexo 2: análisis sísmico

Anexo 3: análisis de lluvias

Anexo 4: escenarios de diseño

Anexo 5: modelaciones slide

Anexo: análisis de vulnerabilidad

Anexo 6: calculo desplazamiento máximo de un deslizamiento y una tubería juntos

Anexo 7: cálculo de vulnerabilidad

Anexo 8: calculo desplazamiento del terreno

Anexo: análisis de riesgo

Anexo 9: matrices de riesgo

Capítulo 1

1. Aspectos Generales o Introdutorios

1.1. Introducción

Este trabajo de grado está encaminado a establecer una guía metodológica para evaluar cuantitativamente el riesgo por rotura en línea de hidrocarburos debido a deslizamientos, realizando primero: la evaluación de la amenaza por deslizamientos, analizando factores intrínsecos y detonantes, obteniendo el mecanismo de falla y la probabilidad de falla de los diferentes escenarios de diseño; segundo, determinando la vulnerabilidad de la tubería por pérdida de contención o deformación permanente del suelo, correlacionando el ancho del deslizamiento y el desplazamiento del mismo y obteniendo deformación crítica y desplazamientos máximos de la tubería basados en la propiedades intrínsecas y factores detonantes utilizando los mecanismos de falla hallados en la evaluación de la amenaza; tercero, determinando del índice de daño asociando costos de mantenimiento y reparación por pérdida de contención y derrame de hidrocarburos obteniendo matrices de riesgo donde se correlaciona la amenaza, la vulnerabilidad y el índice de riesgo obteniendo el riesgo asociado, con el fin de garantizar la integridad del ducto y minimizar los peligros y daños que se puedan ocasionar, ya que las afectaciones debido al rompimiento de la tubería han adquirido gran importancia debido a los accidentes industriales que han ocasionado graves consecuencias de orden social y económico.

La evaluación del riesgo por deslizamientos cobra gran importancia debido a que la materialización del mismo ha generado impactos de manera negativa, que han afectado a la población causando muertes, daños en la infraestructura y daños ambientales; se han reportado 84 roturas por amenazas naturales en la red Nacional de Poliductos, Oleoductos y Gasoductos de Colombia en mas de 12.000 Km en los últimos 40 años (Amortegui, 2011); no obstante la accidentalidad en ductos construidos a nivel mundial durante el periodo de 1970 a 1995, dejaron 500 incidentes que arrojaron 2000 muertos, 3000 lesionados y casi un centenar de países afectados. El 53% de los incidentes reportados se suscitaron en ductos de gas natural, 18% con gas licuado de petróleo, 17% con crudo y 7% con gasolina (Olivera y Rodriguez, 2005).

Las amenazas naturales como los deslizamientos, obedecen a una cadena de procesos que se surten a lo largo del tiempo, y estos procesos se deben a las condiciones originales del terreno, a la modificación de las mismas y a los factores detonantes, estos tres procesos van a ayudar en última instancia a generar o activar los deslizamientos, por lo que no es fácil predecir en donde ni cuando se van a presentar (Suarez, 1998).

Las afectaciones causadas por deslizamientos a elementos expuestos como las líneas de conducción de hidrocarburos dependerán de la respuesta de la tubería como consecuencia de los límites de esfuerzo permisible, usualmente expresados como porcentajes de fluencia mínima especificada, sobre varios componentes de esfuerzo y para diferentes condiciones de carga impuesta por los deslizamientos (García y Acosta, 1995).

Actualmente, existen modelos para evaluar la vulnerabilidad de la tubería frente a los deslizamientos, por lo tanto, se deben utilizar criterios subjetivos para estimar el potencial de daño debido a que no se conoce la relación entre las presiones de tierra y los daños sobre la tubería, tipos de daños y magnitud de los mismos ante los deslizamientos.

1.2. Objetivos del Estudio

1.1.1 objetivo general.

Establecer una metodología para evaluación cuantitativa del riesgo por rotura en líneas de hidrocarburos debido a deslizamientos.

1.1.2 objetivos específicos.

- Evaluar la amenaza por deslizamientos.
- Evaluar la vulnerabilidad de la tubería con base en las deformaciones causadas por deslizamientos perpendiculares al eje de la tubería.
- Cuantificar el índice de daño causado por la rotura de la tubería en términos de derrame de hidrocarburos.
- Proponer una metodología para la evaluación cuantitativa del riesgo por rotura en líneas de hidrocarburos debido a deslizamientos.

1.3. Componentes del estudio

Este estudio se encuentra dividido en tres partes, en primer lugar, un componente teórico en el cual se incluyen los conceptos más relevantes del estudio en términos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. Como segundo componente se tiene el desarrollo de los componentes del riesgo, los resultados y su análisis. Y como tercer y último componente

1.1.3 componente I.

se tiene la metodología del riesgo.

El componente I, está integrado por los capítulos 2 y 3:

- Capítulo 2.1: En este se describen los aspectos más relevantes de la amenaza referentes a la resistencia al corte, análisis de estabilidad, método de análisis superficial infiltración del suelo, métodos probabilísticos y análisis de probabilidad de falla.
- Capítulo 2.2: En este se describen los aspectos más relevantes de la vulnerabilidad referentes a el desplazamiento del suelo, fuerzas resistentes del suelo sobre la tubería, deformación de la tubería, comportamiento de la tubería y grados de acero.
- Capítulo 2.3: En este se describen los aspectos más relevantes de la evaluación de índice de daños referentes a la peligrosidad del producto derramado, volumen liberado, factor de dispersión, características del receptor, costos asociados al derrame y finalmente se obtiene la matriz del índice de riesgo.
- Capítulo 3: En este capítulo se incluye primero la descripción del sitio y el material de estudio en sus condiciones naturales, empezando por una pequeña descripción geológica, el modelo geológico geotécnico y la descripción de los niveles estratigráficos. Y en segundo lugar la definición de parámetros de la tubería que se utilizara.

1.1.4 componente II.

El componente II, está integrado por los capítulos 4 y 5:

- Capítulo 4.1: Se presenta la forma como se estructuro el desarrollo de la amenaza y la descripción de cada una de las actividades como la obtención de los parámetros

geomecánicos a partir de un análisis probabilístico, la determinación de los factores detonantes, definición de escenarios de diseño y resultados de factores de seguridad y probabilidad de falla.

- Capítulo 4.2: Se presenta la forma como se estructuró el desarrollo de la vulnerabilidad y la descripción de cada una de las actividades como la definición de anchos de deslizamiento, definición de parámetros de la tubería, obtención de fuerzas resistentes, cálculo de deformación de la tubería y desplazamiento del suelo y finalmente la obtención del porcentaje del índice de vulnerabilidad de la tubería.
- Capítulo 4.3: Se presenta la forma como se estructuró el desarrollo del índice de riesgo y la descripción de cada una de las actividades como la determinación de la peligrosidad del producto derramado, el volumen liberado, definición del factor de dispersión, del receptor, cálculo de probabilidad y cuantificación del riesgo, evaluación de costos asociados al derrame y finalmente la obtención de la matriz del índice de riesgo.
- Capítulo 5: Se presentan los análisis de resultados y conclusiones obtenidas a partir del desarrollo del trabajo.

1.1.5 componente III.

El componente III, está integrado por el capítulo 6:

- Capítulo 6: Se presenta la metodología para la evaluación del riesgo a partir de los resultados obtenidos del desarrollo del trabajo.

Capítulo 2

2. Marco Teórico y Conceptual

2.1. Marco Teórico de la Amenaza

Es importante considerar conceptos básicos del comportamiento y análisis de estabilidad de taludes, así como los análisis de probabilidad de falla, que se describen a continuación:

2.1.1. resistencia al corte.

El comportamiento mecánico de los suelos y/o rocas tienen gran influencia en la ocurrencia de deslizamientos, por lo que sus propiedades tales como formación geológica, distribución granulométrica, peso unitario, contenido de agua, entre otros, van a condicionar la estabilidad de la masa de suelo en términos de resistencia al corte.

Por lo anterior la resistencia al corte dependerá de las presiones existentes a lo largo de la superficie de falla donde hay un incremento de esfuerzos cortantes y una disminución de la resistencia al corte, esta última depende de las fuerzas intrínsecas de los materiales tales como la cohesión y el ángulo de resistencia.

El criterio de falla de los suelos de acuerdo con las teorías tradicionales, según la ecuación de Mohr- Coulomb, se presenta a continuación:

$$\text{Ecuación 2-1.} \quad \tau = c' + (\sigma - u) \tan \varphi'$$

Dónde:

τ = Resistencia al corte.

c = Cohesión.

σ = Esfuerzo Normal Efectivo.

u = Presión de poros.

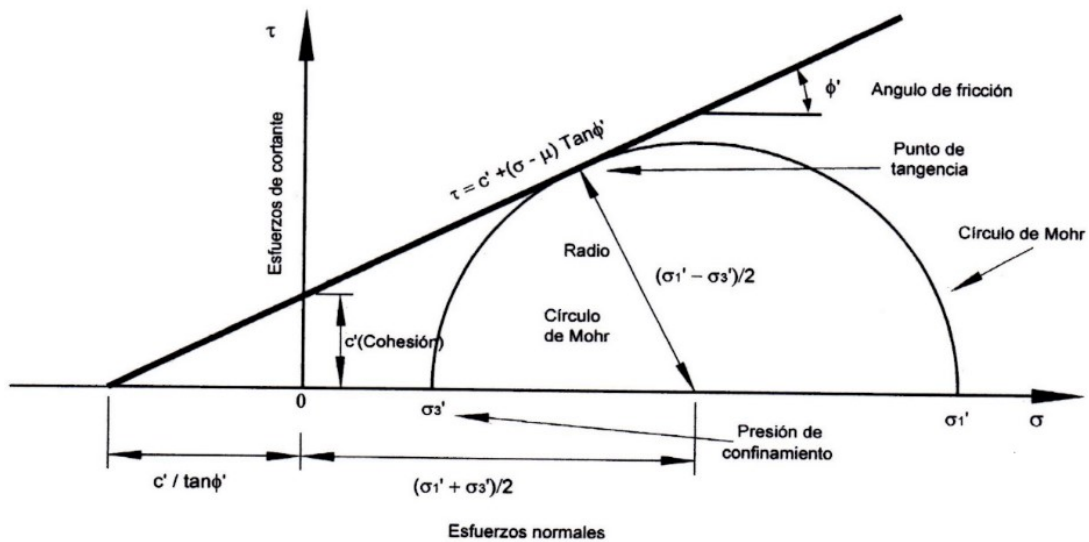
φ' = Ángulo de Resistencia.

La ecuación de la resistencia al corte se compone de dos términos, el primer término corresponde a la cohesión y el segundo término a la fricción, a continuación, se explica cada uno de los términos:

- Término de cohesión, c , que depende del contenido de humedad, el estado de entrelazamiento de partículas y la adhesión electroquímica.
- Término de fricción, el cual es proporcional al esfuerzo total sobre el plano considerado, donde ϕ' es el ángulo de resistencia al corte.

De acuerdo con la representación gráfica de la ecuación de Mohr- Coulomb, ver Figura 2-1, El análisis de la ecuación requiere conocer los parámetros de ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas de los suelos (Suarez,2009).

Figura 2-1. Representación gráfica de la Ecuación de Coulomb. Fuente: Suarez,2009.



2.1.2. análisis de estabilidad.

Los análisis de estabilidad comprenden la evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales, estudia su comportamiento ante las condiciones de trabajo con el objeto de:

Determinar las condiciones de estabilidad del talud.

Investigar los mecanismos potenciales de falla.

Determinar la susceptibilidad de diferentes mecanismos de activación.

Los tipos de falla a analizar son translacional y rotacional, por lo que el análisis de estabilidad de taludes estará enfocado al método de equilibrio límite el cual permite obtener un factor de seguridad, obtener valores de resistencia al corte en el momento de la falla. Una vez se han determinado las propiedades de resistencia al cortante de los suelos, las presiones de poros y otras propiedades de los suelos y del talud, se puede proceder a calcular el factor de seguridad.

Este análisis de estabilidad consiste en determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos cortantes que tienden a causar la falla o deslizamiento.

Para el análisis del trabajo se utilizó el método de Bishop simplificado, ver Figura 2-2, con superficies de falla circulares, equilibrio de momentos, donde se asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero, este método consiste en dividir el área de falla en tajadas verticales o dovelas, ver Figura 2-3, donde ese tiene en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas, donde supone que las fuerzas laterales entre tajadas son horizontales y desprecia las fuerzas de cortante (Suarez,2009).

Figura 2-2. Esquema Típico de análisis con dovelas. Fuente: Duncan y Wright, 2005.

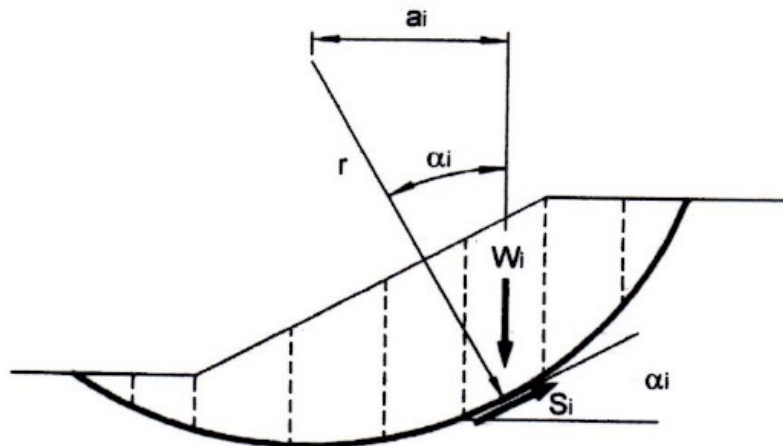
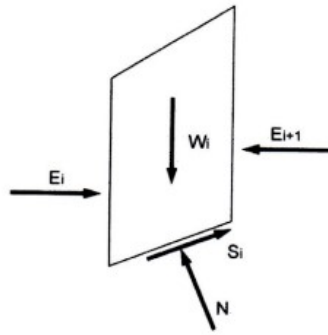


Figura 2-3. Esquema de Fuerzas sobre una dovela en el método Bishop simplificado. Fuente: Duncan y Wright, 2005.



La solución numérica está dada por:

Ecuación 2-2.
$$FS = \frac{\sum \left[\frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W - u \Delta l \cos \alpha) \tan \phi}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \phi) / FS} \right]}{\sum W \sin \alpha}$$

Dónde:

Δl =Longitud de arco de la base de la dovela.

W =Peso de cada dovela.

c', ϕ =Parametros de resistencia del suelo.

u =Presión de poros en la base de cada dovela.

α =Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

Como se puede observar en la ecuación se requiere un proceso de iteración para calcular el factor de seguridad.

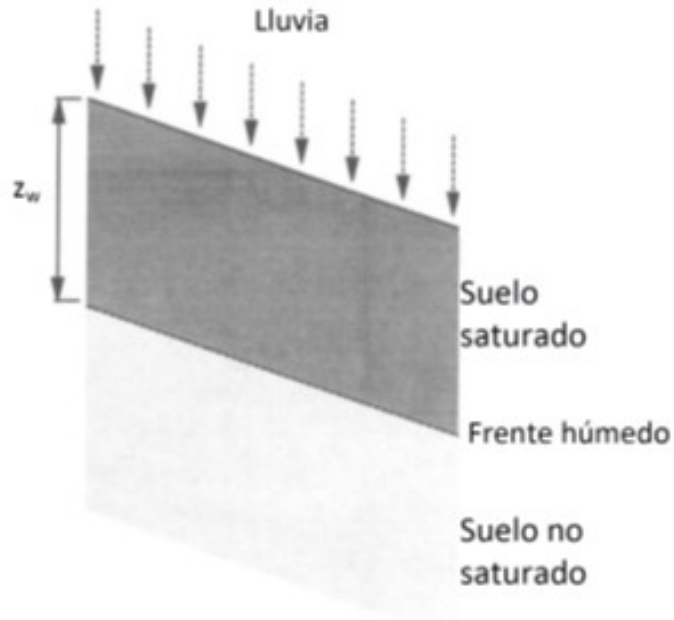
El método de Bishop Simplificado es uno de los métodos más utilizados para el cálculo de factores de seguridad de los taludes debido a que satisface el equilibrio de momentos y se considera que los resultados son muy precisos en comparación con el método ordinario.

2.1.3. método de análisis superficial infiltración del suelo.

Para el análisis de la respuesta hidrológica del talud se utilizará el modelo de Pradel y Raad (1999) que es básicamente para deslizamientos superficiales, donde se asume que la forma de la superficie de falla es plana. Esta simplificación es generalmente válida debido a que los deslizamientos tienen un bajo espesor en comparación con la longitud y ancho del

volumen desplazado y de los taludes. Es así que la estabilidad puede analizarse mediante un talud infinito usando el método de equilibrio límite.

Figura 2-4. Mecanismo de Saturación de un talud



Durante la precipitación, el agua se infiltra en el suelo, saturando las capas superiores, Figura 2-4. Debido a esto, se incrementa la presión de poros la cual reduce la resistencia del suelo. Cuando los suelos superficiales se encuentran sobre un material más impermeable, el flujo se da paralelo al talud. Esta condición reduce el factor de seguridad del talud y puede causar la falla (Pradel, D., & Raad, G.,1993). Con el fin de estimar la profundidad crítica en la cual se presentará la falla, se hacen las siguientes consideraciones respecto al proceso de infiltración.

Para que se presente la falla, el suelo previamente debe saturarse. Los requerimientos mínimos para alcanzar la saturación en la superficie del talud son:

- Lluvia lo suficientemente intensa para exceder la razón de infiltración del suelo
- Lluvia lo suficientemente larga para saturar el talud a una profundidad z_w .

La proporción a la cual el suelo no saturado se humedecerá es crítica para la estabilidad superficial del talud. Un simple modelo de infiltración, basado en la ley de Darcy, fue propuesta por Green y Ampt (1911). Este modelo se basa en las siguientes simplificaciones:

- La superficie del suelo es continuamente humedecida,
- Se puede apreciar claramente un frente húmedo,
- El coeficiente de permeabilidad en la zona húmeda (k_w) no cambia con el tiempo, y
- Existe una presión de poros negativa constante justo por encima del frente húmedo.

De acuerdo con el modelo, el tiempo necesario para saturar el suelo a una profundidad z_w es:

$$\text{Ecuación 2-3.} \quad T_w = \frac{\mu}{k_w} \left[z_w - S \ln \left(\frac{S+z_w}{S} \right) \right]$$

Donde μ es la porosidad humedecible, la cual se puede expresar como la diferencia entre los contenidos de humedad volumétricos antes y después de la saturación ($\theta_w - \theta_i$). S es la succión en el frente húmedo. La razón de infiltración, v_i , es la razón a la cual el agua entra a la superficie del suelo. El modelo de Green y Ampt predice:

$$\text{Ecuación 2-4.} \quad v_i = k_w \left(\frac{S+z_w}{z_w} \right)$$

La primera condición para la saturación requiere que la intensidad de la lluvia I sea mayor que la razón de infiltración v_i . La segunda condición requiere que la precipitación dure más que T_w . Por lo tanto, los requerimientos mínimos para saturar el suelo a una profundidad z_w :

$$\text{Ecuación 2-5.} \quad T_{min} = T_w$$

$$\text{Ecuación 2-6.} \quad I_{min} = v_i$$

Al combinar la Ecuación 2-3 y Ecuación 2-6, se puede relacionar I_{min} y T_{min} :

$$\text{Ecuación 2-7.} \quad I_{min} = \frac{\mu}{T_{min}} \left[z_w - S \ln \left(\frac{S+z_w}{S} \right) \right] \left(\frac{z_w+S}{z_w} \right)$$

Combinando la Ecuación 2-4 y Ecuación 2-7, se puede obtener:

$$\text{Ecuación 2-8.} \quad k_{min} = I_{min} \left(\frac{z_w}{z_w+S} \right) = \frac{\mu}{T_{min}} \left[z_w - S \ln \left(\frac{S+z_w}{S} \right) \right]$$

Donde k_{min} es la permeabilidad máxima que permitirá la saturación a la profundidad z_w . Hay que hacer la observación que esta ecuación no considera los efectos de la escorrentía y la evapotranspiración.

Una vez obtenido z_w , se procede al análisis mediante equilibrio límite.

2.1.4. métodos probabilísticos.

Existen varios procedimientos probabilísticos para el análisis de estabilidad de taludes los cuales varían en suposiciones, limitaciones, capacidad de manejar problemas complejos y complejidad matemática. La mayoría de ellos pertenecen a dos categorías: métodos aproximados (Primer Orden Segundo Momento, Estimativos Puntuales, Hasofer-Lind) y simulación de Monte Carlo (El-Ramly H., Morgenstern N.R., & Cruden D.M.,2002).

Los métodos aproximados hacen suposiciones simplificadas que generalmente limitan su aplicación a tipos de problemas específicos. Muy a menudo se ignoran la variabilidad espacial de las propiedades del suelo. Los métodos aproximados permiten la estimación de la media y la varianza del factor de seguridad.

Para este análisis se utilizará el método aproximado de Estimativos Puntuales el cual se explicará a continuación:

2.1.4.1. estimativos puntuales.

El Método de Estimativos Puntuales es capaz de estimar los momentos estadísticos de la variable dependiente en función de las variables aleatorias independientes, para las cuales se conocen por lo menos dos momentos, media y desviación estándar (o por lo menos sus estimativas), sin la necesidad de conocer las distribuciones de probabilidad completas de las variables independientes o de la dependiente.

La idea básica de este método consiste en sustituir las distribuciones probabilísticas de las variables aleatorias continuas por distribuciones discretas equivalentes, las cuales tendrán los mismos tres primeros momentos centrales. Luego se calcula la media, desviación estándar y asimetría de la función de comportamiento.

Debe considerarse una función de comportamiento y dependiente de n variables aleatorias X_i . Dichas variables son simétricas y están correlacionadas. El proceso escoge 2^n puntos

de tal forma que el valor de cada variable esta una desviación estándar por arriba y por debajo de la media. Estos puntos se conocen como puntos de muestreo. Al conocer el valor medio μ_{X_i} y la desviación estándar σ_{X_i} de las variables aleatorias, la ubicación de los puntos de muestreo x_{i+} y x_{i-} pueden ser calculados de la siguiente forma:

$$\text{Ecuación 2-9.} \quad x_{i+} = \mu_{X_i} + \xi_{X_{i+}} \sigma_{X_i}$$

$$\text{Ecuación 2-10.} \quad x_{i-} = \mu_{X_i} + \xi_{X_{i-}} \sigma_{X_i}$$

Donde las desviaciones estándar unitarias $\xi_{X_{i+}}$ y $\xi_{X_{i-}}$ dependen de los coeficientes de asimetría v_{X_i} de las variables aleatorias. Estas se calculan mediante:

$$\text{Ecuación 2-11.} \quad \xi_{X_{i+}} = \frac{v_{X_i}}{2} + \sqrt{1 + \left(\frac{v_{X_i}}{2}\right)^2}$$

$$\text{Ecuación 2-12.} \quad \xi_{X_{i-}} = \frac{v_{X_i}}{2} - \sqrt{1 + \left(\frac{v_{X_i}}{2}\right)^2}$$

Ahora es posible calcular el valor de la función de comportamiento utilizando los puntos de muestreo o estimativos x_{i+} y x_{i-} . Para n variables aleatorias, la función se evalúa en 2^n puntos.

2.1.5. análisis de probabilidad de falla.

Las propiedades de los suelos tienen alta variabilidad, es por esta razón que se deben obtener parámetros estadísticos relacionados con la variabilidad del suelo como lo son (Russelli, C.,2008).:

- El valor medio
- La desviación Estándar
- La asimetría
- Coeficiente de correlación

A continuación, se presentan las ecuaciones y definiciones de los parámetros estadísticos anteriormente mencionados:

- Valor medio:

El valor medio de una variable aleatoria, también definido como primer momento central o valor esperado es la suma de la probabilidad de cada posible resultado de un experimento multiplicado por su valor. Por lo tanto, representa el promedio de todos los datos experimentales disponibles.

$$\text{Ecuación 2-13.} \quad u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

- Varianza:

La varianza conocida como el segundo momento central o momento de inercia de la variable. Este valor indica que tan distantes están los valores del valor medio. A continuación, se presenta las ecuaciones de la varianza del intercepto y la pendiente de la correlación.

$$\text{Ecuación 2-14.} \quad \text{Var} (\tan \phi) = \frac{\sigma^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - u)^2}$$

$$\text{Ecuación 2-15.} \quad \text{Var} (C) = \sigma^2 * \frac{\sum_{i=1}^n (X_i)^2}{n * \sum_{i=1}^n (X_i - u)^2}$$

Dónde:

X = Esfuerzo Vertical efectivo

n = Número de datos

- Desviación Estándar:

Una medida más clara de la dispersión es la desviación estándar σ calculada a partir de la raíz cuadrada de la varianza, calculada ya sea para el intercepto o para la pendiente.

$$\text{Ecuación 2-16.} \quad \sigma_X = \sqrt{\sigma^2_X}$$

En cuanto al Método Probabilístico que se empleará para efectuar el análisis geotécnico por confiabilidad es el Método de los Estimativos Puntuales (MEP), con el fin de obtener valores aproximados del Índice de Confiabilidad y la Probabilidad de Falla.

Diferentes metodologías han surgido con el fin de mejorar las aproximaciones empíricas basadas principalmente en el método observacional, dentro de estas metodologías se

encuentra el diseño basado en la confiabilidad en el cual las propiedades del suelo y las solicitaciones se caracterizan como funciones probabilísticas. La variabilidad inherente de las propiedades geomecánicas de los suelos y de las cargas aplicadas hace que los diseños desarrollados en términos determinísticos no sean óptimos en términos económicos y a la vez no se tenga una idea de la cuantificación de la incertidumbre asociada. Diseños basados en confiabilidad permiten analizar de mejor forma el desempeño de una estructura geotécnica en términos de probabilidades de falla en vez de los tradicionales factores de seguridad.

El análisis geotécnico debe asegurar que los diseños cumplan requisitos de funcionalidad, seguridad, resistencia y economía dentro de unos límites razonables. Para lograr ese propósito lo usual es transformar las condiciones de trabajo de la estructura a analizar en modelos matemáticos, donde se idealizan tanto los parámetros geomecánicos del terreno como las acciones impuestas en el mismo.

El análisis de confiabilidad permite que la incertidumbre pueda ser manejada de una forma más rigurosa en los procesos de diseño geotécnico. En los últimos años se ha despertado un gran interés por introducir en los estudios geotécnicos metodologías que permitan una evaluación racional de la incertidumbre asociada con dichos procesos. Es así como han sido usados métodos estadísticos para evaluar el riesgo de movimientos de masa, estabilidad de taludes, en diferentes aplicaciones en la geotecnia se han usado métodos estadísticos como por ejemplo en la evaluación de confiabilidad e incertidumbre en mecánica de rocas y desastres naturales, entre otras. Además, han sido usados para la obtención de índices para la evaluación del riesgo, evaluación de la probabilidad de falla y de la amenaza.

De manera específica debe hacerse mención de las expresiones básicas a utilizar en cuanto a probabilidad de falla e índice de confiabilidad, siendo estas:

- Probabilidad de Falla e Índice de Confiabilidad:

$$\text{Ecuación 2-17.} \quad P(f) = P(FS \leq 1)$$

Cuando el comportamiento de la información analizada sigue un comportamiento Log Normal, la probabilidad de falla se calcula en función del Índice de Confiabilidad utilizando la expresión:

$$\text{Ecuación 2-18.} \quad P(f) = 1 - \Phi(\beta)$$

Para la determinación de la confiabilidad, se usará el índice de confiabilidad, β , del coeficiente o factor de seguridad (FS), definido por la siguiente expresión, una vez que el FS crítico es igual a 1,0:

$$\text{Ecuación 2-19.} \quad \beta = \frac{(E[FS]-1)}{\sigma[FS]}$$

Dónde:

$E[FS]$ = Es el valor esperado del factor de seguridad, es decir, el factor de seguridad calculado con los parámetros medios de las variables independientes.

$\sigma[FS]$ = Es la desviación estándar del factor de seguridad.

Es claro que para el cálculo del factor de seguridad se utilice una distribución de probabilidad Log normal, así como también se deberán utilizar para las distribuciones de la resistencia del suelo y las cargas aplicadas.

La probabilidad de falla está dada por la porción del área bajo curva unitaria de distribución de frecuencia (función densidad de probabilidad) del FS correspondiente a los valores de FS inferiores a 1.0. Esta se puede determinar de cualquier tabla de función de distribución de probabilidades Log normal con media 0 y desviación estándar.

2.2. Marco Teórico de Evaluación de la Vulnerabilidad

Para el análisis de tuberías enterradas, se considera el riesgo de deformación permanente del suelo (PGD), que se refiere a la tensión de tuberías debido a deslizamientos de tierra, asentamiento del terreno o licuefacción. Al examinar el peligro de deformación permanente del suelo (PGD), hay que distinguir entre PGD longitudinal y PGD transversal.

PGD Longitudinal se refiere al movimiento del suelo paralelo al eje de la tubería, mientras que PGD transversal se refiere al movimiento del suelo perpendicular al eje de la tubería.

En general, cualquier deformación del suelo arbitraria se puede descomponer en una componente longitudinal y una transversal.

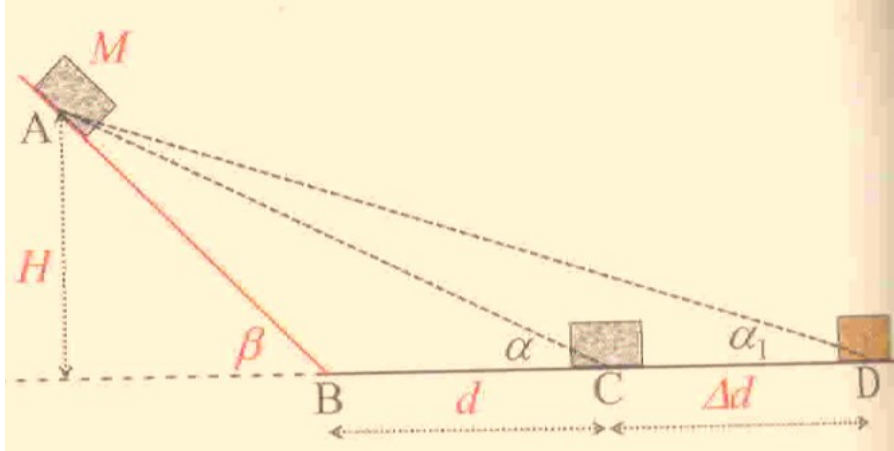
Cuando la PGD esté transversal, una tubería continua se estira y dobla en su intento de acomodar el movimiento de tierras transversal. El modo de falla de la tubería depende entonces de la cantidad relativa de tensión axial (estiramiento) y la tensión a la flexión (flexión). Es decir, si la fuerza de tensión axial es baja, la pared del tubo se puede doblar en compresión debido a la flexión excesiva. Por otra parte, si la tensión axial es grande, el tubo puede romperse en tensión debido a los efectos combinados de la tensión axial y flexión. La respuesta de la tubería ante una PGD transversal es, en general, una función de la cantidad de movimiento de tierras δ , el ancho W de la zona de PGD, así como el patrón de deformación del suelo (O'Rourke, 1997).

Uno de los primeros elementos necesarios para evaluar la respuesta de tuberías es el patrón de deformación del suelo, es decir, la variación de desplazamiento del suelo a través del ancho de la zona de PGD. Diferentes investigaciones han utilizado diferentes modelos en sus análisis.

2.2.1. desplazamiento del suelo.

Los grandes y rápidos deslizamientos de tierra con largas distancias de viaje implican roca fracturada y fragmentos de suelo y partículas. Tales materiales son básicamente geomateriales granulares. Para este tipo de materiales, el proceso de deslizamiento hacia abajo en una pendiente por gravedad se completa y se detiene cuando alcanza el ángulo de reposo. El ángulo de reposo es el ángulo mínimo de una pendiente de escombros granular, para moverse y deslizarse por una pendiente sólo la fuerza de gravedad lo puede realizar. Este ángulo de reposo es en promedio 26° para limos y 36° para gravas. Para relleno de roca fracturada, el ángulo de reposo puede ser 40° . Su valor normal es de aproximadamente 30° . Es igual al ángulo de fricción interna de los materiales granulares en estado suelto. Sin embargo, los ángulos de viaje para tal deslizamiento de tierra grande y rápido, con largas distancias de viaje son por lo general mucho menores que sus ángulos de reposo.

Figura 2-5. Movimiento y Distancia de viaje de un deslizamiento



En la Figura 2-5 se muestra un ejemplo típico de un deslizamiento sobre una pendiente de A a B y que se mueve continuamente sobre un terreno plano con la pendiente de B a C. Los escombros tienen una masa M en el punto A y una altura H . La superficie del talud es un plano con un ángulo medio de inclinación β y un ángulo de fricción medio φ . La energía potencial total de los escombros es MgH , donde g es la aceleración de la gravedad. Usando la ley de Newton del movimiento, las siguientes ecuaciones se pueden obtener en las condiciones que $\beta > \varphi$.

Ecuación 2-20. $Mg \sin \beta - Mg \cos \beta \tan \varphi = Ma(t)$ de A a B

Ecuación 2-21. $-Mg \tan \varphi = Ma(t)$ de B a C

La velocidad máxima de A a B de los escombros de deslizamiento, se puede expresar por.

Ecuación 2-22. $V_{AB} = \sqrt{2Hg \left(1 - \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}\right)}$

Si asumiendo la pérdida de energía del impacto en el punto del pie del deslizamiento es igual a cero, los escombros tendrían un cambio completo de dirección es la velocidad a la horizontal a lo largo del terreno plano de B a C. La distancia d deslizamiento entre B y C en el terreno plano, donde para los escombros es (World Landslide Forum 3).

Ecuación 2-23. $d = \left(1 - \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}\right) \frac{H}{\tan \varphi}$

2.2.2. fuerzas resistentes del suelo sobre la tubería.

Los deslizamientos han sido históricamente una importante amenaza para tuberías en terreno accidentado en todo el mundo, pero el historial de casos publicados es escaso. Datos históricos han sido reunidos por periódicos colombianos, sitios visitados y otras fuentes donde se destacan 32 casos de roturas en tuberías de los cuales 23 son en tuberías enterradas (Sweeney, Gasca, García Lopez, Palmer).

Los deslizamientos del terreno originan grandes desplazamientos en la tubería enterrada que pueden generar deformaciones temporales, permanentes y llegar hasta la rotura, es por esto que la vulnerabilidad de la misma frente a los daños que puedan sufrir es alta.

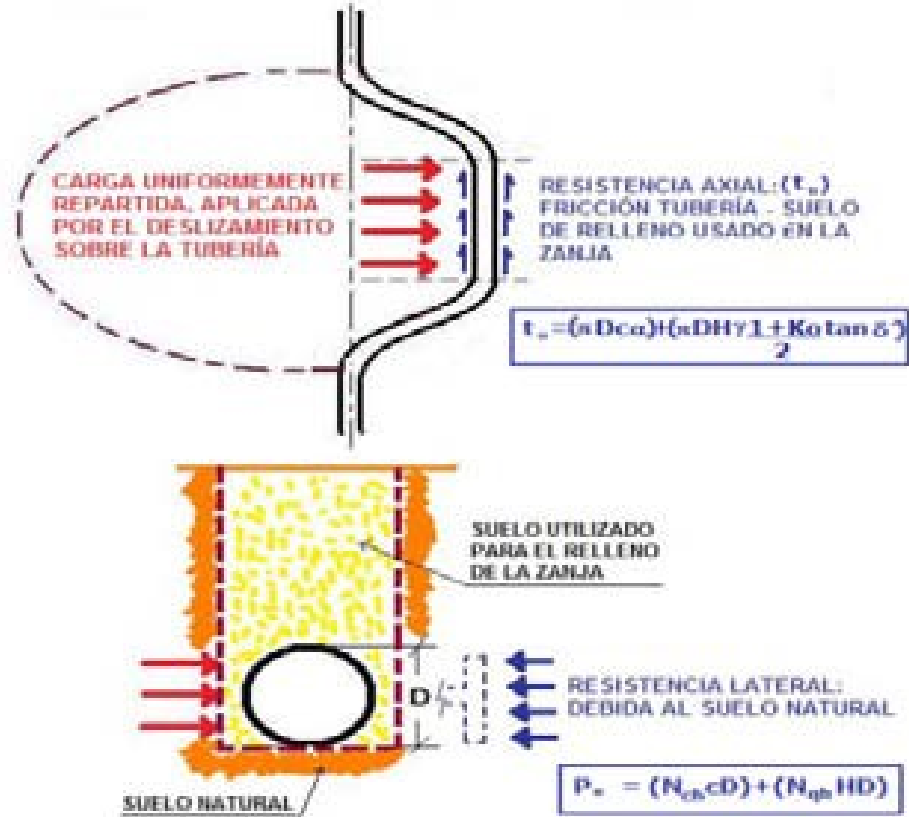
Dentro del análisis del comportamiento de tuberías afectadas por deformaciones permanentes del terreno se debe distinguir entre deformaciones longitudinales, causadas por movimientos del suelo paralelos al eje de la tubería, y deformaciones transversales que ocurren como resultado de movimientos del suelo perpendiculares el eje de la misma.

Con el fin de relacionar los desplazamientos causados por la acción de un deslizamiento que actúa perpendicular al eje de la tubería, se estimaron siguiendo la metodología propuesta por Liu y O'Rourke (1997), para una tubería elástica.

Un ducto sometido a esfuerzos laterales tiende a alargarse y a doblarse, en un intento por acomodarse al movimiento causado por el deslizamiento. El modo de falla depende de la cantidad relativa de tensión axial y de momento flector. Si los esfuerzos de tensión son bajos, la tubería puede doblarse en forma excesiva debido a los esfuerzos de flexión. En cambio, si las tensiones axiales son grandes, la tubería puede romperse a causa del efecto combinado de los esfuerzos de tensión y de flexión.

En la Figura 2-6, donde la fuerza actuante sobre la tubería se considera como una carga uniformemente repartida, el movimiento de la tubería contra el suelo genera dos fuerzas resistentes, a saber, una lateral, P_u , y otra axial, t_u .

Figura 2-6. Fuerzas Actuantes y Resistentes



La fuerza resistente lateral P_u depende de las propiedades de resistencia del suelo natural, y está dada en unidades de Fuerza por Unidad de Longitud.

Ecuación 2-24.
$$P_u = N_{ch} * c * D + N_{qh} * \gamma * HD$$

Dónde:

N_{ch} Y N_{qh} : Factores empíricos de capacidad portante lateral. Dependen del ángulo de fricción interna del suelo natural (HANSEN, Brinch J, 1961).

c : Cohesión del suelo natural.

D : Diámetro externo del tubo.

γ : Peso efectivo del suelo natural.

H : Espesor del suelo arriba del centro de la tubería.

N_{ch} : Factor de capacidad portante horizontal de suelos cohesivos (0 para $c = 0$).

Ecuación 2-25.
$$N_{ch} = a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \leq 9$$

N_{qh} : Factor de capacidad portante horizontal de suelos arenosos (0 para $\varphi = 0$).

Ecuación 2-26.
$$N_{qh} = a + b(x) + c(x)^2 + d(x)^3 + e(x)^4$$

Tabla 2-1. Factores de capacidad portante lateral para diferentes ángulos de fricción

Factor	φ	X	a	b	c	d	e
Nch	0,00°	H/D	6,752	0,065	-11,063	7,119	0
Nqh	20,00°	H/D	2,399	0,439	-0,03	1,059E-03	-1,75E-05
Nqh	25,00°	H/D	3,332	0,839	-0,09	5,61E-03	-1,32E-04
Nqh	30,00°	H/D	4,565	1,234	-0,089	4,28E-03	-9,16E-05
Nqh	35,00°	H/D	6,816	2,019	-0,146	7,65E-03	-1,68E-04
Nqh	40,00°	H/D	10,959	1,783	0,045	-5,43E-03	-1,15E-04
Nqh	45,00°	H/D	17,658	3,309	0,048	-6,44E-03	-1,30E-04

Fuente: Resultados tesis propia

Para que P_u pueda desarrollarse es necesario que se produzca un desplazamiento mayor o igual a:

Ecuación 2-27.
$$\Delta_{desplazamiento} = 0.04 \left(H + \frac{D}{2} \right) \leq 0.01D \text{ a } 0.02D$$

La fuerza resistente axial, t_u corresponde a la fricción que se genera en la interacción tubería – suelo. En este caso el suelo corresponde al material de relleno que se haya utilizado para rellenar la zanja dentro de la cual se instaló la tubería.

Ecuación 2-28.
$$t_u = \pi D c \alpha + \pi D H \gamma * \frac{1+K_0}{2} \tan \delta'$$

Dónde:

D : Diámetro externo del tubo.

c : Cohesión del suelo de relleno.

α : Factor de adhesión.

H : Espesor del suelo arriba del centro de la tubería.

γ : Peso efectivo del suelo de relleno.

φ : Ángulo de fricción interna del suelo de relleno.

K_0 : Coeficiente de presión de tierras en reposo. $K_0 = 1 - \text{seno}(\varphi)$

δ' : Ángulo de fricción en la interface tubo - suelo de relleno.

Para que t_u pueda desarrollarse es necesario que se produzca un desplazamiento mayor o igual a:

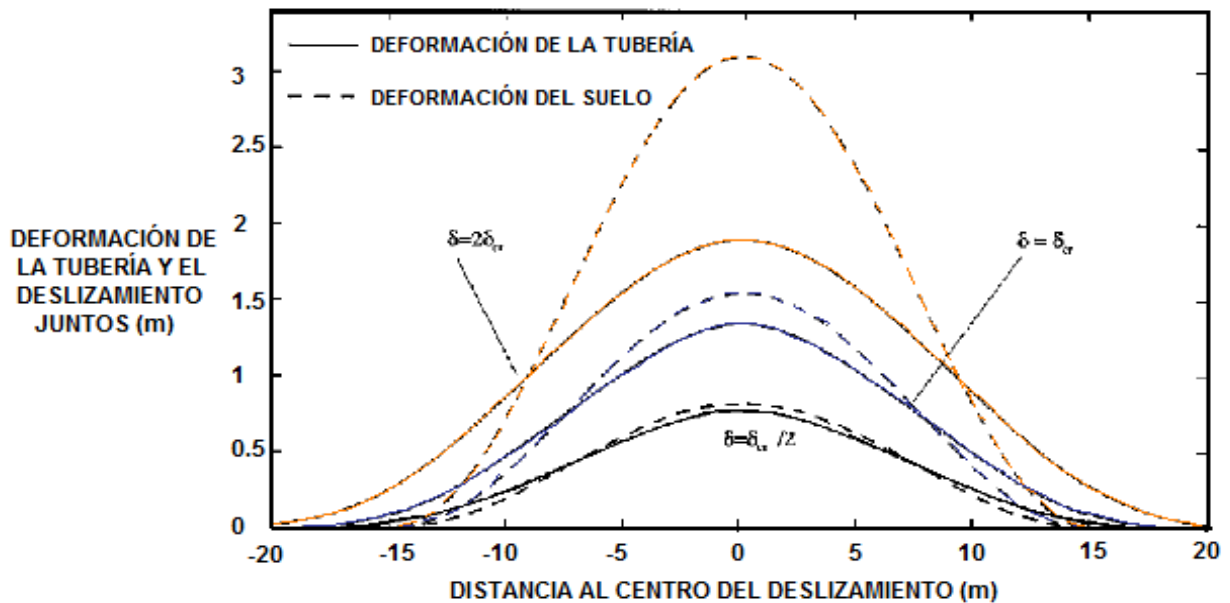
- 3 a 5 mm, para arenas densas a sueltas
- 8 a 10 mm, para arcillas duras a blandas

Estas ecuaciones aparecen recomendadas en el Código ALA (2001) para realizar la modelación de tuberías continuas.

Para el cálculo de deformaciones unitarias de la tubería de acuerdo con Liu y O'Rourke existe una deformación crítica (δ crítica) hasta la cual el tubo se mueve con la deformación del terreno (δ).

Los resultados encontrados para una deformación de la tubería igual 1/2, 1 y 2 veces la deformación crítica del conjunto deslizamiento – tubería, se puede observar en la Figura 2-7.

Figura 2-7. Deformación de la tubería y deslizamiento juntos para $W=30\text{m}$. Fuente: Liu y O'Rourke, 1997



Cuando $\delta \leq \delta_{critico}$: La deformación de la tubería se acomoda a la deformación del terreno en toda la anchura W de la zona de deformaciones permanentes del terreno.

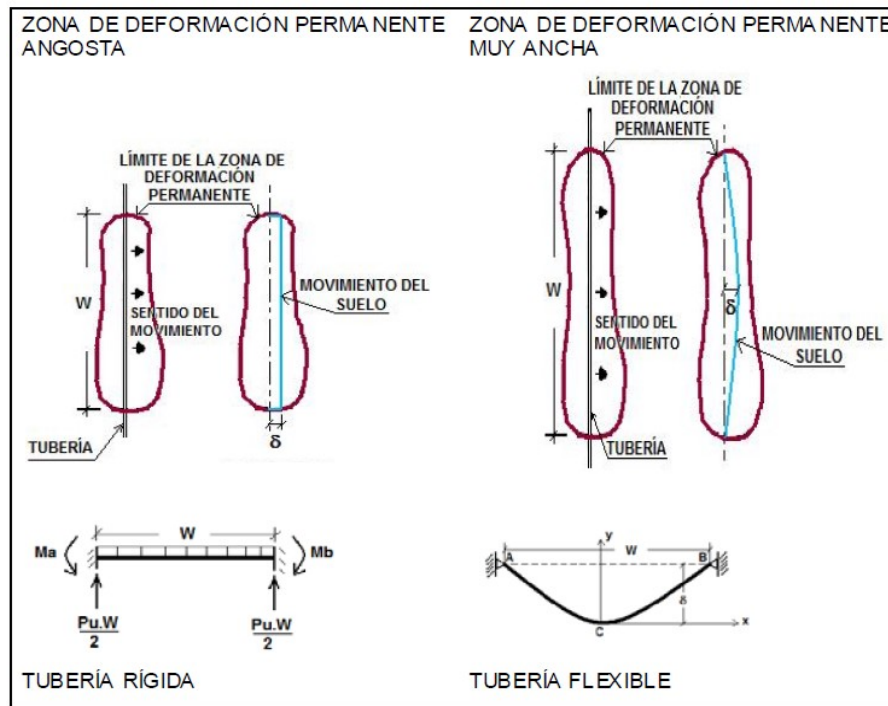
Cuando $\delta > \delta_{critico}$: El desplazamiento máximo de la tubería es menor que el desplazamiento máximo del terreno, y la curvatura de la tubería es mucho menor que la curvatura del terreno desplazado.

2.2.3. deformación de la tubería.

Como consecuencia de este comportamiento, la deformación unitaria de la tubería es una función creciente del desplazamiento del terreno δ , para $\delta \leq \delta_{critico}$, y no cambia sustancialmente para $\delta > \delta_{critico}$.

La resistencia de la tubería a un movimiento transversal del terreno es función de una combinación de las rigideces a flexión y axial de la misma. Se observan dos (2) situaciones que van a depender del ancho de la zona de deformación permanente (W), ver **Figura 2-8**.

Figura 2-8. Tubería Sometida a Deformaciones permanentes del terreno en sentido transversal.



Para anchos de la zona de deformación permanente (W) pequeñas, franja izquierda de la Figura 2-8, la deformación crítica del terreno y el comportamiento de la tubería están controlados por la flexión. Por esta razón el mecanismo planteado corresponde al de una tubería rígida, representada por una viga con 2 extremos fijos, soportando una carga distribuida uniforme, para la cual la deflexión máxima se presenta en el centro de luz. En estas condiciones la componente de flexión de la deformación crítica, $\delta_{critica-flexión}$, se calcula mediante la Ecuación 2-29.

$$\text{Ecuación 2-29.} \quad \delta_{critica-flexión} = \frac{P_u W^4}{384EI}$$

Para anchos de zona de deformación permanente (W) muy grandes, franja derecha de la Figura 2-8, la tubería se comporta como un cable flexible, razón por la cual se desprecia la rigidez a flexión, y el desplazamiento crítico es controlado por la fuerza axial. En un cable sujeto a dos puntos, que soporta una carga distribuida uniformemente a lo largo de la horizontal, de magnitud P_u por unidad de longitud, medida horizontalmente, la relación entre la fuerza axial T , en los extremos, y la deformación lateral máxima δ está dada por la Ecuación 2-30.

$$\text{Ecuación 2-30.} \quad T = \frac{P_u W^2}{8\delta}$$

En la Ecuación 2-29 y Ecuación 2-30, se consideran los siguientes parámetros:

P_u : Resistencia lateral máxima del suelo por unidad de longitud de la tubería.

W : Anchura de la zona de deformación permanente del terreno.

E : Módulo de elasticidad del material del tubo.

I : Momento de inercia de la sección de la tubería.

δ : Desplazamiento transversal del terreno.

De acuerdo con la Figura 2-7, en la mitad de la zona de deformaciones permanentes ($W/2$), el desplazamiento del suelo es mayor que el de la tubería, por lo cual la interacción suelo - tubería la máxima fuerza resistente lateral que se podrá generar por unidad de longitud de la tubería será P_u . Tomando una curva media para la región central del deslizamiento igual

a $\delta / 2$, resulta una fuerza axial de tensión, T que se relaciona con el desplazamiento del terreno según la Ecuación 2-31:

$$\text{Ecuación 2-31.} \quad T = \pi D t \sigma = \frac{P_u (W/2)^2}{8(\delta/2)} = \frac{P_u W^2}{16\delta}$$

Donde:

σ : corresponde al esfuerzo axial en el Tubo.

t: espesor de la pared del tubo.

Suponiendo que σ es constante en la zona de deformaciones permanentes del terreno y T causa un movimiento de la tubería en las márgenes de la zona de deformaciones permanentes, igual a Ecuación 2-32:

$$\text{Ecuación 2-32.} \quad \Delta = \frac{\pi D t \sigma^2}{2 E t_u}$$

Dónde:

t_u : Fuerza resistente de fricción entre la tubería y el suelo de relleno por unidad de longitud de la tubería.

La elongación total axial de la tubería, en la zona de deformaciones permanentes es aproximadamente igual a la deformación unitaria multiplicada por el ancho total del deslizamiento, W. Esta elongación también es igual a la suma de los efectos de tracción ($\sigma W/E$) y el movimiento interno en los extremos, definido según la Ecuación 2-32. Al igualar estos dos conceptos resulta la Ecuación 2-33.

$$\text{Ecuación 2-33.} \quad \frac{\pi^2 \delta^2}{4W} = \frac{\sigma W}{E} + \frac{2\pi D t \sigma^2}{2 E t_u}$$

La componente axial de la deformación crítica $\delta_{critica-axial}$ y su correspondiente esfuerzo axial σ se pueden calcular despejando δ y σ de las Ecuación 2-31 y Ecuación 2-33, donde se obtiene:

$$\text{Ecuación 2-34.} \quad \delta^4 - \left(\frac{W^4 P_u}{4\pi^3 D t E} \right) \delta - \left(\frac{W^5 P_u^2}{64\pi^3 D t E t_u} \right) = 0$$

En general, si se considera que la componente axial y de flexión involucradas en el concepto de deformación crítica actúan en paralelo, la deformación crítica δ crítica para cualquier ancho de la zona de deformaciones permanentes, W, puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$\text{Ecuación 2-35.} \quad \delta_{critica} = \frac{1}{\frac{1}{\delta_{critica-flexion}} + \frac{1}{\delta_{critica-axial}}}$$

La máxima deformación unitaria en una tubería elástica se expresa mediante las ecuaciones Ecuación 2-36 y Ecuación 2-37, que se presentan a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Ecuación 2-36.} \quad \epsilon_{elastico} &= \frac{\sigma}{E} \pm \frac{\pi^2 \delta D}{W^2} & \delta \leq \delta_{critica} \\ \epsilon_{elastico} &= \frac{\sigma}{E} \pm \frac{\pi^2 \delta_{critica} D}{W^2} & \delta > \delta_{critica} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ecuación 2-37.} \quad \frac{\sigma}{E} &= \frac{\pi \delta}{2} * \sqrt{\frac{t_u}{AEW}} & \delta \leq \delta_{critica} \\ \frac{\sigma}{E} &= \frac{\pi \delta_{critica}}{2} * \sqrt{\frac{t_u}{AEW}} & \delta > \delta_{critica} \end{aligned}$$

Dónde:

D = Diámetro externo de la tubería

A = área de la sección transversal de la tubería.

2.2.4. comportamiento de la tubería.

La importancia del comportamiento de la tubería como material dúctil que está expuesto a la vulnerabilidad ante un deslizamiento, a continuación, se presenta una breve descripción del acero.

Tanto las propiedades de los materiales del tubo, como las longitudes entre apoyos, o empotramientos, serán determinantes en el momento de soportar las grandes flexiones y curvaturas impuestas tanto por los esfuerzos de operación, como por los movimientos del suelo.

Las tuberías de acero modernas son fabricadas de aceros dúctiles con penetración completa de soldaduras a tope en las juntas. Si bien los componentes críticos de una tubería se diseñan siempre dentro del rango elástico para evitar que al fallar puedan causar grandes pérdidas de vidas, o algún impacto negativo sobre el medio ambiente, el comportamiento post-elástico de los aceros se constituye en una ventaja para que las tuberías soporten adecuadamente muchas de las deformaciones a las que se ven sometidas durante su vida útil.

El comportamiento uni-axial Esfuerzo deformación de una tubería de acero, mediante la ecuación de Ramberg – Osgood (1943).

$$\text{Ecuación 2-38.} \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left(1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right)$$

Dónde:

ε = Deformacion

σ = Esfuerzo axial del Tubo

E = Módulo de Young

σ_y = Esfuerzo de Fluencia del Tubo

n, r = Parámetros de Ramberg – Osgood, ver Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Parámetros de Ramberg y Osgood para tuberías de acero

GRADO DE LA TUBERÍA	Grado - B	X - 42	X - 52	X - 65	X - 70
ESFUERZO DE FLUENCIA DEL MATERIAL DEL TUBO [MPa]	227	310	358	448	517
n	10	15	9	7.8	5.5
r	100	32	10	14.3	16.6

Fuente: American Petroleum Institute, 1990

De acuerdo con el código API (1990), las tuberías continuas de acero para oleoductos y gasoductos deben garantizar deformaciones unitarias permanentes del terreno ($\varepsilon_{oper} + \varepsilon_{PDG}$) menores o iguales a: 3% en tensión y a 0.175t/R en compresión. En último caso t corresponde al espesor de la pared del tubo, y R al radio de la sección del mismo.

2.2.5. grados del acero.

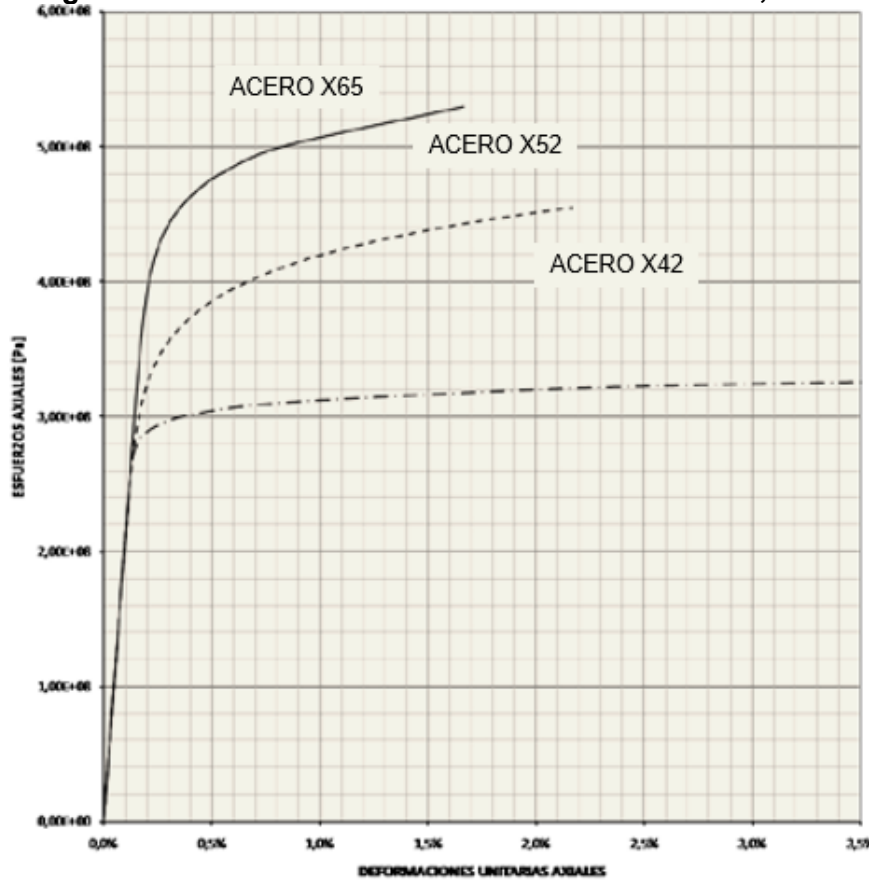
En la Figura 2-9, se presenta las deformaciones unitarias de la tubería antes de llegar a la rotura, y de acuerdo con la normatividad (API) la tubería puede llegar a alcanzar hasta el 3% de antes de llegar a la rotura. Ver En la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Propiedades Mecánicas de la Tubería

Grado	Ensayo a Tensión MPa o N/mm ²	
	f_y - Esfuerzo de fluencia	f_{ult} - Resistencia última a la tensión
X42	289	413Min
X52	358	455Min
X65	448	530Min

Fuente: American Petroleum Institute, 1990

Figura 2-9. Curva esfuerzo deformación. Fuente: API, 1990.



2.3. Marco Teórico de Evaluación Índice de Daños

El riesgo se estima como la magnitud esperada de un daño, que presenta un elemento o sistema, en un lugar dado y durante un tiempo de exposición determinado. Se evalúa en términos de pérdidas y daños físicos, económicos, sociales y ambientales que podrían presentarse si ocurre el evento amenazante.

Ecuación 2-39. ***RIESGO = AMENAZA x VULNERABILIDAD x COSTOS***

Por lo anterior uno de los componentes de la evaluación del riesgo será valorar los daños generados debido a la materialización de la amenaza por deslizamiento y la vulnerabilidad de la tubería, la cual a su vez va a depender de la velocidad del movimiento y el tipo de hidrocarburo transportado, y como consecuencia generará diferentes grados de daños, dentro de los que se evaluará será el derrame, que incluye determinación de la peligrosidad del producto derramado, el volumen liberado, definición del factor de dispersión, del receptor, cálculo de probabilidad y cuantificación del riesgo, evaluación de costos asociados al derrame y finalmente la obtención de matrices de riesgo donde se correlaciona la amenaza, la vulnerabilidad y el índice de riesgo obteniendo el riesgo asociado.

Por lo anterior, es necesario establecer o identificar el tipo de hidrocarburo que se transporta, identificando la principal propiedad física con la cual son diferenciados los crudos que es su API, que no es más que una forma de expresión de la gravedad específica del mismo, dentro de la clasificación se conocen crudos ultralivianos, livianos, medianos, pesados y extra pesados.

Los derrames de hidrocarburos constituyen una de las principales fuentes de contaminación de los suelos, aguas superficiales y subterráneas, flora y fauna silvestre, entre otros.

Los derrames de hidrocarburos son cualquier descarga, liberación de hidrocarburo que se presente en el suelo.

La mayor tasa de accidentes en el transporte de sustancias peligrosas corresponde al transporte de hidrocarburos mediante ductos. Las empresas vinculadas al procesamiento y/o distribución de los hidrocarburos mantienen estrictos programas de revisión de los ductos para verificar el espesor, el grado de corrosión de las tuberías. Sin embargo, existe, la posibilidad de que ocurran eventos naturales como sismos o deslizamientos del terreno

los cuales pueden causar la rotura de las tuberías de conducción de hidrocarburos. Aun cuando las frecuencias de estos sean bajas, involucran altos volúmenes de hidrocarburos derramados y en muchos casos, los sitios afectados son de difícil acceso o abrupto relieve para realizar las labores de control y limpieza.

Para los derrames de hidrocarburos se deben identificar posibles rutas de transporte o drenaje donde se deben considerar factores específicos del sitio de estudio que pudieran influir en el transporte de los contaminantes. Cada sitio es único y debe ser evaluado a fin de determinar las características que podrían incrementar o disminuir la migración de los contaminantes. Muchos de los factores que afectan el transporte dependen de las condiciones climáticas y de las características físicas del sitio.

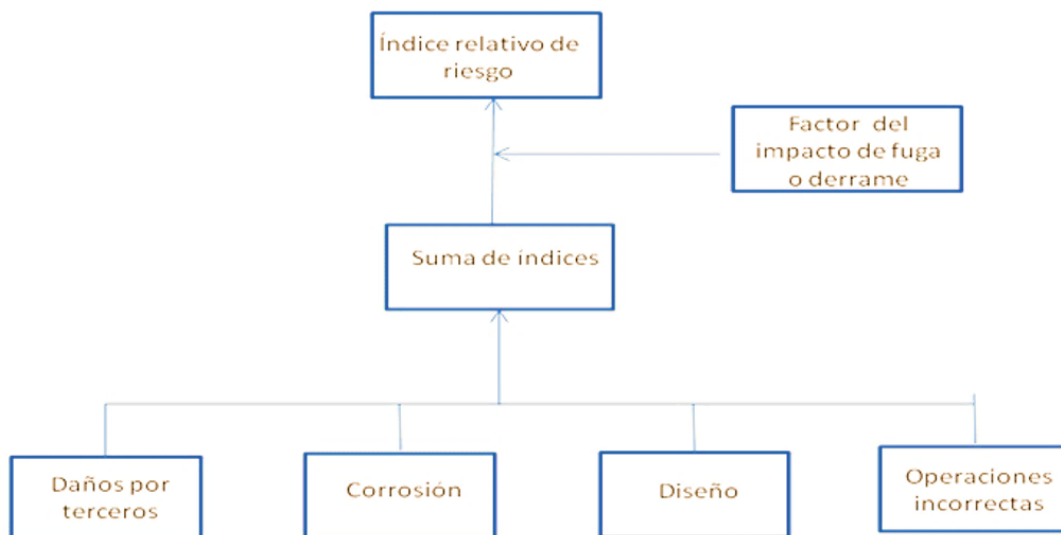
Existen muchos métodos organizativos para realizar análisis de riesgos; en este caso por la gran variedad de aspectos que tiene en cuenta, y que se adapta perfectamente a las condiciones de la estructura a evaluar, se ha seleccionado el método de Muhlbauer (2004), que responde al flujograma que se presenta en la Figura 2-10. La Ecuación 2-40. Simboliza el proceso de la cuantificación de los riesgos:

Ecuación 2-40. $R = Probabilidad \times FI$ (Consecuencias)

Dónde:

FI = Factor de Impacto al Medio ambiente.

Figura 2-10 Modelo para la Evaluación de Riesgo por Operación de Ductos



2.3.1. la valoración del factor de impacto (FI) por derrame del producto.

La evaluación de los índices o factores de riesgos que no son más que los iniciadores o detonadores de una situación peligrosa, responde la pregunta “que puede ir mal”. La estimación de las probabilidades de que ciertos daños ocurran, responden a la pregunta “cuáles son las consecuencias” y para los ductos esta se responde evaluando el factor del impacto de las fugas o derrames de los productos que transportan.

Este factor se estima o valora según la Ecuación 2-41:

$$\text{Ecuación 2-41.} \quad FI = PS * VL * D * R$$

Dónde:

PS= Peligrosidad de los productos (inflamabilidad, toxicidad y reactividad)

VL= Volumen liberado de la sustancia peligrosa

D = Dispersión y las características del receptor

R = Receptor (todo lo que puede ser dañado)

2.3.1.1. peligrosidad de la sustancia (PS).

El impacto de una sustancia peligrosa puede definirse como agudo o sea de comienzo repentino y que demanda una atención inmediata y que tiene poca duración, ej. Fuego, explosiones, toxicidad por contacto son amenazas inmediatas a un derrame), o crónico cuando sus efectos y las acciones para eliminarlos son de larga duración.

Los peligros de escape o derrame de gases o líquidos transportados por tuberías son considerados agudos, independientemente de que algunos lleven intrínsecos peligros crónicos como por ej. En el derrame de petróleo crudo el peligro de inflamación es remoto, sin embargo, a la larga la contaminación del medio ambiente tiene mayor peso.

La peligrosidad de una sustancia está definida por la Ecuación 2-42, en la que los peligros agudo y crónico son RA y RQ, respectivamente:

$$\text{Ecuación 2-42.} \quad PS = RA + RQ$$

2.3.1.2. peligro agudo RA.

Sustancias Inflamables:

Bajos puntos de inflamación, < 40 °C se inflaman y queman rápidamente. Si también tiene un punto de ebullición menor que 40 °C, entonces está considerado como de la Clase más inflamable. Entre estos está el gas metano.

Sustancias que tienen el punto de inflamación, < 40 °C y punto de ebullición > 40 °C. Se vaporiza menor cantidad de producto y forma mezclas inflamables con el aire. En esta Clase se incluyen la gasolina, petróleo crudo, nafta y algunos combustibles jet.

Sustancias combustibles:

Puntos de inflamación mayores de 40 °C y que se mantienen la llama mayor tiempo. Esta clase de sustancias incluye el diésel y el keroseno.

Toxicidad:

Existen diferentes metodologías que asignan índices basado en la dosis mínima efectiva durante exposiciones repetitivas y a la severidad de los efectos. Este índice se encuentra reportado en la literatura internacional

Peligrosidad de las sustancias PP:

$$\text{Ecuación 2-43.} \quad RA = Nf + Nr + Nh$$

Dónde:

Nf = Inflamabilidad

Nr = Reactividad

Nh = Toxicidad

2.3.1.3. peligro crónico RQ.

Aquellos que afectan al medio ambiente por largo periodo de tiempo y requiere de actividades especiales para limpieza o remediación (McAllister, E.W,2005).

2.3.1.4. volumen liberado de la sustancia peligrosa VL.

Existen correlaciones con las que se ha determinado este índice (VL), en dependencia del peso molecular del producto que se trate y el volumen derramado.

El volumen derramado se determina igualmente para gases y para líquidos aplicando primeramente la Ecuación 2-44, utilizada para determinar la velocidad de liberación de la sustancia, (sin tener en cuenta en gases el factor de expansión (McAllister, E.W,2005).

$$\text{Ecuación 2-44.} \quad q = C * A [144 * \Delta P (2g/\rho)]^{1/2}$$

Dónde:

q = velocidad de flujo (pie^3/seg)

C = Coeficiente de flujo (entre 0.9 y 1.2)

A = Sección transversal de la tubería (pie^2)

ΔP = Cambio de presión a través del orificio (psi)

g = Aceleración de la gravedad ($32.2 pie/seg^2$)

ρ = Densidad del Flujo (lb/pie^3)

2.3.1.5. factor de dispersión D.

Este tiene que ver con el área específica donde ocurra el derrame. Por ejemplo, cuando se trata de gas natural, al ser menos denso que el aire se dispersa inmediatamente cuando es liberado a la atmosfera. No ocurre así en el caso del derrame de combustible que se mezcla con el agua y la tierra, pueden trasladarse con ellas o permanecer en el lugar por largo tiempo mientras que no se realicen las actividades de remediación. Este factor puede ser evaluado teniendo en cuenta la velocidad de liberación del producto en ($lb/hora$).

2.3.1.6. *características del receptor.*

Existen muchas normas que clasifican la población implicada en los estudios de riesgos; una de las más empleadas es la regulación federal de E.U. (DOT Class). Para la evaluación del receptor (Re) en el caso de ductos se tiene en cuenta las características del factor a aproximadamente 200m a ambos lados del ducto, a lo largo de 1Km de longitud lo que implica su valoración cada 0.4Km² de la traza.

Capítulo 3

3. Sitio de Estudio y Parámetros de la Tubería

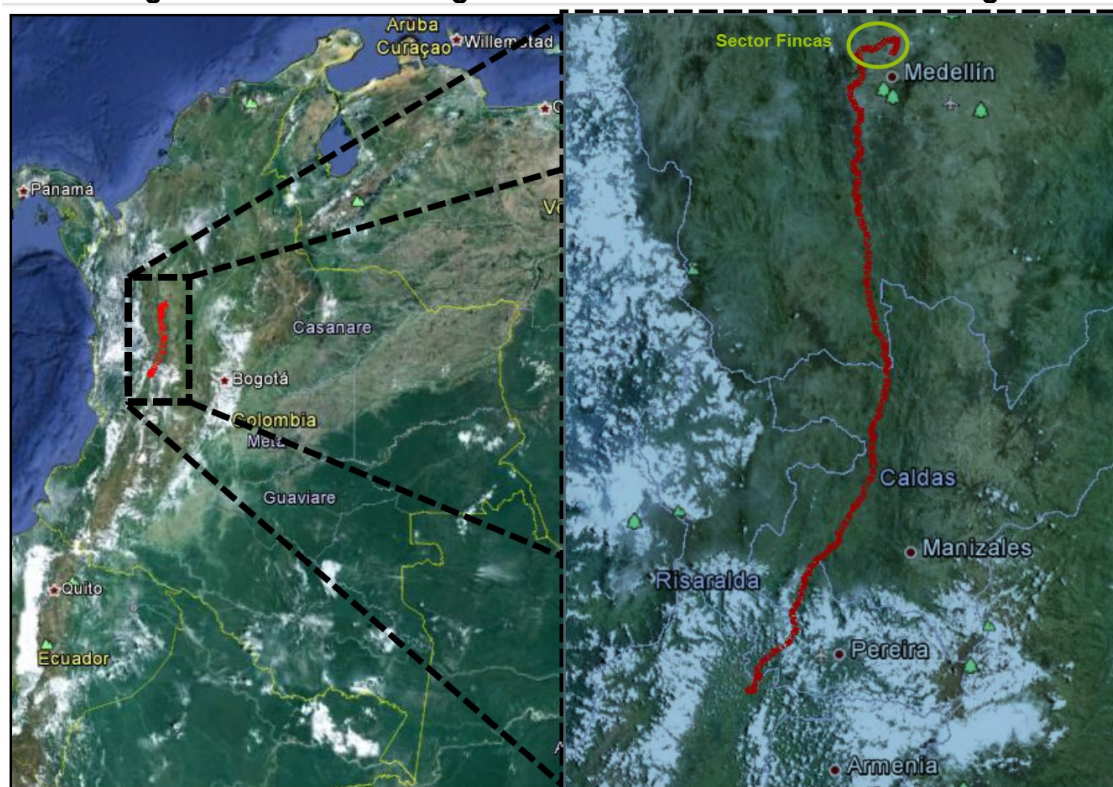
3.1. Selección del Sitio

Se seleccionó un sitio en particular para la evaluación de la metodología a desarrollar, considerado Proyecto Piloto, el cual está localizado en el tramo del oleoducto Medellín Cartago en la abscisa PK 14+675 denominado cruce Aéreo 3, el cual se contó con información del Estudio de Suelos realizado por ECOPETROL S.A.

3.1.1. localización de la zona de estudio.

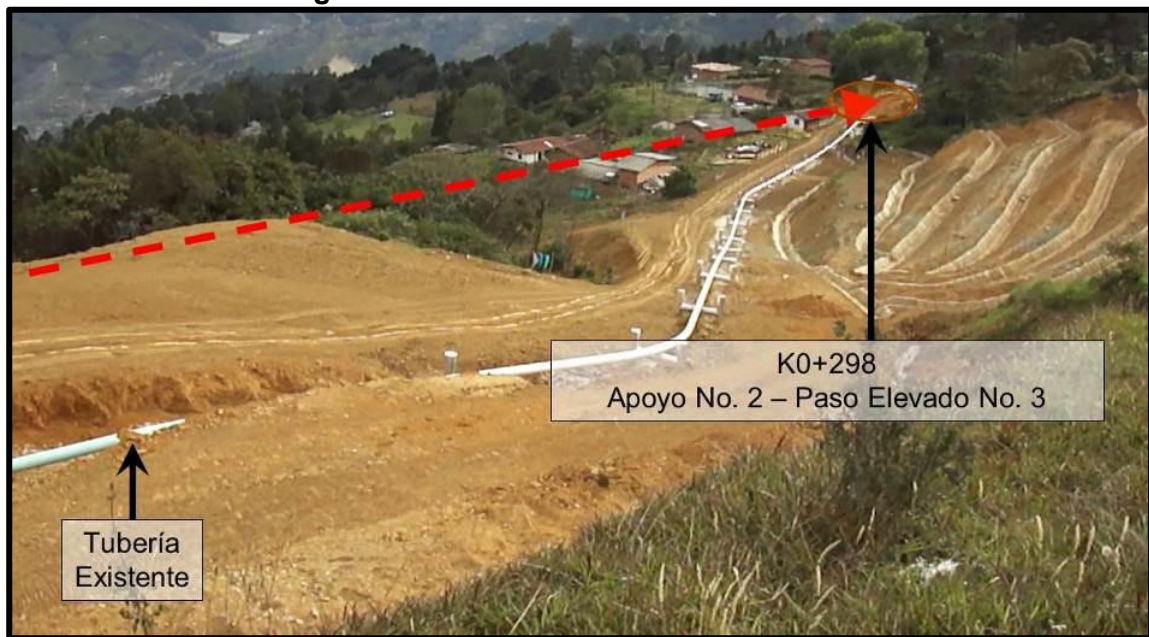
El Poliducto Medellín – Cartago se localiza en el sector centro-occidente del país, sobre el costado occidental de la cordillera central, partiendo de la ciudad de Medellín y finalizando en la ciudad de Cartago. El poliducto tiene una longitud total de 236 km aproximadamente, atravesando municipios localizados en los departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda y Valle del Cauca, ver Figura 3-1.

Figura 3-1 Localización general del Poliducto Medellín – Cartago



El área donde se proyecta la variante Fincas, cruce aéreo 3, se localiza en el corregimiento de San Cristóbal, al noroeste en área rural del municipio de Medellín, ubicado hacia el suroccidente del departamento de Antioquia. El tramo de estudio se encuentra localizado en la vereda La Ilusión, ver Figura 3-2.

Figura 3-2 . Panorámica Tramo de Estudio



3.1.2. geología de la zona.

El área de estudio se encuentra localizada en la vertiente noroccidental de la Cordillera Central de Colombia, las rocas analizadas pertenecen a las anfibolitas del Grupo Ayurá-Montebello miembro basal, en un basamento metamórfico de edad Paleozoica; con una serie de acumulaciones recientes sobre las vertientes de espesores variables y de diferente composición representada por rellenos antrópicos, depósitos de flujo, depósitos coluviales y depósitos aluviales, que se encuentran como unidades superficiales en el basamento metamórfico a lo largo del corredor de la variante Fincas.

Desde el punto de vista tectónico la zona de estudio ha sido una región muy activa, perteneciendo al Bloque Andino, donde se manifiestan grandes fallas de tipo inverso, influenciado al oeste de la variante por la falla de San Jerónimo, la cual constituye el brazo este del Sistema de Fallas de Romeral; identificándose lineamientos, los cuales reflejan cambios litológicos o efectos tectónicos.

La expresión más notoria de esta falla es un prominente quiebre recto en la pendiente en la parte Oeste del Valle de Aburrá. Se ha comprobado que varios abanicos y flujos de escombros han sido desplazados y truncados por esta falla y algunos muestran basculamiento. Estudios paleomagnéticos muestran que la edad de los depósitos afectados es de alrededor de un millón de años, lo que indica una actividad de la falla en el Cuaternario temprano. Se han detectado movimientos inversos sinestrales aun cuando el grado de actividad es probablemente bajo (AMVA, 2002). Se aclara expresamente que en el área de influencia directa no se expresan elementos estructurales relacionados con la tectónica regional.

3.1.2.1. geología regional.

Desde el punto de vista regional, el basamento metamórfico de la zona de estudio es de la edad paleozoica, compuesta por metabasitas y gneises de alto grado, asociado con esquistos de bajo grado. Estas rocas se agrupan dentro del grupo Ayurá – Montebello, que dividen la zona Ayurá para el conjunto de rocas metamórficas de alto grado, y la zona de Montebello para las rocas metamórficas de grado bajo (correa, 2005).

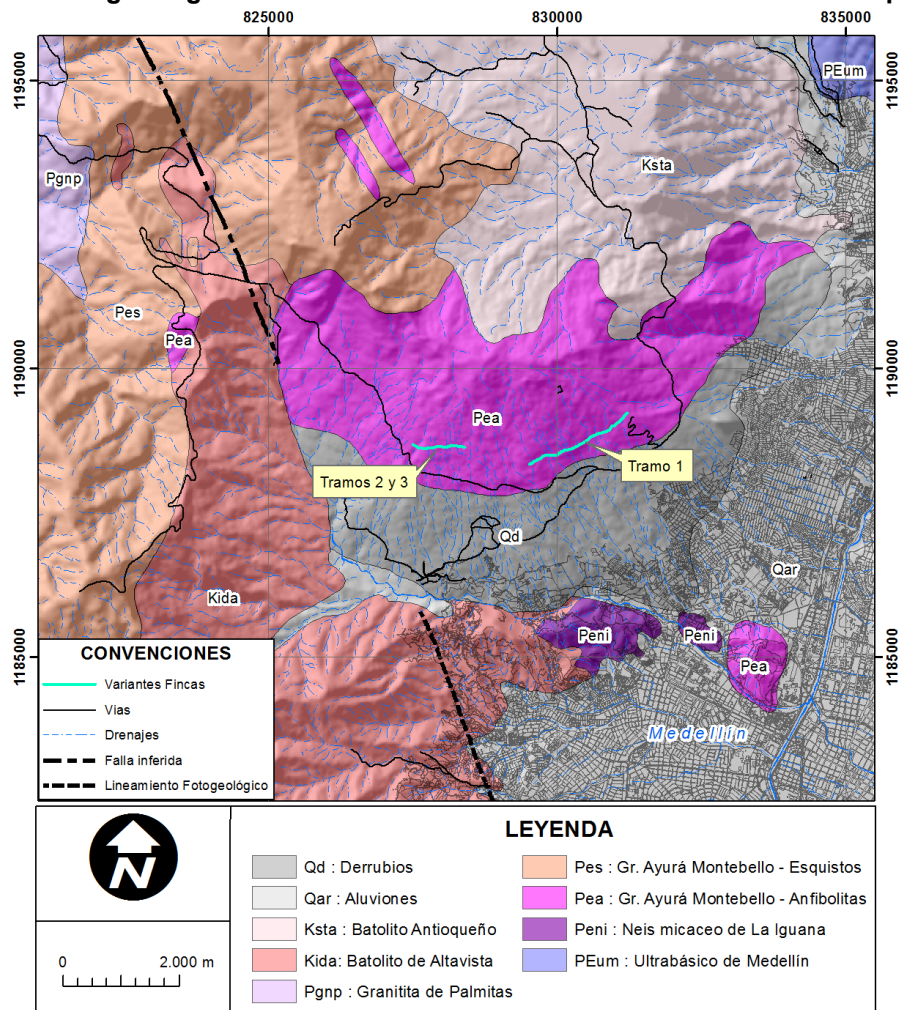
La zona de estudio se compone de formaciones superficiales donde se destacan dos (2) tipos de materiales:

- Sapolitos: producto de la descomposición de rocas ígneas y metamórficas con espesores variables.
- Depósitos detríticos: dentro de los cuales se tienen depósitos de vertiente asociados a los escarpes regionales (Rendón, 2011).

En el departamento de Antioquia, la cordillera central se encuentra bajo la influencia de los sistemas de fallas Cauca – Romeral al occidente y Palestina al Oriente, conservando hacia el centro del departamento un elipsoide encajado en medio de estos sistemas de falla de dirección predominante Norte – Sur.

A continuación, se observa la geología regional del área de estudio y se describe brevemente la formación a la que corresponde que es este caso es el Tramo 2 cruce aéreo 3, ver Figura 3-3

Figura 3-3. Geología Regional del Área de Estudio. Fuente: Estudio suelos Ecopetrol,2014



- **Anfibolitas (Pea)**

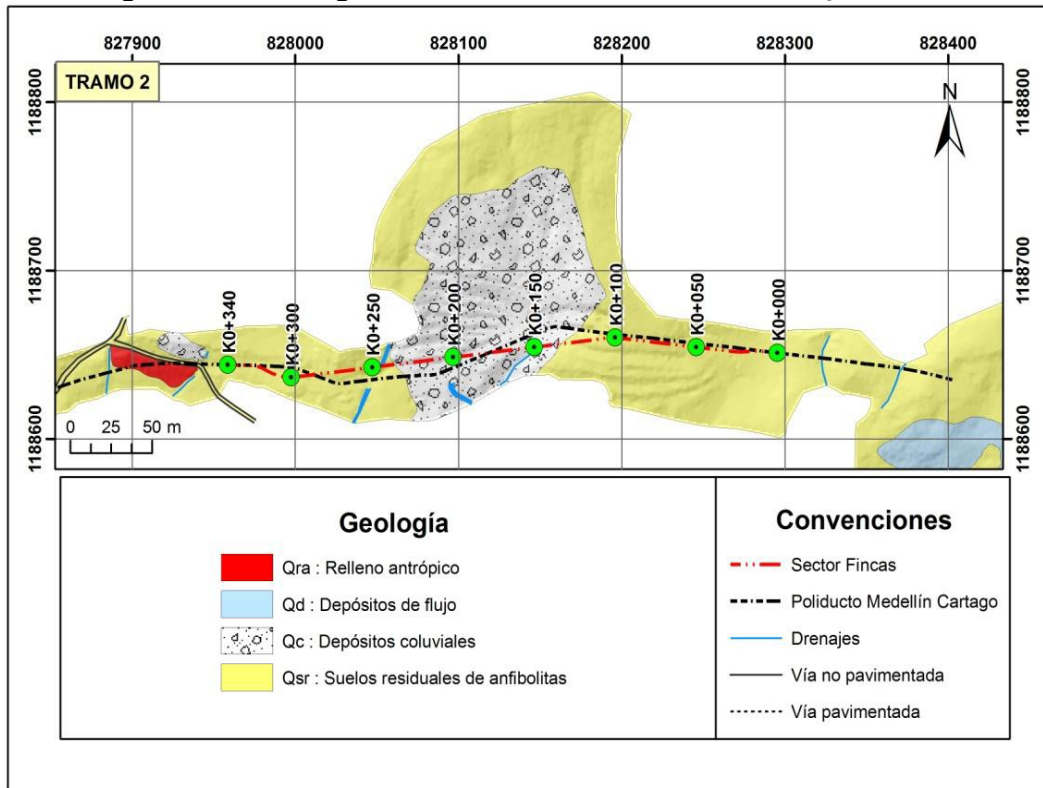
En esta unidad se desarrolla la zona de estudio y corresponde al miembro basal del Grupo Ayurá- Montebello. Es de edad paleozoica, son de color gris verdoso a gris oscuro, moteadas en blanco, foliadas, exhiben frecuentes variaciones texturales con tamaño de grano desde media (apariencia foliada) a fino (apariencia masiva).

La composición mineralógica es bastante homogénea, dentro de lo cual se distinguen principalmente una alternada presencia de minerales máficos, donde predomina la hornblenda en un 70% y de minerales claros, principalmente plagioclasas en un 30% y como accesorios en algunos casos se tienen sulfuros como piritita y algo de cuarzo.

3.1.2.2. *geología local.*

Desde el punto de vista de Geología Local, Las unidades litológicas que afloran corresponden a formaciones superficiales de edad cuaternaria que se describe a continuación, ver Figura 3-4.

Figura 3-4. Geología Local. Fuente: Estudio suelos Ecopetrol,2014



El área de estudio corresponde al tramo 2 cruce aéreo 3 denominado K0+150 al K0+200, corresponde a depósitos coluviales (Qc) y a suelos residuales de anfibolitas (Qsr).

- **Depósitos Coluviales (Qc)**

Están constituidos por bloques de rocas metamórficas compuestos de anfibolitas de diámetro mayor a 0,25 m y gravas heterogéneas de rocas metamórficas en una matriz limo arenosa y arcillo limosa. El espesor del depósito es variable hasta alcanzar una profundidad de al menos 26 m. Su origen corresponde a materiales transportados por acción hidrogravitacional desde las partes altas de las cuchillas adyacentes hasta zonas de cambio de pendiente en las estribaciones del frente montañoso.

- **Suelos residuales de anfibolitas (Qsr)**

Corresponde a los suelos formados in situ por la alteración del macizo metamórfico (que no aflora como roca fresca) de anfibolitas del Grupo Ayurá Montebello. Su composición es muy variable y corresponde a limos y arcillas de color amarillo a café y arenas arcillolimosas, limoarcillosas y arenas de grano fino de color gris verdoso a gris oscuro. Tienen un espesor de por lo menos 40 m, ver Fotografía 3-1. Se localizan ampliamente a lo largo del corredor de la variante en los tres tramos. Dentro del perfil de meteorización es posible encontrar bloques de diferente dureza producto del transporte de materiales desde las partes altas de la ladera, que reposan sobre la ladera preexistente.

Fotografía 3-1. Aspecto de la unidad de suelos residuales de anfibolita en la zona de estudio. Fuente: Estudio suelos Ecopetrol,2014



3.1.3. modelo geológico – geotécnico.

3.1.3.1. *consideración de la exploración en campo.*

La información considerada de exploración del subsuelo, se tuvieron en cuenta los sondeos 13 y 14, ver, Figura 3-6 y Tabla 3-1

Figura 3-5. Localización de la Exploración. Fuente: Estudio suelos Ecopetrol,2014

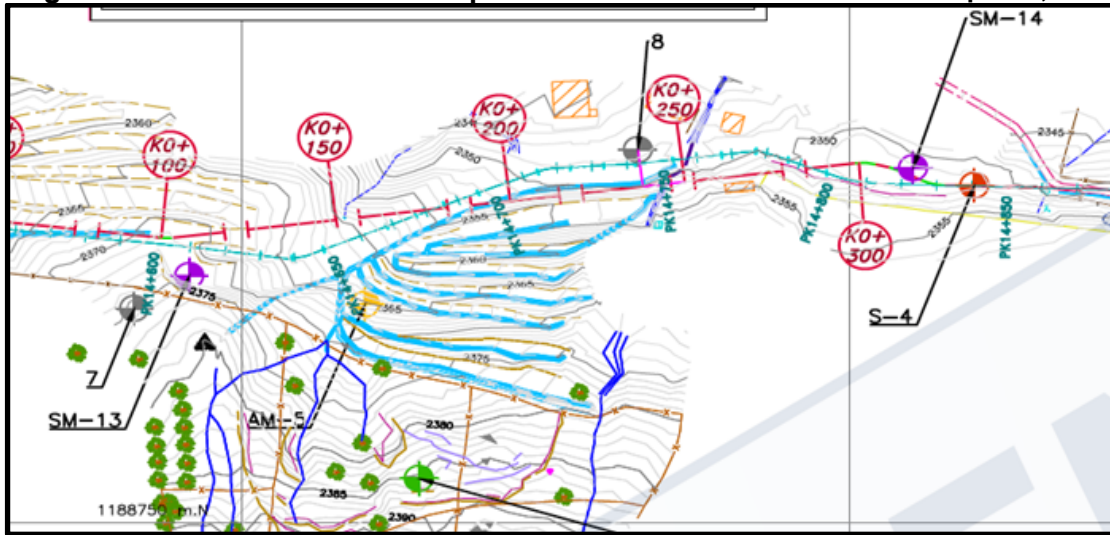


Figura 3-6. Perfil Estratigráfico sondeo 13 y 14. Fuente: Estudio suelos Ecopetrol,2014

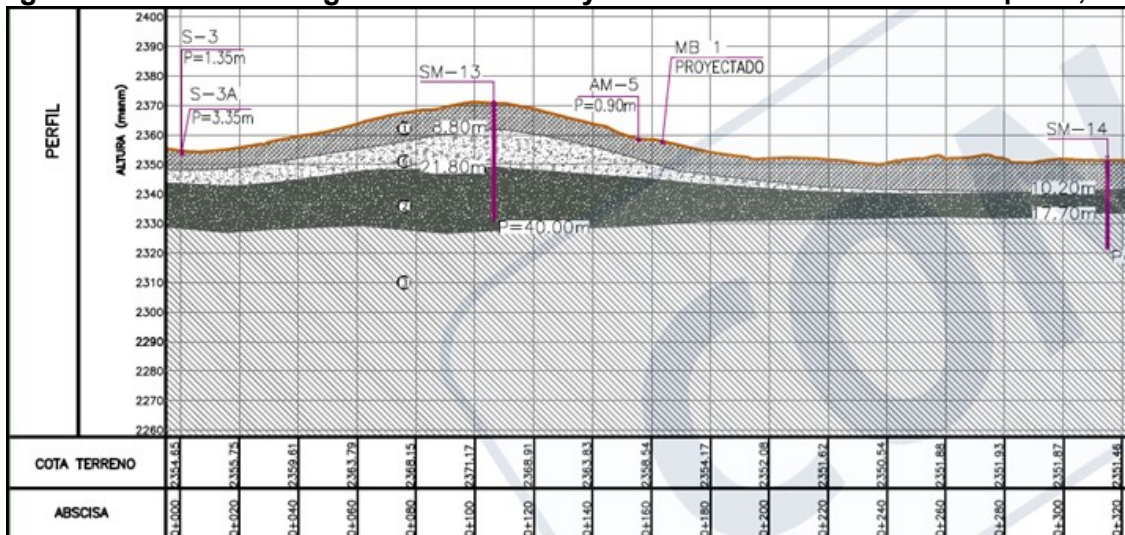


Tabla 3-1. Descripción de los niveles estratigráficos

Sondeo	Material	Profundidad Suelo		Descripción
SM-13 SM-14	1	0,00m	8,80m	Limo arenoso o arena limosa, de color café a gris verdoso, de plasticidad media a alta con presencia ocasional de clastos.
SM-13	6	8,80m	21,80m	Arena limosa o limo arenoso de plasticidad media a baja, con presencia de clastos.
SM-13 SM-14 SM-15	2	21,80m	40,00m	Saprolito de color gris a café, soportado en matriz, arcillo arenosa, limo arenosa, con presencia de gravas.
SM-13 SM-14	3	40,00m		Roca anfibolita fracturada de color grisáceo.

Fuente: Estudio suelos Ecopetrol,2014

3.1.3.2. determinación del perfil topográfico – geotécnico.

La determinación del perfil geotécnico es basada en los parámetros geotécnicos de cada estrato y a partir del levantamiento topográfico. A continuación, se presenta la planta y el perfil del K14+675, localización de la zona de estudio, ver Figura 3-7 y Figura 3-8.

Figura 3-7. Planta Topográfica Sección K14+675

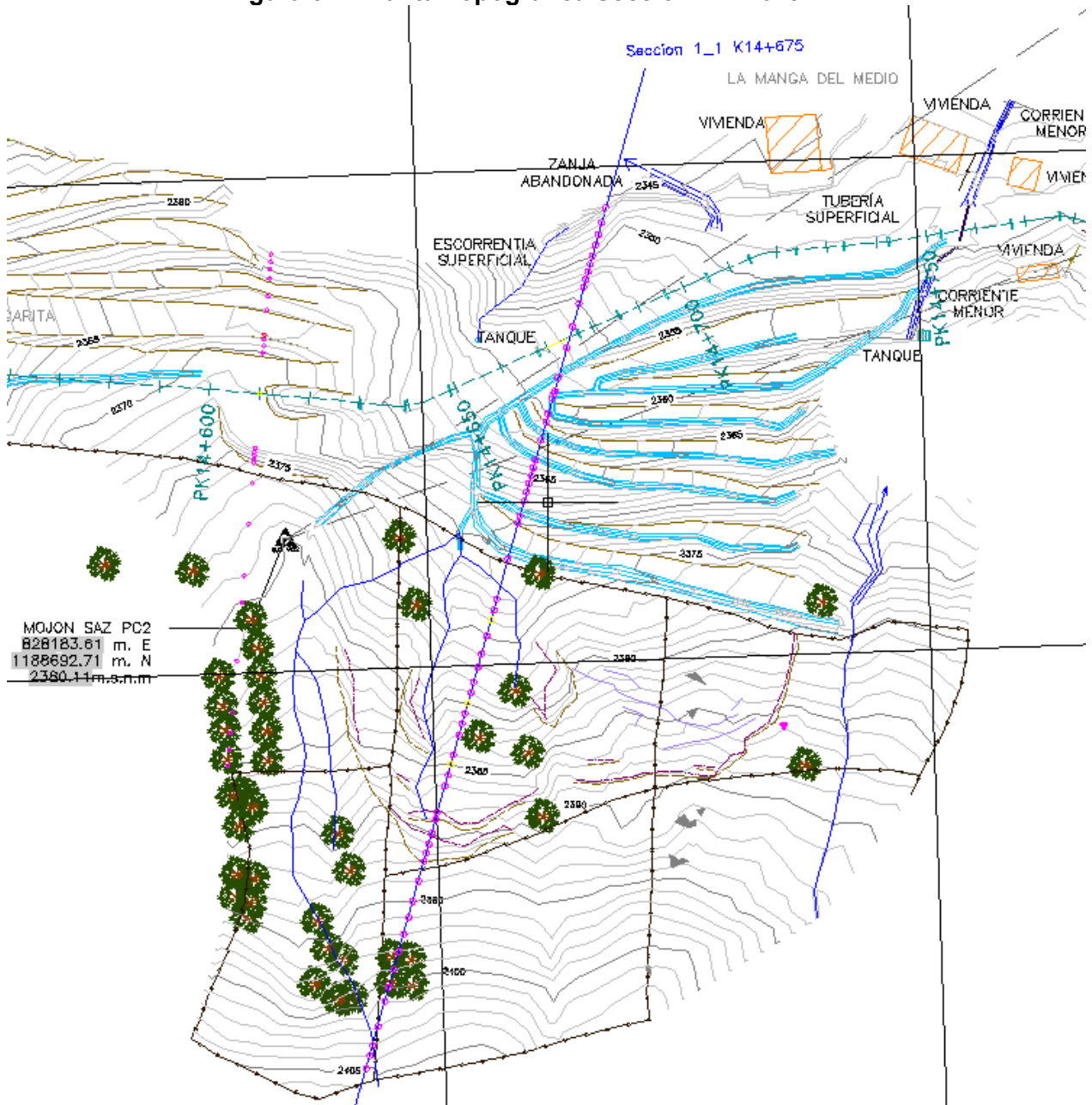
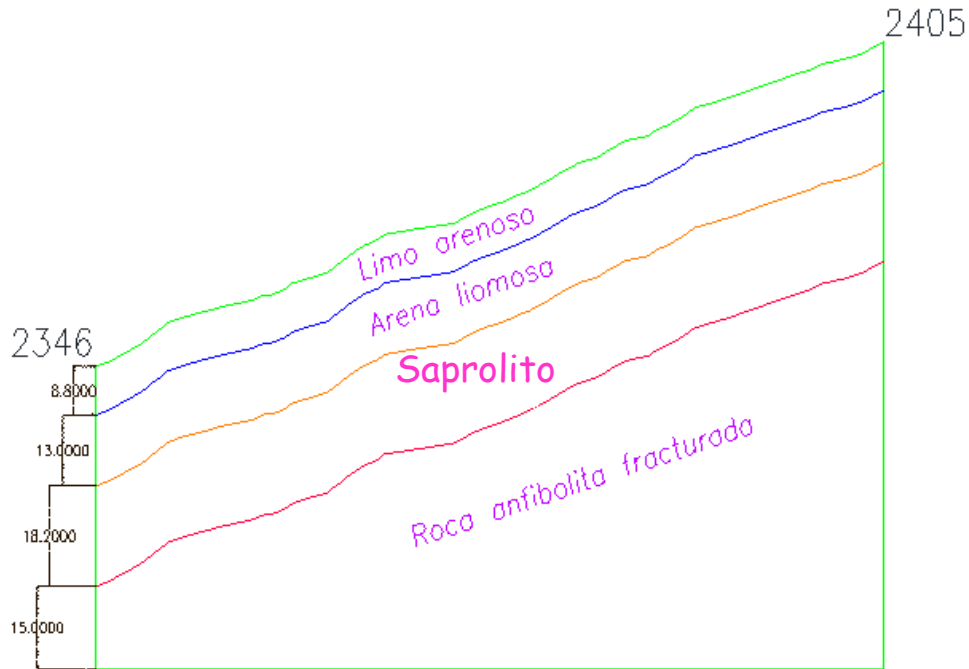


Figura 3-8. Perfil Topográfico y geotécnico Sección 1_1 K14+675



3.2. Parámetros de la Tubería

3.2.1. parámetros del suelo de relleno.

El suelo considerado corresponde a un suelo de relleno con una profundidad de 1.2m, para los casos de suelo de fundación planteados e suelo de relleno será el mismo, ver Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Suelo de Relleno

Parámetros del Relleno		
C'	ϕ	γ_t
10,00 KN/m ²	30,00°	1900,0 Kg/m ³
10,00 KN/m ²	30,00°	1900,0 Kg/m ³
10,00 KN/m ²	30,00°	1900,0 Kg/m ³
10,00 KN/m ²	30,00°	1900,0 Kg/m ³
H (Relleno)=	1,2 m	

Fuente: Estudio suelos Ecopetrol,2014

3.2.2. ancho del deslizamiento.

Se consideraron diferentes anchos de deslizamiento, ver Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Anchos de Deslizamiento considerados

W
30,0 m
60,0 m
90,0 m
120,0 m
150,0 m

Fuente: Estudio suelos Ecopetrol,2014

3.2.3. parámetros de la tubería.

La tubería considerada corresponde a la expuesta en el tramo, ver Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Parámetros de la Tubería (Proyecto Piloto)

Parámetros de la Tubería			
Diámetro Nominal =	12,0 pulg	Diámetro Nominal =	0,3048 m
Espesor=	0,375 pulg	Espesor=	0,0095 m
Diámetro Exterior =	12,75 pulg	Diámetro Exterior =	0,324 m
Grado=	API5LX52	d =	0,3048 m
Et (N/m ²)=	2,10E+11	I (m ⁴) =	1,16E-04
fy (N/m ²)=	3,58E+08	A (m ²) =	9,41E-03
n =	9		
r =	10		
fult (N/m ²)=	4,55E+08		

Fuente: Ecopetrol,2014

Capítulo 4

4. Desarrollo y Resultados

4.1. Evaluación de la Amenaza

4.1.1. determinación de parámetros geomecánicos.

De acuerdo con la exploración en campo donde se definieron los sondeos a utilizar, que en este caso son los sondeos 13 y 14, la ubicación de estos sondeos se encuentra en el capítulo anterior, ver anexo1, así como la caracterización de los materiales encontrados.

A partir del ensayo SPT, donde se reportó el número de golpes obtenido en la exploración, se procedió a calcular los parámetros intrínsecos del suelo como el ángulo de fricción interna, mediante las correlaciones propuesta por González (1999). A partir del ángulo de fricción calculado, se obtuvo el esfuerzo cortante máximo y con el esfuerzo efectivo calculado previamente, se procedió a graficar Esfuerzo efectivo ($\sigma'v$) Vs Esfuerzo Cortante (τ), obteniendo la envolvente de falla, a partir de la cual y mediante una regresión lineal se obtuvieron los parámetros intrínsecos del suelo tales como Cohesión y ángulo de fricción para los estratos 1 y 2.

Adicionalmente para el estrato superficial se tuvo en cuenta los valores obtenidos del ensayo de corte directo y los parámetros obtenidos mediante la correlación, a partir de estos datos se determinó la media con el fin de establecer los parámetros del primer estrato.

La determinación de parámetros geotécnicos para los estratos 3 y 4, referente al basamento rocoso fracturado, material que se encuentra a una profundidad mayor a 20 metros, por lo cual se manejó como un material determinístico, para lo cual se obtuvieron los parámetros con base en el estudio de suelos suministrado y a partir del programa de computador ROCDATA 3.0, se obtuvieron parámetros promedio para cada sondeo, a partir de estos datos se determinó la media con el fin de establecer los parámetros del estrato 3 y 4.

Todo el desarrollo anteriormente descrito se presenta en el anexo 1.

En resumen, los parámetros intrínsecos de cada estrato se obtuvieron de la siguiente forma:

- Estratos 1 y 2: se grafica el esfuerzo efectivo ($\sigma'v$) Vs esfuerzo Cortante (τ), obteniendo la envolvente de falla y mediante regresión lineal se obtiene el intercepto y la pendiente.
- Estratos 3 y 4: se utilizan los parámetros obtenidos en el estudio y los parámetros obtenidos del programa ROCDATA 3.0, y a partir de estos datos se calcula la media y se obtienen los parámetros geomecánicos.

A continuación, se presentan los parámetros geomecánicos obtenidos para cada estrato, ver Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Parámetros Geomecánicos

Material	Profundidad Suelo		Descripción	γ_t	ϕ'	c
1	0,00m	8,80m	Limo arenoso o arena limosa, de color café a gris verdoso, de plasticidad media a alta con presencia ocasional de clastos.	15,2KN/m ³	20,25 °	8KN/m ²
6	8,80m	21,80m	Arena limosa o limo arenoso de plasticidad media a baja, con presencia de clastos.	16,5KN/m ³	30,88 °	0KN/m ²
2	21,80m	40,00m	Saprolito de color gris a café, soportado en matriz, arcillo arenosa, limo arenosa, con presencia de gravas.	21,0KN/m ³	28,15 °	38KN/m ²
3	40,00m		Roca anfibolita fracturada de color grisáceo.	25,0KN/m ³	35,69 °	114KN/m ²

Fuente: Datos propios,2016

4.1.2. determinación de parámetros probabilísticos.

A partir de los parámetros (ángulo de resistencia y cohesión) obtenidos por correlación y regresión lineal con base en el ensayo SPT, ver Tabla 4-1, se procede a calcular los parámetros probabilísticos correspondientes a la varianza (mediante la Ecuación 2-14 y Ecuación 2-15) y desviación estándar (mediante la Ecuación 2-16) de cada estrato, mediante un modelo lineal, ver anexo 1.

Los parámetros probabilísticos obtenidos para cada estrato son presentados a continuación Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Parámetros Probabilísticos

	Material	ϕ'	c
Media	1	20,25 °	8KN/m2
Desv-Est		0,0891 °	7,54KN/m2
Media	6	30,88 °	0KN/m2
Desv-Est		0,0833 °	17,12KN/m2
Media	2	28,15 °	38KN/m2
Desv-Est		1,4195 °	6,26KN/m2
Media	3	35,69 °	114KN/m2
Desv-Est		1,3457 °	15,6KN/m2

Fuente: Datos propios,2016

4.1.3. determinación de factores detonantes.

4.1.3.1. determinación de lluvias de diseño.

Generalmente los procesos de remoción en masa están asociados a los períodos lluviosos, por lo que la precipitación en términos de intensidad y duración de la lluvia cobra gran importancia debido a que estos factores disparan el movimiento y depende en cada caso de las condiciones iniciales de humedad y de la posición del nivel freático en la zona; estas variables guardan una estrecha relación con la precipitación precedente a que ha estado sometido el talud.

Cuando la precipitación cae sobre una ladera o talud, un porcentaje de ella es interceptado por la vegetación, otro se filtra en el suelo o se almacena en las depresiones para luego infiltrarse en él. El proceso de infiltración continúa aún después de que cesa la lluvia y en algún momento pueden crearse condiciones críticas para la ladera o el talud, ya que la humedad del suelo y la posición del nivel freático han aumentado, generando presiones de poros, disminuyendo los esfuerzos efectivos y por consiguiente la resistencia al cortante. Entonces se pueden alcanzar los umbrales de inestabilidad que disparan el movimiento de una parte o de toda la ladera.

El aumento de humedad del suelo y la posición del nivel freático también están relacionadas con el factor antrópico, ya que no se controla adecuadamente el agua superficial y subterránea. Lo anterior hace que la erosión hídrica y la infiltración cambien en relación con las condiciones naturales, creando frentes erosivos y procesos de remoción en masa (González Álvaro, Zamudio,1996).

Por lo anterior, se pretende analizar las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF). Para ello, se necesitará conocer el comportamiento de las precipitaciones a través de una curva que entrega la intensidad media en función de la duración y la frecuencia, y cuya única finalidad será la de aportar patrones de conductas de las lluvias, tal que permitan diseños confiables y efectivos para la ingeniería.

Para la construcción de la curva (IDF), se utilizaron los datos pluviométricos de la estación **27015090 TULIO OSPINA**, ubicada en el departamento de Antioquia, Municipio de Bello, con base en los eventos registrados durante el periodo de 1950 a 2012. La curva IDF se obtuvo mediante el método de Díaz Granados, para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, ver anexo 3.

Aunque existan correlaciones entre deslizamientos con una intensidad crítica o duración crítica de lluvia, es importante notar que la intensidad o cantidad de lluvia por si solas no pueden ser indicativos de deslizamientos. Resultados indican que los principales parámetros que controlan la inestabilidad de los taludes expuestos a lluvia son la intensidad y las propiedades del suelo. La ubicación inicial del nivel freático y la geometría del talud juegan un rol secundario porque estos parámetros controlan principalmente el factor de seguridad inicial del talud (Ekanayake, J. C., & Phillips, C. J., 1999).

Con base en lo anterior, se procede a determinar los parámetros hidráulicos y el tiempo de concentración, para lo cual se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- Utilizando el triángulo de suelos de la USDA (EE UU), se define la textura del suelo para los diferentes estratos, teniendo en cuenta los parámetros de cada estrato como la granulometría, los límites de Atterberg y la clasificación de suelos USCS.
- Una vez definida la textura de cada estrato se va a la tabla donde se encuentra las doce (12) texturas de suelos propuesta por Van Genuchten, y obtienen los parámetros hidráulicos de los materiales de cada estrato, tales como contenidos volumétricos de agua saturada y residual, permeabilidad y parámetros característicos de la curva de succión.
- A partir de la curva intensidad-duración-frecuencia que se obtuvo anteriormente, y con base en la geomorfología, las unidades hidrogeológicas del área de estudio y teniendo en cuenta el tiempo de escurrimiento laminar superficial y el

tiempo de escurrimiento en el alveo fluvial en la zona, se definió que el tiempo de concentración será de una (1) hora para el caso de estudio, Por lo anterior se puede definir la intensidad de la precipitación durante los diferentes periodos de retorno para un tiempo de concentración de una hora.

- Una vez obtenido los parámetros hidráulicos, el tiempo de concentración y la intensidad de las lluvias se procede a calcular la succión y profundidad del frente húmedo, ver Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Profundidad del Frente Húmedo

Material 1 : Limo arenoso o Arena limosa							
Tiempo Retorno	Material	Tiempo Precipitación	Intensidad Precipitación	θ_r cm ³ /cm ³	θ_s cm ³ /cm ³	Succión S	Zw
2,33	1	1,0 hr	21,66 mm/hr	0,068	0,380	18307,45 mm de Agua	0,138 m
5,00			24,53 mm/hr				0,157 m
10,00			27,47 mm/hr				0,176 m
25,00			31,89 mm/hr				0,204 m
50,00			35,71 mm/hr				0,228 m
100,00			39,99 mm/hr				0,255 m

Fuente: Datos propios,2016

A continuación, se presenta la tabla resumen donde se encuentra la profundidad de infiltración para los diferentes periodos de retorno y la probabilidad de ocurrencia del mismo, ver Tabla 4-4.

Tabla 4-4. Profundidad de Infiltración y probabilidad de ocurrencia del mismo

Tiempo Retorno	Tiempo Precipitación	Intensidad Precipitación	Zw	Periodo de Diseño	Probabilidad de ocurrencia
2,33	60 min	21,66 mm/hr	0,138 m	50 años	1,000
5,00		24,53 mm/hr	0,157 m	50 años	1,000
10,00		27,47 mm/hr	0,176 m	50 años	0,995
25,00		31,89 mm/hr	0,204 m	50 años	0,870
50,00		35,71 mm/hr	0,228 m	50 años	0,636
100,00		39,99 mm/hr	0,255 m	50 años	0,395

Fuente: Datos propios,2016

4.1.3.2. determinación del sismo de diseño.

Los sismos son fenómenos naturales causados por movimientos de las fallas geológicas en la corteza terrestre. Al moverse las fallas, se producen ondas de diferentes tipos y de gran poder, las cuales viajan a través de las rocas. Los movimientos sísmicos pueden activar deslizamientos de tierra. En el caso de un sismo, existe el triple efecto de aumento

del esfuerzo cortante, disminución de la resistencia por aumento de la presión de poros y deformación, asociados con la onda sísmica; pudiéndose llegar a la falla al cortante y hasta la licuación en el caso de los suelos granulares saturados (Suarez,2009).

Las situaciones adquieren alto grado de criticidad cuando se combinan altas susceptibilidades, debidas a factores topográficos, geológicos, climáticos y sísmicos.

Basados en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, se obtuvieron las curvas de amenaza, en las cuales se observan diferentes intensidades, así como las tasas de excedencia para la ciudad de Medellín, también se ilustra la participación de las fuentes sismogénicas con el fin de determinar la influencia de cada fuente en un lugar dado y con una tasa de excedencia determinada, ver anexo 2.

A partir de la curva de amenaza sísmica de aceleración máxima del terreno por fuentes de Medellín, se obtuvieron las aceleraciones para los diferentes periodos de diseño, los cuales se establecieron como 50, 100, 200, 475 y 1000 años, cabe mencionar que las curvas están construidas para periodos de 50 años, razón por la cual el periodo de diseño utilizado es de 50 años. Además, se calculó la probabilidad de excedencia a tener en cuenta en la obtención de probabilidades de falla. A continuación, se presenta la tabla resumen de la aceleración para los diferentes periodos de retorno y la probabilidad de ocurrencia del sismo, ver Tabla 4-5.

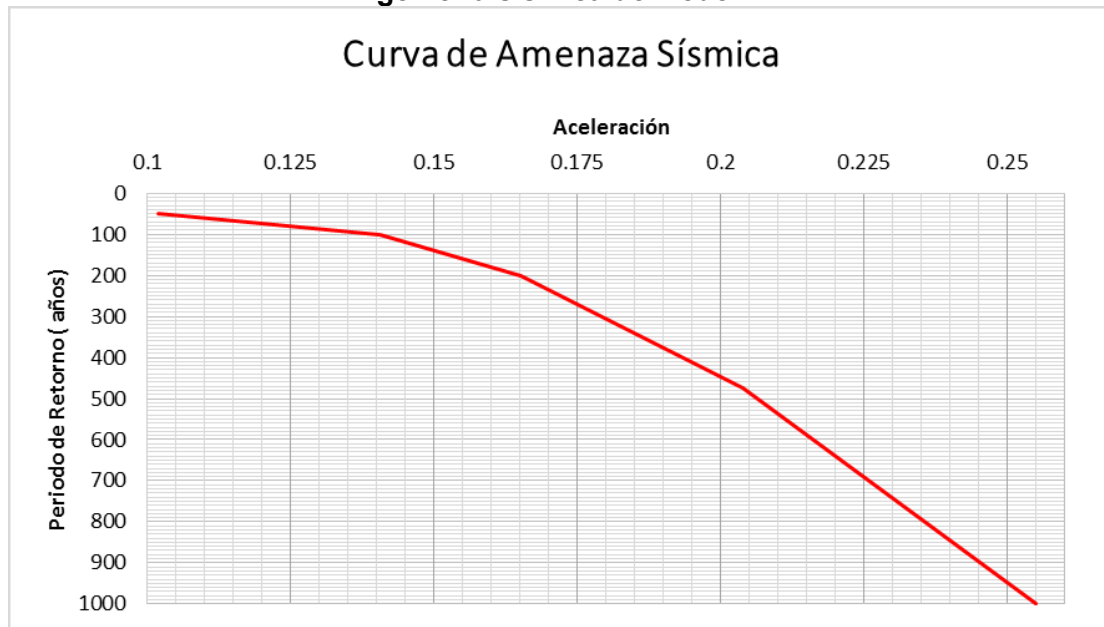
Tabla 4-5. Aceleraciones y probabilidad de ocurrencia del sismo

Periodo de Retorno	Aceleración (G)	Periodo de Diseño	Probabilidad de Excedencia
50	0,1020	50 años	0,63210
100	0,1408	50 años	0,39350
200	0,1652	50 años	0,22120
475	0,2040	50 años	0,09990
1000	0,2550	50 años	0,04880

Fuente: Datos propios,2016

A partir de las aceleraciones encontradas para los diferentes periodos de retorno, se construyó la curva de amenaza sísmica, ver Figura 4-1.

Figura 4-1 Curva de amenaza Sísmica. Fuente: Datos Asociación colombiana de ingeniería sísmica de Medellín



4.1.4. determinación de variables.

Para la determinación de las variables a considerar se visualizó el problema en términos de análisis de datos de campo y laboratorio, como, parámetros geomecánicos y nivel freático, para lo cual se observó que la exploración no registra nivel freático esto quiere decir que el nivel freático fue abatido por las obras de remediación hechas en el sitio.

Por lo anterior, tener solo la condición actual no reflejara dentro de los análisis la condición real, razón por la cual se realizó un retro-cálculo de la condición actual obteniendo un nivel freático crítico.

La determinación de las variables tuvo en cuenta lo anteriormente expuesto, por lo que las variables definidas serán los parámetros intrínsecos del suelo como el ángulo de resistencia y la cohesión, así como el nivel freático.

Para tener en cuenta el nivel freático, se establecen dos condiciones de estado: la primera condición es el estado actual sin nivel freático y la segunda condición es el estado actual con nivel freático. A continuación, se presenta el desarrollo de cada condición y la variación de los parámetros en cada caso.

4.1.4.1. Condición Actual Sin Nivel Freático

Las variables consideradas para esta condición son los parámetros geotécnicos:

Cohesión

Angulo de Fricción

Estas dos variables definidas son el punto de partida para el análisis por confiabilidad.

Una vez conocido esto y a partir de estimativos puntuales, se puede calcular, de acuerdo al número de variables, la desviación estándar, los puntos de muestreo y los coeficientes de asimetría, como se explica a continuación:

Se estable el número de variables, que en este caso serían dos variables (ángulo de resistencia y cohesión).

Mediante la ecuación de estimativos puntuales, se calcula el número de puntos de muestreo, que en este caso serían 4 puntos de muestreo.

Una vez conocidos los puntos de muestreo y a partir de valor medio y desviación estándar se establece la ubicación de los puntos de muestreo.

Una vez calculado los puntos de muestreo y su ubicación, se obtiene la variación de los parámetros geotécnicos, ver Tabla 4-6.

Tabla 4-6. Variación de los Parámetros Geotécnicos

$\phi' - 1$	$c - 1$
20,34	15,70
20,34	0,62
20,16	15,70
20,16	0,62

Fuente: Datos propios,2016

4.1.4.2. *condición actual con nivel freático.*

Para analizar esta condición con nivel freático, se procedió a realizar diferentes análisis que corresponden a:

- Se realizó una modelación variando el nivel freático, hasta encontrar el nivel freático crítico donde el factor de seguridad sea menor o igual a 1 ($F.S < 1$), el análisis se realizó mediante equilibrio límite basado en el método de Bishop simplificado, este procedimiento se realizó mediante el programa de computador SLIDE 6.0 con el objeto de determinar la probabilidad de falla, el resultado de la modelación se presenta a continuación, ver Tabla 4-7.

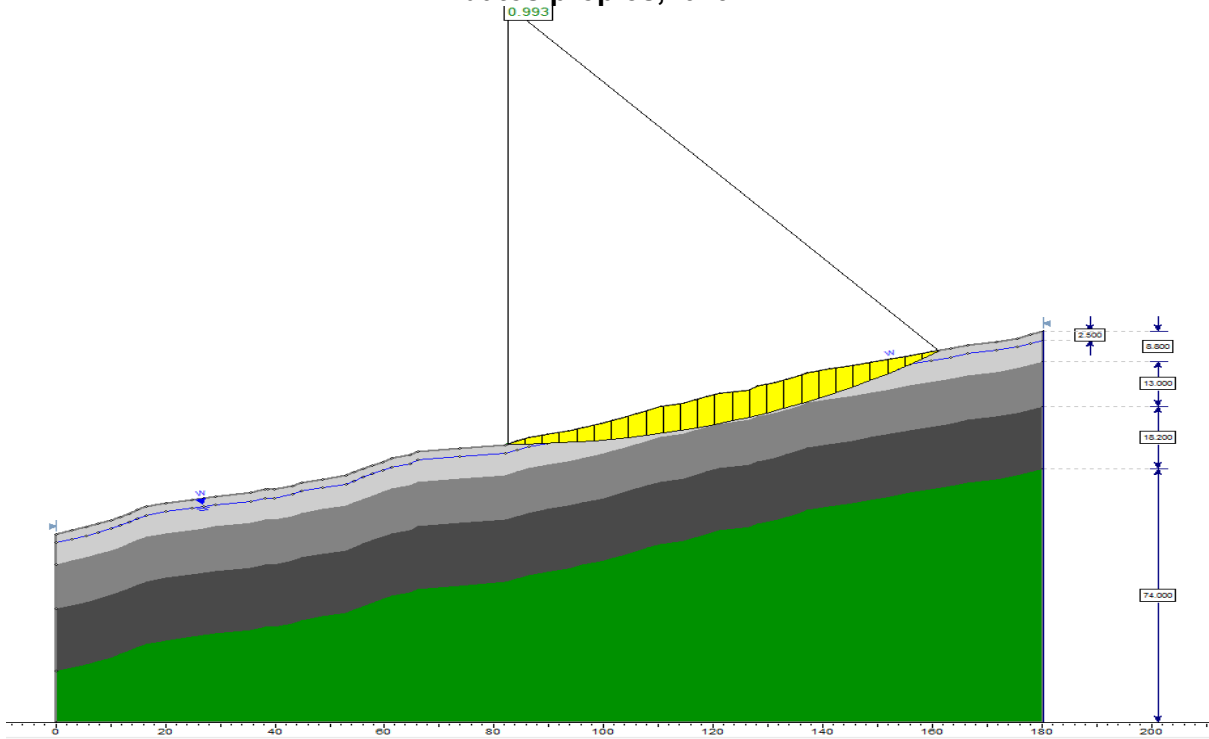
Tabla 4-7. Variación Nivel freático

Modelación	N.F	F.S
1	0,00	0,704
2	0,20	0,729
3	0,30	0,742
4	0,40	0,754
5	0,50	0,766
6	1,00	0,826
7	1,25	0,85
8	1,50	0,883
9	2,00	0,94
10	2,50	0,993
11	2,65	1.008
12	2,75	1.018

Fuente: Datos propios,2016

- Analizando los resultados obtenidos, nos sugiere que el nivel freático crítico se encuentra en el primer estrato, se observa que cuando el nivel freático se encuentra cerca de la superficie a 2.5m, el factor de seguridad es menor que uno ($F.S < 1$), a continuación, se presenta el mecanismo de falla obtenido, ver Figura 4-2.

Figura 4-2. Modelación Condición Actual Nivel Freático 2.50m, Fuente: Modelación datos propios,2016



- Teniendo claro que el nivel freático se encuentra en el estrato superior, se procede a realizar un análisis estadístico, tomando como base los datos pluviométricos de precipitación máxima en 24 horas, donde se obtienen parámetros estadísticos como: la media, la varianza, la desviación estándar, el coeficiente de varianza, el valor medio del nivel freático deducido a partir del nivel freático crítico se establece como el valor medio del estrato superior y se procede a calcular la desviación estándar del nivel freático, ver anexo 4 y Tabla 4-8

Tabla 4-8. Análisis Estadístico de precipitación máxima en 24

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MAX	54,5	66,8	81,8	152,6	80,5	74,6	79,5	63,2	76,0	70,0	82,1	62,0	152,6
MIN	0,0	1,0	4,0	10,2	15,8	7,8	5,2	6,2	12,1	11,6	5,0	5,8	15,8
MEDIA		30,6											
VARIANZA		286,6											
DESV		16,9170											
Coeficiente de Variacion		0,6											
Valor Medio Nivel freatico		4,4m											
Desviación Estándar para nivel freático		2,64m											

Fuente: Datos propios,2016

Las variables consideradas para esta condición son los parámetros geotécnicos y nivel freático:

- Cohesión
- Angulo de Fricción
- Nivel freático

Estas tres variables definidas son el punto de partida para el análisis por confiabilidad.

Una vez conocido esto y a partir de estimativos puntuales, se puede calcular de acuerdo al número de variables, la desviación estándar, los puntos de muestreo y los coeficientes de asimetría, como se muestra a continuación:

- Se estable el número de variables, que en este caso serían tres (ángulo de fricción, cohesión y nivel freático).
- Mediante la ecuación de estimativos puntuales, se calcula el número de puntos de muestreo, que en este caso serían 8 puntos de muestreo.
- Una vez conocido los puntos de muestreo y a partir de valor medio y desviación estándar se establece la ubicación de los puntos de muestreo.
- Una vez calculado los puntos de muestreo y su ubicación, se obtiene la variación de los parámetros, ver Tabla 4-9.

Tabla 4-9. Variación de los Parámetros Geotécnicos

Punto	$\phi' - 1$	$c - 1$	N.F
1	20,34	15,70	7,04
2	20,34	15,70	1,76
3	20,34	0,62	7,04
4	20,34	0,62	1,76
5	20,16	15,70	7,04
6	20,16	15,70	1,76
7	20,16	0,62	7,04
8	20,16	0,62	1,76

Fuente: Datos propios,2016

4.1.5. escenarios de diseño.

Una vez establecidos los puntos de muestreo se procede a establecer los escenarios de diseño que se van a modelar, que en términos generales son las variables definidas con la variación de sus parámetros incluyendo los factores detonantes definidos como lo son el sismo de diseño y la lluvia de diseño.

4.1.5.1. condición actual sin nivel freático

- Condición actual, ver Tabla 4-6.
- Condición actual + Sismo de Diseño, ver Tabla 4-5.
- Condición actual + Lluvia de Diseño, ver Tabla 4-4.
- Condición actual + Sismo de Diseño + Lluvia de Diseño

4.1.5.2. condición actual Con nivel freático

- Condición actual, ver Tabla 4-9.
- Condición actual + Sismo de Diseño, ver Tabla 4-5.
- Condición actual + Lluvia de Diseño, ver Tabla 4-4.
- Condición actual + Sismo de Diseño + Lluvia de Diseño

4.1.6. modelación SLIDE 6.0 - cálculo de probabilidad de falla.

Una vez teniendo los escenarios de diseño, se realizará el análisis del movimiento del talud utilizando el método de equilibrio límite, el cual se basa en las leyes de la estática y no tiene en cuenta las deformaciones del terreno, este método considera un equilibrio global de la masa deslizante que en este caso se utilizaría el método de las dovelas, el cual supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. El análisis se realizó

utilizando el método de Bishop simplificado, con superficies de falla circulares, equilibrio de momentos, donde se asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero, este método consiste en dividir el área de falla en tajadas verticales o dovelas, donde se tiene en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas.

La iteración y modelación de los diferentes escenarios se realizó con el programa de computador SLIDE 6.0 con el objeto de determinar la probabilidad de falla, para las

diferentes simulaciones, donde se calcularon los factores de seguridad de cada escenario. Posteriormente, considerando criterios de incertidumbre de los parámetros geomecánicos de los materiales, y con los factores de seguridad ya calculados, se determinó las probabilidades de falla preliminar y la probabilidad de falla total que es la probabilidad de falla preliminar afectada por la probabilidad de excedencia ya sea por sismo o por lluvia para cada una de los escenarios analizados en cada condición.

4.1.6.1. condición actual sin nivel freático.

Es una condición inicial donde no se reportó nivel freático y se tienen en cuenta parámetros geomecánicos efectivos, pesos unitarios correspondientes, variación de la lluvia en término de infiltración y variación de aceleración para diferentes periodos de retorno.

A continuación, se presentan los factores de seguridad y la probabilidad de falla de cada escenario, ver Tabla 4-10.

Tabla 4-10. Resultados de Modelación Sinn Nivel Freático y Cálculo de Probabilidad de Falla

Simulaciones	Escenario	Punto	$\phi' - 1$	c - 1	Nivel Freático	Sismo	Lluvia	F.S	Media	Deav	β	$\phi (\beta)$	P_f	P_f
1	Actual	1	20,25 °	8KN/m2				1,399						
2	Escenario 1	1	20,34 °	15,70KN/m2				1703	1,26	0,44	0,57624	0,718	0,282	0,282
3		3	20,34 °	0,62KN/m2				0,816						
4		5	20,16 °	15,70KN/m2				1,692						
5		7	20,16 °	0,62KN/m2				0,809						
6	Escenario 2	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,102		1,30	0,98	0,31	-0,057321	0,477	0,523	0,330
7		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,102		0,67						
8		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,102		1,29						
9		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,102		0,67						
10	Escenario 2	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,141		1,19	0,90	0,28	-0,349844	0,363	0,637	0,251
11		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,141		0,62						
12		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,141		1,18						
13		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,141		0,62						
14	Escenario 2	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,165		1,13	0,86	0,27	-0,535679	0,296	0,704	0,156
15		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,165		0,59						
16		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,165		1,12						
17		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,165		0,59						
18	Escenario 2	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,204		1,04	0,79	0,24	-0,863439	0,194	0,806	0,081
19		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,204		0,55						
20		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,204		1,03						
21		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,204		0,55						
22	Escenario 2	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,255		0,94	0,72	0,22	-1,305465	0,096	0,904	0,044
23		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,255		0,50						
24		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,255		0,93						
25		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,255		0,50						
26	Escenario 3	1	20,34 °	15,70KN/m2			0,138	1,703	1,25	0,44	0,572686	0,717	0,283	0,283
27		3	20,34 °	0,62KN/m2			0,138	0,814						
28		5	20,16 °	15,70KN/m2			0,138	1,692						
29		7	20,16 °	0,62KN/m2			0,138	0,807						
30	Escenario 3	1	20,34 °	15,70KN/m2			0,157	1,703	1,25	0,44	0,570915	0,716	0,284	0,284
31		3	20,34 °	0,62KN/m2			0,157	0,813						
32		5	20,16 °	15,70KN/m2			0,157	1,692						
33		7	20,16 °	0,62KN/m2			0,157	0,806						
34	Escenario 3	1	20,34 °	15,70KN/m2			0,176	1,703	1,25	0,44	0,56948	0,715	0,285	0,283
35		3	20,34 °	0,62KN/m2			0,176	0,812						
36		5	20,16 °	15,70KN/m2			0,176	1,692						
37		7	20,16 °	0,62KN/m2			0,176	0,805						
38	Escenario 3	1	20,34 °	15,70KN/m2			0,204	1,703	1,25	0,45	0,566508	0,714	0,286	0,247
39		3	20,34 °	0,62KN/m2			0,204	0,810						
40		5	20,16 °	15,70KN/m2			0,204	1,692						
41		7	20,16 °	0,62KN/m2			0,204	0,804						
42	Escenario 3	1	20,34 °	15,70KN/m2			0,228	1,702	1,25	0,45	0,56363	0,713	0,287	0,181
43		3	20,34 °	0,62KN/m2			0,228	0,809						
44		5	20,16 °	15,70KN/m2			0,228	1,692						
45		7	20,16 °	0,62KN/m2			0,228	0,802						
46	Escenario 3	1	20,34 °	15,70KN/m2			0,255	1,702	1,24	0,45	0,537765	0,705	0,295	0,116
47		3	20,34 °	0,62KN/m2			0,255	0,792						
48		5	20,16 °	15,70KN/m2			0,255	1,692						
49		7	20,16 °	0,62KN/m2			0,255	0,789						
50	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,102	0,138	1,30	0,98	0,32	-0,061059	0,476	0,524	0,331
51		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,102	0,138	0,67						
52		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,102	0,138	1,29						
53		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,102	0,138	0,66						

Simulaciones	Escenario	Punto	$\phi' - 1$	$c - 1$	Nivel Freático	Sismo	Lluvia	F.S	Media	Desv	β	$\phi (\beta)$	P_f	P_f
54	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,141	0,138	1,19	0,90	0,28	-0,352713	0,362	0,638	0,251
55		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,141	0,138	0,62						
56		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,141	0,138	1,18						
57		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,141	0,138	0,61						
58	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,165	0,138	1,13	0,86	0,27	-0,537418	0,295	0,705	0,156
59		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,165	0,138	0,59						
60		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,165	0,138	1,12						
61		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,165	0,138	0,59						
62	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,204	0,138	1,04	0,79	0,24	-0,864002	0,194	0,806	0,081
63		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,204	0,138	0,55						
64		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,204	0,138	1,03						
65		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,204	0,138	0,55						
66	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,255	0,138	0,94	0,72	0,22	-1,304057	0,096	0,904	0,044
67		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,255	0,138	0,50						
68		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,255	0,138	0,93						
69		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,255	0,138	0,50						
70	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,102	0,157	1,30	0,98	0,32	-0,061803	0,475	0,525	0,332
71		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,102	0,157	0,67						
72		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,102	0,157	1,29						
73		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,102	0,157	0,66						
74	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,141	0,157	1,19	0,65	0,36	-0,978733	0,164	0,836	0,329
75		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,141	0,157	0,62						
76		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,141	0,157	0,18						
77		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,141	0,157	0,61						
78	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,165	0,157	1,13	0,86	0,27	-0,537855	0,295	0,705	0,156
79		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,165	0,157	0,59						
80		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,165	0,157	1,12						
81		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,165	0,157	0,59						
82	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,204	0,157	1,04	0,79	0,24	-0,86415	0,194	0,806	0,081
83		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,204	0,157	0,55						
84		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,204	0,157	1,03						
85		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,204	0,157	0,55						
86	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,255	0,157	0,94	0,72	0,22	-1,304057	0,096	0,904	0,044
87		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,255	0,157	0,50						
88		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,255	0,157	0,93						
89		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,255	0,157	0,50						
90	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,102	0,176	1,30	0,98	0,32	-0,063287	0,475	0,525	0,330
91		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,102	0,176	0,67						
92		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,102	0,176	1,29						
93		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,102	0,176	0,66						
94	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,141	0,176	1,19	0,90	0,28	-0,353853	0,362	0,638	0,249
95		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,141	0,176	0,62						
96		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,141	0,176	1,18						
97		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,141	0,176	0,61						
98	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,165	0,176	1,13	0,86	0,27	-0,538283	0,295	0,705	0,155
99		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,165	0,176	0,59						
100		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,165	0,176	1,12						
101		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,165	0,176	0,59						
102	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,204	0,176	1,04	0,79	0,24	-0,864281	0,194	0,806	0,080
103		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,204	0,176	0,55						
104		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,204	0,176	1,03						
105		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,204	0,176	0,54						
106	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,255	0,176	0,94	0,72	0,22	-1,303359	0,096	0,904	0,044
107		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,255	0,176	0,50						
108		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,255	0,176	0,93						
109		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,255	0,176	0,50						

Simulaciones	Escenario	Punto	$\phi' - 1$	c - 1	Nivel Freático	Sismo	Lluvia	F.S	Media	Desv	β	$\phi (\beta)$	P_f	P_f
I10	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,102	0,204	1,30	0,98	0,32	-0,064767	0,474	0,526	0,287
I11		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,102	0,204	0,67						
I12		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,102	0,204	1,29						
I13		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,102	0,204	0,66						
I14	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,141	0,204	1,19	0,90	0,28	-0,354989	0,361	0,639	0,217
I15		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,141	0,204	0,62						
I16		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,141	0,204	1,18						
I17		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,141	0,204	0,61						
I18	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,165	0,204	1,13	0,86	0,27	-0,539578	0,295	0,705	0,135
I19		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,165	0,204	0,59						
I20		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,165	0,204	1,12						
I21		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,165	0,204	0,59						
I22	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,204	0,204	1,04	0,79	0,24	-0,864707	0,194	0,806	0,070
I23		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,204	0,204	0,55						
I24		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,204	0,204	1,03						
I25		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,204	0,204	0,54						
I26	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,255	0,204	0,94	0,72	0,22	-1,305326	0,096	0,904	0,038
I27		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,255	0,204	0,50						
I28		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,255	0,204	0,93						
I29		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,255	0,204	0,50						
I30	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,102	0,228	1,30	0,98	0,32	-0,066978	0,473	0,527	0,210
I31		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,102	0,228	0,66						
I32		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,102	0,228	1,29						
I33		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,102	0,228	0,66						
I34	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,141	0,228	1,19	0,90	0,29	-0,357248	0,360	0,640	0,159
I35		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,141	0,228	0,62						
I36		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,141	0,228	1,18						
I37		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,141	0,228	0,61						
I38	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,165	0,228	1,13	0,85	0,27	-0,540858	0,294	0,706	0,099
I39		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,165	0,228	0,59						
I40		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,165	0,228	1,12						
I41		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,165	0,228	0,58						
I42	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,204	0,228	1,04	0,79	0,24	-0,864984	0,194	0,806	0,051
I43		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,204	0,228	0,55						
I44		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,204	0,228	1,03						
I45		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,204	0,228	0,54						
I46	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,255	0,228	0,94	0,72	0,22	-1,304626	0,096	0,904	0,028
I47		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,255	0,228	0,50						
I48		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,255	0,228	0,93						
I49		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,255	0,228	0,50						
I50	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,102	0,255	1,30	0,97	0,32	-0,085004	0,466	0,534	0,133
I51		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,102	0,255	0,65						
I52		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,102	0,255	1,29						
I53		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,102	0,255	0,65						
I54	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,141	0,255	1,19	0,89	0,29	-0,366681	0,357	0,643	0,100
I55		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,141	0,255	0,61						
I56		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,141	0,255	1,18						
I57		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,141	0,255	0,60						
I58	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,165	0,255	1,13	0,85	0,27	-0,547776	0,292	0,708	0,062
I59		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,165	0,255	0,58						
I60		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,165	0,255	1,12						
I61		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,165	0,255	0,58						
I62	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,204	0,255	1,04	0,79	0,25	-0,865818	0,193	0,807	0,032
I63		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,204	0,255	0,54						
I64		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,204	0,255	1,03						
I65		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,204	0,255	0,54						
I66	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2		0,255	0,255	0,94	0,71	0,22	-1,30393	0,096	0,904	0,017
I67		3	20,34 °	0,62KN/m2		0,255	0,255	0,50						
I68		5	20,16 °	15,70KN/m2		0,255	0,255	0,93						
I69		7	20,16 °	0,62KN/m2		0,255	0,255	0,49						

Fuente: Datos propios,2016

La probabilidad de falla de las 169 modelaciones para diferentes escenarios de diseño es:

P_f	0,99959
-------	---------

4.1.6.2. condición actual con nivel freático.

Es una condición donde se varió el nivel freático, hasta encontrar el nivel freático crítico donde el factor de seguridad es menor o igual a 1 ($F.S \leq 1$). Analizando los resultados obtenidos, nos sugiere que el nivel freático crítico se encuentra en el primer estrato, cerca de la superficie a 2.5m de profundidad, el factor de seguridad es menor que uno ($F.S < 1$).

Adicionalmente se tienen en cuenta parámetros geomecánicos efectivos, pesos unitarios correspondientes, variación de la lluvia en término de infiltración y variación de aceleración para diferentes periodos de retorno.

A continuación, se presenta los factores de seguridad y la probabilidad de falla de cada escenario, ver: Tabla 4-11.

Tabla 4-11. Resultados de Modelación Con Nivel Freático y Cálculo de Probabilidad de Falla

Simulaciones	Escenario	Punto	$\phi' - 1$	c - 1	Nivel Freático	Sismo	Lluvia	F.S	Media	Desv	β	$\Phi (\beta)$	P_f	P_f
171	Escenario 1	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m			1,654	1,07	0,39	0,190906	0,576	0,424	0,424
172		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m			1,212						
173		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m			0,816						
174		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m			0,632						
175		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m			1,644						
176		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m			1,206						
177		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m			0,809						
178		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m			0,626						
179	Escenario 2	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102		1,26	0,82	0,29	-0,601404	0,274	0,726	0,459
180		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102		0,91						
181		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102		0,67						
182		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102		0,47						
183		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102		1,25						
184		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102		0,91						
185		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102		0,67						
186		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102		0,46						
187	Escenario 2	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141		1,14	0,75	0,27	-0,929536	0,176	0,824	0,324
188		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141		0,83						
189		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141		0,62						
190		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141		0,42						
191		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141		1,14						
192		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141		0,83						
193		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141		0,62						
194		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141		0,41						
195	Escenario 2	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165		1,08	0,71	0,25	-1,135355	0,128	0,872	0,193
196		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165		0,78						
197		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165		0,59						
198		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165		0,39						
199		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165		1,08						
200		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165		0,78						
201		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165		0,60						
202		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165		0,39						
203	Escenario 2	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204		1,00	0,65	0,23	-1,476848	0,070	0,930	0,093
204		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204		0,72						
205		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204		0,55						
206		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204		0,36						
207		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204		0,99						
208		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204		0,72						
209		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204		0,55						
210		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204		0,36						
211	Escenario 2	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255		0,90	0,60	0,21	-1,922638	0,027	0,973	0,047
212		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255		0,65						
213		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255		0,55						
214		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255		0,32						
215		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255		0,90						
216		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255		0,64						
217		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255		0,50						
218		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255		0,32						

Simulaciones	Escenario	Punto	$\phi' - 1$	c - 1	Nivel Freático	Sismo	Lluvia	F.S	Media	Desv	β	$\phi (\beta)$	P_f	P_f
219	Escenario 3	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m		0,138	165	1,07	0,39	0,182936	0,573	0,427	0,427
220		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m		0,138	121						
221		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m		0,138	0,81						
222		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m		0,138	0,63						
223		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m		0,138	164						
224		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m		0,138	120						
225		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m		0,138	0,81						
226		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m		0,138	0,62						
227	Escenario 3	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m		0,157	165	1,07	0,39	0,181925	0,572	0,428	0,428
228		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m		0,157	121						
229		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m		0,157	0,81						
230		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m		0,157	0,63						
231		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m		0,157	164						
232		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m		0,157	120						
233		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m		0,157	0,81						
234		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m		0,157	0,62						
235	Escenario 3	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m		0,176	165	1,07	0,39	0,181213	0,572	0,428	0,425
236		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m		0,176	121						
237		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m		0,176	0,81						
238		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m		0,176	0,63						
239		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m		0,176	164						
240		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m		0,176	120						
241		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m		0,176	0,81						
242		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m		0,176	0,62						
243	Escenario 3	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m		0,204	165	1,07	0,39	0,179766	0,571	0,429	0,371
244		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m		0,204	121						
245		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m		0,204	0,81						
246		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m		0,204	0,63						
247		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m		0,204	164						
248		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m		0,204	120						
249		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m		0,204	0,80						
250		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m		0,204	0,62						
251	Escenario 3	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m		0,228	165	1,07	0,39	0,178465	0,571	0,429	0,271
252		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m		0,228	121						
253		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m		0,228	0,81						
254		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m		0,228	0,63						
255		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m		0,228	164						
256		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m		0,228	120						
257		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m		0,228	0,80						
258		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m		0,228	0,62						
259	Escenario 3	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m		0,255	165	1,07	0,40	0,167254	0,566	0,434	0,171
260		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m		0,255	121						
261		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m		0,255	0,79						
262		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m		0,255	0,63						
263		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m		0,255	164						
264		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m		0,255	120						
265		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m		0,255	0,79						
266		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m		0,255	0,62						
267	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102	0,138	126	0,82	0,29	-0,602419	0,273	0,727	0,459
268		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102	0,138	0,91						
269		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102	0,138	0,67						
270		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102	0,138	0,47						
271		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102	0,138	125						
272		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102	0,138	0,91						
273		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102	0,138	0,66						
274		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102	0,138	0,46						

Simulaciones	Escenario	Punto	$\phi' - 1$	c - 1	Nivel Freático	Sismo	Lluvia	F.S	Media	Desv	β	$\phi (\beta)$	P_f	P_f
275	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141	0,138	1,14	0,76	0,27	-0,871179	0,192	0,808	0,318
276		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141	0,138	0,83						
277		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141	0,138	0,62						
278		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141	0,138	0,42						
279		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141	0,138	1,14						
280		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141	0,138	0,93						
281		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141	0,138	0,61						
282		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141	0,138	0,42						
283	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165	0,138	1,08	0,71	0,25	-1,144883	0,126	0,874	0,193
284		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165	0,138	0,78						
285		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165	0,138	0,59						
286		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165	0,138	0,40						
287		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165	0,138	1,08						
288		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165	0,138	0,78						
289		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165	0,138	0,59						
290		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165	0,138	0,39						
291	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204	0,138	1,00	0,65	0,23	-1,486191	0,069	0,931	0,093
292		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204	0,138	0,72						
293		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204	0,138	0,55						
294		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204	0,138	0,36						
295		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204	0,138	0,99						
296		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204	0,138	0,72						
297		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204	0,138	0,55						
298		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204	0,138	0,36						
299	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255	0,138	0,90	0,59	0,21	-1,941111	0,026	0,974	0,048
300		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255	0,138	0,65						
301		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255	0,138	0,50						
302		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255	0,138	0,32						
303		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255	0,138	0,89						
304		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255	0,138	0,64						
305		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255	0,138	0,50						
306		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255	0,138	0,32						
307	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102	0,157	1,26	0,82	0,29	-0,602704	0,273	0,727	0,459
308		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102	0,157	0,91						
309		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102	0,157	0,67						
310		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102	0,157	0,47						
311		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102	0,157	1,25						
312		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102	0,157	0,91						
313		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102	0,157	0,66						
314		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102	0,157	0,46						
315	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141	0,157	1,14	0,75	0,27	-0,936102	0,175	0,825	0,325
316		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141	0,157	0,83						
317		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141	0,157	0,62						
318		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141	0,157	0,42						
319		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141	0,157	1,14						
320		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141	0,157	0,83						
321		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141	0,157	0,61						
322		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141	0,157	0,42						
323	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165	0,157	1,08	0,71	0,25	-1,144446	0,126	0,874	0,193
324		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165	0,157	0,78						
325		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165	0,157	0,59						
326		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165	0,157	0,40						
327		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165	0,157	1,08						
328		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165	0,157	0,78						
329		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165	0,157	0,59						
330		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165	0,157	0,39						

Simulaciones	Escenario	Punto	$\phi' - 1$	c - 1	Nivel Freático	Sismo	Lluvia	F.S	Media	Desv	β	$\phi (\beta)$	P_f	P_f
331	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204	0,157	100	0,65	0,23	-148589	0,069	0,931	0,093
332		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204	0,157	0,72						
333		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204	0,157	0,55						
334		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204	0,157	0,36						
335		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204	0,157	0,99						
336		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204	0,157	0,72						
337		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204	0,157	0,55						
338		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204	0,157	0,36						
339	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255	0,157	0,90	0,59	0,21	-1941111	0,026	0,974	0,048
340		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255	0,157	0,65						
341		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255	0,157	0,50						
342		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255	0,157	0,32						
343		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255	0,157	0,89						
344		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255	0,157	0,64						
345		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255	0,157	0,50						
346		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255	0,157	0,32						
347	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102	0,176	126	0,82	0,29	-0,603279	0,273	0,727	0,456
348		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102	0,176	0,91						
349		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102	0,176	0,67						
350		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102	0,176	0,47						
351		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102	0,176	125						
352		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102	0,176	0,91						
353		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102	0,176	0,66						
354		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102	0,176	0,46						
355	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141	0,176	114	0,75	0,27	-0,936	0,175	0,825	0,323
356		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141	0,176	0,83						
357		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141	0,176	0,62						
358		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141	0,176	0,42						
359		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141	0,176	114						
360		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141	0,176	0,83						
361		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141	0,176	0,61						
362		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141	0,176	0,42						
363	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165	0,176	108	0,71	0,25	-1,144676	0,126	0,874	0,192
364		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165	0,176	0,78						
365		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165	0,176	0,59						
366		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165	0,176	0,40						
367		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165	0,176	108						
368		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165	0,176	0,78						
369		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165	0,176	0,59						
370		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165	0,176	0,39						
371	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204	0,176	100	0,65	0,23	-1486054	0,069	0,931	0,092
372		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204	0,176	0,72						
373		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204	0,176	0,55						
374		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204	0,176	0,36						
375		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204	0,176	0,99						
376		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204	0,176	0,72						
377		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204	0,176	0,54						
378		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204	0,176	0,36						

Simulaciones	Escenario	Punto	$\phi' - 1$	c - 1	Nivel Freático	Sismo	Lluvia	F.S	Media	Desv	β	$\phi (\beta)$	P_f	P_f
379	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255	0,176	0,90	0,59	0,21	-1941316	0,026	0,974	0,047
380		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255	0,176	0,65						
381		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255	0,176	0,50						
382		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255	0,176	0,32						
383		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255	0,176	0,89						
384		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255	0,176	0,64						
385		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255	0,176	0,50						
386		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255	0,176	0,32						
387	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102	0,204	1,26	0,82	0,29	-0,602338	0,273	0,727	0,397
388		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102	0,204	0,92						
389		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102	0,204	0,67						
390		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102	0,204	0,47						
391		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102	0,204	1,25						
392		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102	0,204	0,91						
393		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102	0,204	0,66						
394		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102	0,204	0,46						
395	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141	0,204	1,14	0,75	0,27	-0,934106	0,175	0,825	0,281
396		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141	0,204	0,83						
397		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141	0,204	0,62						
398		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141	0,204	0,42						
399		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141	0,204	1,14						
400		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141	0,204	0,83						
401		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141	0,204	0,61						
402		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141	0,204	0,42						
403	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165	0,204	1,08	0,71	0,25	-1,142495	0,127	0,873	0,167
404		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165	0,204	0,79						
405		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165	0,204	0,59						
406		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165	0,204	0,40						
407		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165	0,204	1,08						
408		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165	0,204	0,78						
409		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165	0,204	0,59						
410		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165	0,204	0,39						
411	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204	0,204	0,99	0,65	0,23	-1,484768	0,069	0,931	0,080
412		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204	0,204	0,72						
413		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204	0,204	0,55						
414		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204	0,204	0,36						
415		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204	0,204	0,99						
416		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204	0,204	0,72						
417		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204	0,204	0,54						
418		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204	0,204	0,36						
419	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255	0,204	0,90	0,59	0,21	-1,937916	0,026	0,974	0,041
420		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255	0,204	0,65						
421		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255	0,204	0,50						
422		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255	0,204	0,32						
423		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255	0,204	0,89						
424		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255	0,204	0,65						
425		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255	0,204	0,50						
426		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255	0,204	0,32						
427	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102	0,228	1,26	0,82	0,29	-0,603813	0,273	0,727	0,290
428		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102	0,228	0,92						
429		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102	0,228	0,66						
430		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102	0,228	0,47						
431		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102	0,228	1,25						
432		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102	0,228	0,91						
433		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102	0,228	0,66						
434		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102	0,228	0,46						

Simulaciones	Escenario	Punto	$\phi' - 1$	c - 1	Nivel Freático	Sismo	Lluvia	F.S	Media	Desv	β	$\phi (\beta)$	P_f	P_f
435	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141	0,228	1,14	0,76	0,27	-0,881308	0,189	0,811	0,202
436		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141	0,228	0,92						
437		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141	0,228	0,62						
438		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141	0,228	0,42						
439		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141	0,228	1,14						
440		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141	0,228	0,83						
441		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141	0,228	0,61						
442		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141	0,228	0,42						
443	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165	0,228	1,08	0,71	0,25	-1,143141	0,126	0,874	0,122
444		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165	0,228	0,79						
445		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165	0,228	0,59						
446		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165	0,228	0,40						
447		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165	0,228	1,08						
448		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165	0,228	0,78						
449		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165	0,228	0,58						
450		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165	0,228	0,39						
451	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204	0,228	0,99	0,65	0,23	-1,485099	0,069	0,931	0,059
452		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204	0,228	0,72						
453		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204	0,228	0,55						
454		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204	0,228	0,36						
455		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204	0,228	0,99						
456		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204	0,228	0,72						
457		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204	0,228	0,54						
458		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204	0,228	0,36						
459	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255	0,228	0,90	0,59	0,21	-1,938102	0,026	0,974	0,030
460		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255	0,228	0,65						
461		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255	0,228	0,50						
462		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255	0,228	0,32						
463		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255	0,228	0,89						
464		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255	0,228	0,65						
465		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255	0,228	0,50						
466		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255	0,228	0,32						
467	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102	0,255	1,25	0,82	0,30	-0,611602	0,270	0,730	0,181
468		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102	0,255	0,92						
469		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102	0,255	0,65						
470		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102	0,255	0,47						
471		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,102	0,255	1,25						
472		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,102	0,255	0,91						
473		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,102	0,255	0,65						
474		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,102	0,255	0,46						
475	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141	0,255	1,14	0,75	0,27	-0,939127	0,174	0,826	0,128
476		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141	0,255	0,83						
477		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141	0,255	0,61						
478		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141	0,255	0,42						
479		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,141	0,255	1,14						
480		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,141	0,255	0,83						
481		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,141	0,255	0,60						
482		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,141	0,255	0,42						
483	Escenario 4	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165	0,255	1,08	0,71	0,25	-1,145883	0,126	0,874	0,076
484		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165	0,255	0,79						
485		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165	0,255	0,58						
486		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165	0,255	0,40						
487		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,165	0,255	1,08						
488		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,165	0,255	0,78						
489		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,165	0,255	0,58						
490		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,165	0,255	0,39						

Simulaciones	Escenario	Punto	$\phi' - 1$	c - 1	Nivel Freático	Sismo	Lluvia	F.S	Media	Desv	β	$\phi (\beta)$	P_f	P_f
491	Escenario 4 29	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204	0,255	0,99	0,65	0,23	-1486069	0,069	0,931	0,037
492		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204	0,255	0,72						
493		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204	0,255	0,54						
494		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204	0,255	0,36						
495		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,204	0,255	0,99						
496		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,204	0,255	0,72						
497		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,204	0,255	0,54						
498		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,204	0,255	0,36						
499	Escenario 4 30	1	20,34 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255	0,255	0,90	0,59	0,21	-1938281	0,026	0,974	0,019
500		2	20,34 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255	0,255	0,65						
501		3	20,34 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255	0,255	0,50						
502		4	20,34 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255	0,255	0,32						
503		5	20,16 °	15,70KN/m2	7,04 m	0,255	0,255	0,89						
504		6	20,16 °	15,70KN/m2	1,76 m	0,255	0,255	0,65						
505		7	20,16 °	0,62KN/m2	7,04 m	0,255	0,255	0,49						
506		8	20,16 °	0,62KN/m2	1,76 m	0,255	0,255	0,32						

Fuente: Datos propios,2016

La probabilidad de falla de las 337 modelaciones para diferentes escenarios de diseño es:

P_f	0,99998
-------	---------

4.2. Evaluación de la Vulnerabilidad

4.2.1. calculo de fuerzas resistentes del suelo.

4.2.1.1. resistencia lateral ultima.

A continuación, se presenta el cálculo de la fuerza lateral última teniendo en cuenta los parámetros del suelo de fundación y los factores de capacidad portante lateral, ver Tabla 4-12.

Tabla 4-12. Calculo de Resistencia Lateral Última

Casos	Parámetros Suelo de Fundación			X	Nch	Nqh	Pu (N/m)
	γt	C'	ϕ				
1	1900,0 Kg/m3	15700,0 N/m2	20,34°	3,71	6,51	3,785	3,59E+04
2	1682,5 Kg/m3	620,0 N/m2	20,34°	3,71	6,51	3,785	3,78E+03
3	2141,4 Kg/m3	15700,0 N/m2	20,16°	3,71	6,51	3,723	3,62E+04
4	2549,3 Kg/m3	620,0 N/m2	20,16°	3,71	6,51	3,723	5,00E+03

Fuente: Datos propios,2016

4.2.1.2. resistencia axial ultima.

A continuación, se presenta el cálculo de la fuerza axial última teniendo en cuenta los parámetros del suelo de relleno y los factores de empuje de tierras e iteración suelo tubería, ver Tabla 4-13.

Tabla 4-13. Calculo de Resistencia Axial Última

Casos	Parámetros del Relleno			α	K_0	δ	t_u (N/m)
	γ_t	C'	ϕ				
1	1900,0 Kg/m ³	10,00 KN/m ²	30,00°	1,02	0,50	24,00°	1,12E+04
2	1900,0 Kg/m ³	10,00 KN/m ²	30,00°	1,02	0,50	24,00°	1,12E+04
3	1900,0 Kg/m ³	10,00 KN/m ²	30,00°	1,02	0,50	24,00°	1,12E+04
4	1900,0 Kg/m ³	10,00 KN/m ²	30,00°	1,02	0,50	24,00°	1,12E+04

Fuente: Datos propios,2016

4.2.2. metodología 1: cálculo de deformación crítica de la tubería y el terreno juntos.

4.2.2.1. calculo de deformación a flexión.

La deformación a flexión se calcula de acuerdo con lo establecido en el marco teórico, donde en su numerador contempla la resistencia lateral ultima y los anchos de deslizamiento considerados con exponente a la 4 y su denominador es una constante multiplicada por el módulo de elasticidad y la inercia; razón por la cual la deformación crítica a flexión aumenta exponencialmente conforme aumenta el ancho del deslizamiento. A continuación, se presenta el cálculo de la deformación a flexión, de acuerdo a la Ecuación 2-29, para los diferentes tipos de suelo y anchos de deslizamiento considerados, ver Tabla 4-14.

Tabla 4-14. Calculo de Deformación a Flexión de la Tubería

Casos	Pu (N/m)	tu (N/m)	W (m)	δ Flexión (m)
1	5,59E+04	1,81E+04	30,0 m	4,8 m
1	5,59E+04	1,81E+04	60,0 m	77,2 m
1	5,59E+04	1,81E+04	90,0 m	390,9 m
1	5,59E+04	1,81E+04	120,0 m	1235,5 m
1	5,59E+04	1,81E+04	150,0 m	3016,3 m
2	2,41E+04	1,81E+04	30,0 m	2,1 m
2	2,41E+04	1,81E+04	60,0 m	33,3 m
2	2,41E+04	1,81E+04	90,0 m	168,6 m
2	2,41E+04	1,81E+04	120,0 m	533,0 m
2	2,41E+04	1,81E+04	150,0 m	1301,2 m
3	5,55E+04	1,81E+04	30,0 m	4,8 m
3	5,55E+04	1,81E+04	60,0 m	76,7 m
3	5,55E+04	1,81E+04	90,0 m	388,3 m
3	5,55E+04	1,81E+04	120,0 m	1227,1 m
3	5,55E+04	1,81E+04	150,0 m	2995,8 m
4	2,37E+04	1,81E+04	30,0 m	2,0 m
4	2,37E+04	1,81E+04	60,0 m	32,8 m
4	2,37E+04	1,81E+04	90,0 m	166,0 m
4	2,37E+04	1,81E+04	120,0 m	524,6 m
4	2,37E+04	1,81E+04	150,0 m	1280,7 m

Fuente: Datos propios,2016

4.2.2.2. *calculo de deformación axial.*

La deformación Axial se calcula de acuerdo con lo establecido en el marco teórico, mediante la Ecuación 2-34, donde se estableció que en el centro de la deformación permanente el desplazamiento del suelo es mayor que el de la tubería y la interacción del suelo y la tubería desarrollara la máxima fuerza resistente lateral. Y como se tiene una sola ecuación y dos incógnitas que en este caso sería el desplazamiento de la tubería y el desplazamiento del suelo, razón por la cual una de las premisas para resolver esta ecuación es asumir que la tubería y el suelo se mueven junto con el mismo desplazamiento por lo que se relaciona la fuerza axial de tensión de la tubería con el desplazamiento del terreno. A continuación, se presenta el cálculo de la deformación axial para los diferentes tipos de suelo y anchos de deslizamiento considerados, ver Tabla 4-15.

Tabla 4-15. Calculo de Deformación axial de la tubería

Casos	Pu (N/m)	tu (N/m)	W (m)	δ Axial (m)	σ axial (Pa)
1	5,59E+04	1,81E+04	30,0 m	1,418 m	2,29E+08
1	5,59E+04	1,81E+04	60,0 m	3,411 m	3,80E+08
1	5,59E+04	1,81E+04	90,0 m	5,705 m	5,12E+08
1	5,59E+04	1,81E+04	120,0 m	8,218 m	6,31E+08
1	5,59E+04	1,81E+04	150,0 m	10,911 m	7,43E+08
2	2,41E+04	1,81E+04	30,0 m	0,955 m	1,46E+08
2	2,41E+04	1,81E+04	60,0 m	2,313 m	2,42E+08
2	2,41E+04	1,81E+04	90,0 m	3,882 m	3,24E+08
2	2,41E+04	1,81E+04	120,0 m	5,608 m	3,99E+08
2	2,41E+04	1,81E+04	150,0 m	7,462 m	4,69E+08
3	5,55E+04	1,81E+04	30,0 m	1,413 m	2,28E+08
3	5,55E+04	1,81E+04	60,0 m	3,401 m	3,79E+08
3	5,55E+04	1,81E+04	90,0 m	5,687 m	5,10E+08
3	5,55E+04	1,81E+04	120,0 m	8,193 m	6,29E+08
3	5,55E+04	1,81E+04	150,0 m	10,877 m	7,40E+08
4	2,37E+04	1,81E+04	30,0 m	0,948 m	1,45E+08
4	2,37E+04	1,81E+04	60,0 m	2,296 m	2,40E+08
4	2,37E+04	1,81E+04	90,0 m	3,855 m	3,21E+08
4	2,37E+04	1,81E+04	120,0 m	5,569 m	3,96E+08
4	2,37E+04	1,81E+04	150,0 m	7,410 m	4,64E+08

Fuente: Datos propios,2016

4.2.2.3. *calculo de deformación crítica.*

La deformación crítica se calcula de acuerdo con lo establecido en el marco teórico, mediante la Ecuación 2-35, teniendo en cuenta que la componente a flexión está dada para deformaciones permanentes pequeñas que corresponden a una tubería rígida, representada por una viga con 2 extremos fijos, soportando una carga distribuida uniforme, para la cual la deflexión máxima se presenta en el centro de luz. Por otro lado, la componente axial está dada para deformaciones permanentes muy grandes que corresponde a una tubería flexible es decir que se comporta como un cable flexible y su comportamiento está dado por la fuerza axial. En general, si se considera que la componente axial y de flexión involucradas en el concepto de deformación crítica actúan en paralelo, la deformación crítica para cualquier ancho de la zona de deformaciones

permanentes, W. A continuación, se presenta el cálculo de la deformación crítica para los diferentes tipos de suelo y anchos de deslizamiento considerados, ver Tabla 4-16.

Tabla 4-16. Calculo de Deformación Crítica

Casos	Pu (N/m)	tu (N/m)	W (m)	δ Axial (m)	δ Flexión (m)	δ crit (m)
1	5,59E+04	1,81E+04	30,0 m	1,418 m	4,8 m	1,096 m
1	5,59E+04	1,81E+04	60,0 m	3,411 m	77,2 m	3,267 m
1	5,59E+04	1,81E+04	90,0 m	5,705 m	390,9 m	5,623 m
1	5,59E+04	1,81E+04	120,0 m	8,218 m	1235,5 m	8,164 m
1	5,59E+04	1,81E+04	150,0 m	10,911 m	3016,3 m	10,872 m
2	2,41E+04	1,81E+04	30,0 m	0,955 m	2,1 m	0,655 m
2	2,41E+04	1,81E+04	60,0 m	2,313 m	33,3 m	2,163 m
2	2,41E+04	1,81E+04	90,0 m	3,882 m	168,6 m	3,795 m
2	2,41E+04	1,81E+04	120,0 m	5,608 m	533,0 m	5,550 m
2	2,41E+04	1,81E+04	150,0 m	7,462 m	1301,2 m	7,419 m
3	5,55E+04	1,81E+04	30,0 m	1,413 m	4,8 m	1,091 m
3	5,55E+04	1,81E+04	60,0 m	3,401 m	76,7 m	3,257 m
3	5,55E+04	1,81E+04	90,0 m	5,687 m	388,3 m	5,605 m
3	5,55E+04	1,81E+04	120,0 m	8,193 m	1227,1 m	8,139 m
3	5,55E+04	1,81E+04	150,0 m	10,877 m	2995,8 m	10,838 m
4	2,37E+04	1,81E+04	30,0 m	0,948 m	2,0 m	0,648 m
4	2,37E+04	1,81E+04	60,0 m	2,296 m	32,8 m	2,146 m
4	2,37E+04	1,81E+04	90,0 m	3,855 m	166,0 m	3,767 m
4	2,37E+04	1,81E+04	120,0 m	5,569 m	524,6 m	5,510 m
4	2,37E+04	1,81E+04	150,0 m	7,410 m	1280,7 m	7,367 m

Fuente: Datos propios,2016

4.2.2.4. calculo de deformación unitaria, % vulnerabilidad.

La deformación unitaria se calculó conforme a lo establecido en el marco teórico; mediante la Ecuación 2-38, variando el esfuerzo desde cero, pasando por el esfuerzo de fluencia y terminando en la resistencia última a la tensión (esfuerzo de rotura), con el fin de determinar la deformación en el rango elástico, plástico y rotura, adicionalmente se calculó el porcentaje de vulnerabilidad tomando como el 100% la resistencia última a la rotura. A continuación, se presenta el cálculo de deformación unitaria y % de vulnerabilidad, ver Tabla 4-17.

Tabla 4-17. Calculo de Deformación Unitaria - % Vulnerabilidad

σ (Pa)	ϵ (%)	% Vulnerabilidad
0,00E+00	0,00%	0,00%
1,00E+08	0,05%	21,98%
1,20E+08	0,06%	26,37%
1,40E+08	0,07%	30,77%
1,60E+08	0,08%	35,16%
1,80E+08	0,09%	39,56%
2,00E+08	0,10%	43,96%
2,20E+08	0,11%	48,35%
2,40E+08	0,12%	52,75%
2,60E+08	0,13%	57,14%
2,80E+08	0,14%	61,54%
2,90E+08	0,15%	63,74%
3,00E+08	0,16%	65,93%
3,10E+08	0,18%	68,13%
3,20E+08	0,19%	70,33%
3,30E+08	0,21%	72,53%
3,40E+08	0,24%	74,73%
3,50E+08	0,28%	76,92%
3,58E+08	0,31%	78,68%
3,70E+08	0,38%	81,32%
3,80E+08	0,45%	83,52%
3,90E+08	0,54%	85,71%
4,00E+08	0,66%	87,91%
4,10E+08	0,82%	90,11%
4,20E+08	1,01%	92,31%
4,30E+08	1,25%	94,51%
4,40E+08	1,56%	96,70%
4,50E+08	1,94%	98,90%
4,55E+08	2,17%	100,00%

Fuente: Datos propios,2016

4.2.2.5. *calculo de desplazamiento.*

El desplazamiento se calculó conforme a lo establecido en el marco teórico; mediante la Ecuación 2-36 y Ecuación 2-37, teniendo en cuenta el cálculo previamente realizado de deformación unitaria y el porcentaje de vulnerabilidad, ver Tabla 4-17, el cálculo de desplazamiento tuvo en cuenta el ancho del deslizamiento y fuerza resistente axial del terreno, así como su esfuerzo. A continuación, se presenta el cálculo de desplazamiento para los diferentes anchos del deslizamiento con su correspondiente deformación unitaria y porcentaje de vulnerabilidad:

- Para un ancho de deslizamiento de 30m, ver Tabla 4-18.

Tabla 4-18. Calculo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 30m

tu (N/m)	W (m)	σ (Pa)	ε (%)	δ (m)	% Vulnerabilidad
1,81E+04	30,0 m	0,00E+00	0,00%	0,0 m	0,00%
1,81E+04	30,0 m	1,00E+08	0,05%	0,1 m	21,98%
1,81E+04	30,0 m	1,20E+08	0,06%	0,1 m	26,37%
1,81E+04	30,0 m	1,40E+08	0,07%	0,2 m	30,77%
1,81E+04	30,0 m	1,60E+08	0,08%	0,2 m	35,16%
1,81E+04	30,0 m	1,80E+08	0,09%	0,2 m	39,56%
1,81E+04	30,0 m	2,00E+08	0,10%	0,2 m	43,96%
1,81E+04	30,0 m	2,20E+08	0,11%	0,2 m	48,35%
1,81E+04	30,0 m	2,40E+08	0,12%	0,3 m	52,75%
1,81E+04	30,0 m	2,60E+08	0,13%	0,3 m	57,14%
1,81E+04	30,0 m	2,80E+08	0,14%	0,3 m	61,54%
1,81E+04	30,0 m	2,90E+08	0,15%	0,3 m	63,74%
1,81E+04	30,0 m	3,00E+08	0,16%	0,4 m	65,93%
1,81E+04	30,0 m	3,10E+08	0,18%	0,4 m	68,13%
1,81E+04	30,0 m	3,20E+08	0,19%	0,4 m	70,33%
1,81E+04	30,0 m	3,30E+08	0,21%	0,5 m	72,53%
1,81E+04	30,0 m	3,40E+08	0,24%	0,5 m	74,73%
1,81E+04	30,0 m	3,50E+08	0,28%	0,6 m	76,92%
1,81E+04	30,0 m	3,58E+08	0,31%	0,7 m	78,68%
1,81E+04	30,0 m	3,70E+08	0,38%	0,9 m	81,32%
1,81E+04	30,0 m	3,80E+08	0,45%	1,0 m	83,52%
1,81E+04	30,0 m	3,90E+08	0,54%	1,2 m	85,71%
1,81E+04	30,0 m	4,00E+08	0,66%	1,5 m	87,91%
1,81E+04	30,0 m	4,10E+08	0,82%	1,8 m	90,11%
1,81E+04	30,0 m	4,20E+08	1,01%	2,3 m	92,31%
1,81E+04	30,0 m	4,30E+08	1,25%	2,8 m	94,51%
1,81E+04	30,0 m	4,40E+08	1,56%	3,5 m	96,70%
1,81E+04	30,0 m	4,50E+08	1,94%	4,4 m	98,90%
1,81E+04	30,0 m	4,55E+08	2,17%	4,9 m	100,00%

Fuente: Datos propios,2016

- Para un ancho de deslizamiento de 60m, ver Tabla 4-19.

Tabla 4-19. Calculo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 60m

tu (N/m)	W (m)	σ (Pa)	ϵ (%)	δ (m)	% Vulnerabilidad
1,81E+04	60,0 m	0,00E+00	0,00%	0,0 m	0,00%
1,81E+04	60,0 m	1,00E+08	0,05%	0,3 m	21,98%
1,81E+04	60,0 m	1,20E+08	0,06%	0,4 m	26,37%
1,81E+04	60,0 m	1,40E+08	0,07%	0,4 m	30,77%
1,81E+04	60,0 m	1,60E+08	0,08%	0,5 m	35,16%
1,81E+04	60,0 m	1,80E+08	0,09%	0,6 m	39,56%
1,81E+04	60,0 m	2,00E+08	0,10%	0,6 m	43,96%
1,81E+04	60,0 m	2,20E+08	0,11%	0,7 m	48,35%
1,81E+04	60,0 m	2,40E+08	0,12%	0,8 m	52,75%
1,81E+04	60,0 m	2,60E+08	0,13%	0,9 m	57,14%
1,81E+04	60,0 m	2,80E+08	0,14%	0,9 m	61,54%
1,81E+04	60,0 m	2,90E+08	0,15%	1,0 m	63,74%
1,81E+04	60,0 m	3,00E+08	0,16%	1,1 m	65,93%
1,81E+04	60,0 m	3,10E+08	0,18%	1,2 m	68,13%
1,81E+04	60,0 m	3,20E+08	0,19%	1,3 m	70,33%
1,81E+04	60,0 m	3,30E+08	0,21%	1,4 m	72,53%
1,81E+04	60,0 m	3,40E+08	0,24%	1,6 m	74,73%
1,81E+04	60,0 m	3,50E+08	0,28%	1,8 m	76,92%
1,81E+04	60,0 m	3,58E+08	0,31%	2,1 m	78,68%
1,81E+04	60,0 m	3,70E+08	0,38%	2,5 m	81,32%
1,81E+04	60,0 m	3,80E+08	0,45%	3,0 m	83,52%
1,81E+04	60,0 m	3,90E+08	0,54%	3,6 m	85,71%
1,81E+04	60,0 m	4,00E+08	0,66%	4,4 m	87,91%
1,81E+04	60,0 m	4,10E+08	0,82%	5,4 m	90,11%
1,81E+04	60,0 m	4,20E+08	1,01%	6,7 m	92,31%
1,81E+04	60,0 m	4,30E+08	1,25%	8,3 m	94,51%
1,81E+04	60,0 m	4,40E+08	1,56%	10,4 m	96,70%
1,81E+04	60,0 m	4,50E+08	1,94%	12,9 m	98,90%
1,81E+04	61,0 m	4,55E+08	2,17%	14,8 m	100,00%

Fuente: Datos propios,2016

- Para un ancho de deslizamiento de 90m, ver Tabla 4-20.

Tabla 4-20. Calculo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 90m

tu (N/m)	W (m)	σ (Pa)	ε (%)	δ (m)	% Vulnerabilidad
1,81E+04	90,0 m	0,00E+00	0,00%	0,0 m	0,00%
1,81E+04	90,0 m	1,00E+08	0,05%	0,5 m	21,98%
1,81E+04	90,0 m	1,20E+08	0,06%	0,6 m	26,37%
1,81E+04	90,0 m	1,40E+08	0,07%	0,7 m	30,77%
1,81E+04	90,0 m	1,60E+08	0,08%	0,9 m	35,16%
1,81E+04	90,0 m	1,80E+08	0,09%	1,0 m	39,56%
1,81E+04	90,0 m	2,00E+08	0,10%	1,1 m	43,96%
1,81E+04	90,0 m	2,20E+08	0,11%	1,2 m	48,35%
1,81E+04	90,0 m	2,40E+08	0,12%	1,3 m	52,75%
1,81E+04	90,0 m	2,60E+08	0,13%	1,4 m	57,14%
1,81E+04	90,0 m	2,80E+08	0,14%	1,6 m	61,54%
1,81E+04	90,0 m	2,90E+08	0,15%	1,7 m	63,74%
1,81E+04	90,0 m	3,00E+08	0,16%	1,8 m	65,93%
1,81E+04	90,0 m	3,10E+08	0,18%	2,0 m	68,13%
1,81E+04	90,0 m	3,20E+08	0,19%	2,2 m	70,33%
1,81E+04	90,0 m	3,30E+08	0,21%	2,4 m	72,53%
1,81E+04	90,0 m	3,40E+08	0,24%	2,7 m	74,73%
1,81E+04	90,0 m	3,50E+08	0,28%	3,1 m	76,92%
1,81E+04	90,0 m	3,58E+08	0,31%	3,5 m	78,68%
1,81E+04	90,0 m	3,80E+08	0,45%	5,0 m	83,52%
1,81E+04	90,0 m	3,90E+08	0,54%	6,1 m	85,71%
1,81E+04	90,0 m	4,00E+08	0,66%	7,4 m	87,91%
1,81E+04	90,0 m	4,10E+08	0,82%	9,1 m	90,11%
1,81E+04	90,0 m	4,20E+08	1,01%	11,3 m	92,31%
1,81E+04	90,0 m	4,30E+08	1,25%	14,0 m	94,51%
1,81E+04	90,0 m	4,40E+08	1,56%	17,4 m	96,70%
1,81E+04	90,0 m	4,50E+08	1,94%	21,7 m	98,90%
1,81E+04	90,0 m	4,55E+08	2,17%	24,2 m	100,00%

Fuente: Datos propios,2016

- Para un ancho de deslizamiento de 120m, ver Tabla 4-21.

Tabla 4-21. Calculo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 120m

tu (N/m)	W (m)	σ (Pa)	ε (%)	δ (m)	% Vulnerabilidad
1,81E+04	120,0 m	0,00E+00	0,00%	0,0 m	0,00%
1,81E+04	120,0 m	1,00E+08	0,05%	0,7 m	21,98%
1,81E+04	120,0 m	1,20E+08	0,06%	0,9 m	26,37%
1,81E+04	120,0 m	1,40E+08	0,07%	1,0 m	30,77%
1,81E+04	120,0 m	1,60E+08	0,08%	1,2 m	35,16%
1,81E+04	120,0 m	1,80E+08	0,09%	1,3 m	39,56%
1,81E+04	120,0 m	2,00E+08	0,10%	1,5 m	43,96%
1,81E+04	120,0 m	2,20E+08	0,11%	1,6 m	48,35%
1,81E+04	120,0 m	2,40E+08	0,12%	1,8 m	52,75%
1,81E+04	120,0 m	2,60E+08	0,13%	1,9 m	57,14%
1,81E+04	120,0 m	2,80E+08	0,14%	2,2 m	61,54%
1,81E+04	120,0 m	2,90E+08	0,15%	2,3 m	63,74%
1,81E+04	120,0 m	3,00E+08	0,16%	2,5 m	65,93%
1,81E+04	120,0 m	3,10E+08	0,18%	2,7 m	68,13%
1,81E+04	120,0 m	3,20E+08	0,19%	2,9 m	70,33%
1,81E+04	120,0 m	3,30E+08	0,21%	3,3 m	72,53%
1,81E+04	120,0 m	3,40E+08	0,24%	3,7 m	74,73%
1,81E+04	120,0 m	3,50E+08	0,28%	4,2 m	76,92%
1,81E+04	120,0 m	3,58E+08	0,31%	4,7 m	78,68%
1,81E+04	120,0 m	3,70E+08	0,38%	5,7 m	81,32%
1,81E+04	120,0 m	3,80E+08	0,45%	6,9 m	83,52%
1,81E+04	120,0 m	3,90E+08	0,54%	8,3 m	85,71%
1,81E+04	120,0 m	4,00E+08	0,66%	10,1 m	87,91%
1,81E+04	120,0 m	4,10E+08	0,82%	12,4 m	90,11%
1,81E+04	120,0 m	4,20E+08	1,01%	15,4 m	92,31%
1,81E+04	120,0 m	4,30E+08	1,25%	19,1 m	94,51%
1,81E+04	120,0 m	4,40E+08	1,56%	23,7 m	96,70%
1,81E+04	120,0 m	4,50E+08	1,94%	29,6 m	98,90%
1,81E+04	120,0 m	4,55E+08	2,17%	33,0 m	100,00%

Fuente: Datos propios,2016

- Para un ancho de deslizamiento de 150m, ver Tabla 4-22.

Tabla 4-22. Calculo de desplazamiento para ancho de deslizamiento de 150m

tu (N/m)	W (m)	σ (Pa)	ε (%)	δ (m)	% Vulnerabilidad
1,81E+04	150,0 m	0,00E+00	0,00%	0,0 m	0,00%
1,81E+04	150,0 m	1,00E+08	0,05%	0,9 m	21,98%
1,81E+04	150,0 m	1,20E+08	0,06%	1,1 m	26,37%
1,81E+04	150,0 m	1,40E+08	0,07%	1,3 m	30,77%
1,81E+04	150,0 m	1,60E+08	0,08%	1,4 m	35,16%
1,81E+04	150,0 m	1,80E+08	0,09%	1,6 m	39,56%
1,81E+04	150,0 m	2,00E+08	0,10%	1,8 m	43,96%
1,81E+04	150,0 m	2,20E+08	0,11%	2,0 m	48,35%
1,81E+04	150,0 m	2,40E+08	0,12%	2,2 m	52,75%
1,81E+04	150,0 m	2,60E+08	0,13%	2,4 m	57,14%
1,81E+04	150,0 m	2,80E+08	0,14%	2,7 m	61,54%
1,81E+04	150,0 m	2,90E+08	0,15%	2,9 m	63,74%
1,81E+04	150,0 m	3,00E+08	0,16%	3,1 m	65,93%
1,81E+04	150,0 m	3,10E+08	0,18%	3,3 m	68,13%
1,81E+04	150,0 m	3,20E+08	0,19%	3,6 m	70,33%
1,81E+04	150,0 m	3,30E+08	0,21%	4,0 m	72,53%
1,81E+04	150,0 m	3,40E+08	0,24%	4,5 m	74,73%
1,81E+04	150,0 m	3,50E+08	0,28%	5,2 m	76,92%
1,81E+04	150,0 m	3,58E+08	0,31%	5,8 m	78,68%
1,81E+04	150,0 m	3,70E+08	0,38%	7,1 m	81,32%
1,81E+04	150,0 m	3,80E+08	0,45%	8,5 m	83,52%
1,81E+04	150,0 m	3,90E+08	0,54%	10,2 m	85,71%
1,81E+04	150,0 m	4,00E+08	0,66%	12,5 m	87,91%
1,81E+04	150,0 m	4,10E+08	0,82%	15,4 m	90,11%
1,81E+04	150,0 m	4,20E+08	1,01%	19,0 m	92,31%
1,81E+04	150,0 m	4,30E+08	1,25%	23,6 m	94,51%
1,81E+04	150,0 m	4,40E+08	1,56%	29,4 m	96,70%
1,81E+04	150,0 m	4,50E+08	1,94%	36,6 m	98,90%
1,81E+04	150,0 m	4,55E+08	2,17%	40,8 m	100,00%

Fuente: Datos propios,2016

4.2.3. metodología 2: cálculo de desplazamiento del terreno.

Este método consiste en calcular el desplazamiento del terreno, conforme a lo establecido en el marco teórico, mediante la Ecuación 2-23, donde depende expresamente de las propiedades mecánicas del material a deslizar, así como la geometría del talud. A continuación, se presenta las propiedades geomecánicas y la geometría del talud, ver Figura 4-3.

Figura 4-3. Geometría del talud y Mecanismo de falla. Fuente: Datos propios,2016

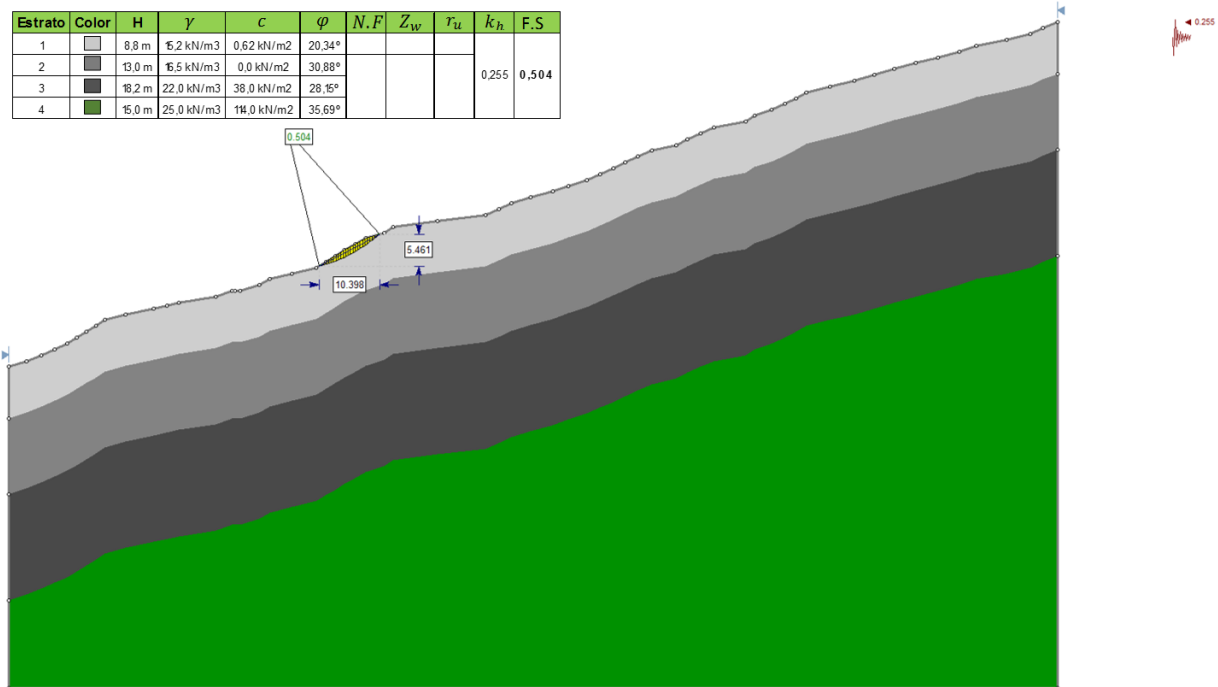


Tabla 4-23. Calculo del desplazamiento del terreno

H (talud)=	5,5 m
L (talud)=	10,4 m
β (talud)=	27,71°
ϕ	20,34°

d =	4,3 m
-----	-------

Fuente: Datos propios,2016

Para el análisis se tomó un talud fallado con diferentes factores de seguridad que varían entre 0.81 y 0.5, con el fin de analizar y tomar el desplazamiento más crítico para este

análisis, no obstante, se evidencio que cuando un talud falla tiene más del 90% de su desplazamiento total.

Una vez calculado el desplazamiento del terreno, se procede a calcular la deformación unitaria y el porcentaje de vulnerabilidad conforme a lo establecido en el numeral 4.2.2.4, adicionalmente se procede a calcular el desplazamiento de la tubería conforme a lo establecido en el numeral 4.2.2.5.

Una vez surtido el paso anterior se procede a revisar de acuerdo al desplazamiento que porcentaje de vulnerabilidad le corresponde con el fin de determinar la deformación de la tubería y establecer el rango en que se encuentra la tubería que puede ser elástico, plástico o de rotura.

4.3. Evaluación del Riesgo

4.3.1. determinación de la peligrosidad del producto.

4.3.1.1. *peligro agudo*

La determinación del peligro agudo se basa en el tipo de producto transportado donde se identifican sus características principales en las fichas de seguridad y sustancias químicas peligrosas, características correspondientes inflamabilidad, reactividad y toxicidad, para este caso el producto evaluado es gasolina y sus características y calificación de acuerdo a la regulación son:

- Inflamabilidad: de acuerdo a la escala de la NFPA, ver Tabla 4-24 , el valor asignado es **3**

Tabla 4-24. Valores de Inflamabilidad

Descripcion	Nf
No combustible	0
FP > 200°F	1
10°F < FP < 200°F	2
FP < 100°F and BP < 100°F	3
FP < 73°F and BP < 100°F	4

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

- Reactividad: de acuerdo a la escala de la NFPA, ver Tabla 4-25, el valor asignado es 4

Tabla 4-25. Valores de Reactividad

Descripcion Exotermia °c	Nr
>400	0
305 - 400	1
215 - 305	2
125 - 215	3
< 125	4

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

- Toxicidad: de acuerdo a la escala de la NFPA, ver Tabla 4-26, el valor asignado es 2

Tabla 4-26. Valores de toxicidad

Descripcion	Nh
No hay peligro de que más allá de los combustibles comunes	0
lesión residual menor Sólo es probable	1
La atención médica inmediata necesaria	2
Materiales que causan lesiones serias o con consecuencias	3
La exposición a corto cause la muerte o lesión grave	4

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

De acuerdo a la Ecuación 2-43, se evalúa el peligro agudo, dando como resultado **RA = 9**.

4.3.1.2. peligro crónico.

La determinación del peligro crónico el cual afecta al medio ambiente por largo periodo de tiempo y el cual requiere actividades especiales de limpieza o remediación, este parámetro fue obtenido del manual de Pipeline risk management de Muhlbauer, para este caso el producto evaluado es combustible y su estimación de peligro crónico es:

- Peligro Crónico: de acuerdo a las cantidades reportadas se indica en los reglamentos de EE. UU y de acuerdo a la clasificación del producto químico en cada una de estas categorías, ver Tabla 4-27, el valor asignado es **6**

Tabla 4-27. Valores de peligro crónico

Descripcion	RQ	Peligro Cronico
Metano, etano, propano, etileno, propileno	5000	2
Gasolina, diesel, Kerosene	100	6
Agua, Nitrogeno, Hidrogeno	0	0

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

4.3.1.3. calculo de peligrosidad de las sustancias.

La determinación de la peligrosidad de la sustancia (combustible) es la suma algebraica del peligro agudo el cual se define como un comienzo repentino y demanda una atención inmediata más el peligro crónico el cual se establece que cuando sus efectos y las acciones para eliminarlo son de larga duración. De acuerdo a la Ecuación 2-42, se calcula la peligrosidad de la sustancia, dando como resultado **PS = 15**.

4.3.2. calculo del volumen liberado.

4.3.2.1. volumen liberado.

Para este caso en particular donde se transporta combustible y el diámetro de la tubería es de 12", la velocidad corresponde a 120.000 Barriles/día correspondiente a 0.78 pie³/seg.

Para determinar el volumen liberado, se realiza una correlación que depende del peso molecular del producto como se observa a continuación:

$$0.78 \frac{\text{pies}^3}{\text{seg}} * \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} = 46.8 \text{ pies}^3 / \text{min} \rightarrow 10 \text{ min} \rightarrow 468 \text{ pies}^3$$

$$1 \text{ lt} = 2.205 \text{ lb}$$

$$1 \text{ pie}^3 = 0.178 \text{ barriles} = 28.32 \text{ lt} = 0.0283 \text{ m}^3$$

$$468 \text{ pies}^3 * \frac{28.32 \text{ lt}}{1 \text{ pie}^3} * \frac{2.205 \text{ lb}}{1 \text{ lt}} = 29224.54 \text{ lb}$$

El volumen liberado después de 10 minutos es 29224.54 lb y de acuerdo a la Tabla 4-28, la calificación obtenida es 3

Tabla 4-28. Volumen liberado (lb) después de 10 minutos

Peso Molecular	0 - 5.000	5.000 - 50.000	50.000 - 500.000	>500.000
> 50	1 punto	2 Puntos	3 puntos	3 puntos
28 - 49	2 punto	3 Puntos	4 puntos	5 puntos
< 27	3 punto	4 Puntos	5 puntos	6 puntos

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

4.3.3. fase IV: cálculo del factor de dispersión.

4.3.3.1. factor de dispersión.

El factor de dispersión es evaluado teniendo en cuenta la velocidad de liberación del producto (combustible) en lb/hora, se califica la dispersión por vulnerabilidad de la tubería en función de la velocidad.

El volumen liberado después de 1 hora es $2808 \text{pies}^3/\text{hora} \rightarrow 175347 \text{lb}/\text{hora}$ y de acuerdo a la Tabla 4-29, la calificación obtenida es 4

Tabla 4-29. Dispersión

Libras/hora	Puntuacion por Vulnerabilidad
< 1.000	1
1.001 - 10.000	2
10.001 - 100.000	3
100.001 - 1.000.000	4
> 1.000.001	5

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

4.3.4. características del receptor.

4.3.4.1. receptor.

Para la evaluación del receptor se toma una traza de 0.4Km², que implica un búfer de 400 metros y una longitud de 1 km, que permite identificar las diferentes densidades poblacionales, para este caso la densidad poblacional característica es semi-rural que tiene una calificación de 4, de acuerdo a las densidades poblaciones establecidas y su calificación, ver Tabla 4-30.

Tabla 4-30. Densidades Poblacionales

Descripcion	Rango de calificacion	Calificacion
Poblacion	0 -10	10
Zona de Alto Valor	0 - 10	10
Tierras públicas (parques y bosques nacionales)	0-5	3
humedales	0-5	5
Bocatomas	0-5	5
aguas	0-5	5
cursos de agua navegables comercialmente	0-5	3
Total	45	41

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

4.3.5. fase VI: cálculo de factor de impacto al medio ambiente.

De acuerdo al modelo de Mulhbauer (2004) y a la interpretación de la ecuación para el cálculo del factor de impacto al medio ambiente, se ha propuesto una desviación a la ecuación que resulta un poco más entendible, la variación consiste en sumar los cuatro términos de la ecuación y como se conoce previamente que cada termino se encuentra en un rango de valores determinado se dividirá sobre este valor total para dar como resultado el 100% que corresponderá al factor de impacto.

La ecuación propuesta, se presenta a continuación, ver Ecuación 4-1, la calificación propuesta por cada término se observa en la Tabla 4-31, este puntaje es propuesto por el modelo de Muhlbauer.

Ecuación 4-1. $FI = \frac{PS+VL+D+R}{\# \text{ puntaje total}}$

Tabla 4-31. Tabla de puntaje

Terminos	Calificacion
PS	22
VL	6
D	5
R	45
Total Puntaje	78

Fuente: Datos propios, 2016

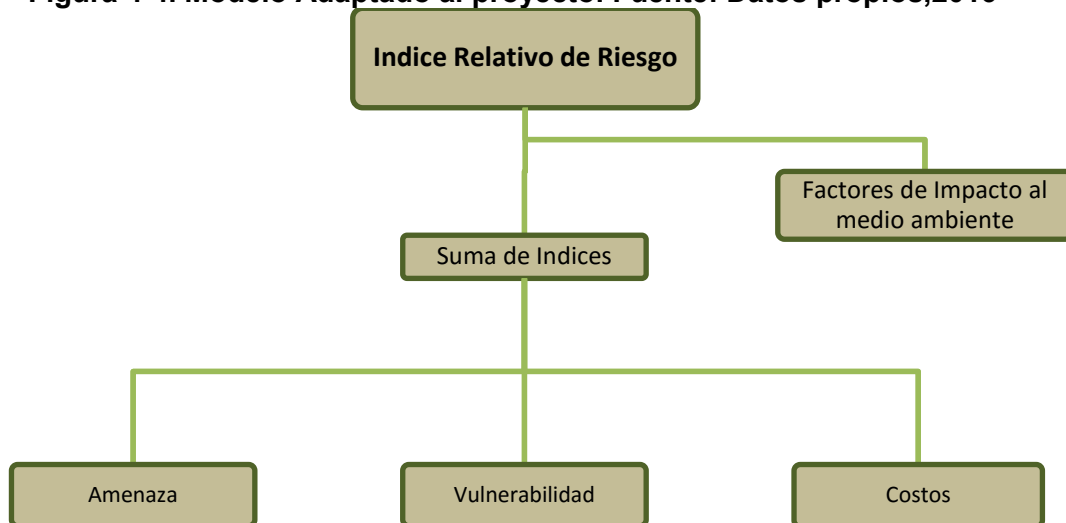
$$FI = \frac{15+3+4+41}{78}$$

$$FI = 81$$

4.3.6. fase VII: cálculo de probabilidad.

De acuerdo al modelo de Mulhbauer (2004), ver Figura 2-10, se realizó una variación al modelo propuesto, debido a que el cálculo de probabilidad se realizó teniendo en cuenta la amenaza, la vulnerabilidad y los costos asociados al derrame. A continuación, se presenta el nuevo modelo, ver Figura 4-4 .

Figura 4-4. Modelo Adaptado al proyecto. Fuente: Datos propios,2016



4.3.6.1. probabilidad por amenaza.

De acuerdo a las probabilidades de falla obtenidas, en el desarrollo de la amenaza anteriormente expuesto, ver Tabla 4-32, el valor asignado es **25**

Tabla 4-32. Probabilidad de Falla

Probabilidad de falla	Puntaje
10 ⁻¹	25
10 ⁻²	50
10 ⁻³	75
10 ⁻⁴	100

Fuente: Datos propios,2016

4.3.6.2. probabilidad por vulnerabilidad.

De acuerdo a los % de vulnerabilidad obtenidos anteriormente, ver Tabla 4-17. A continuación, se presenta los puntajes obtenidos para los diferentes % de vulnerabilidad, ver Tabla 4-33, el valor asignado es **50**.

Tabla 4-33. Vulnerabilidad

Deformacion Unitaria	% Vulnerabilidad	Puntaje
0,10%	43%	100
0,15%	64%	75
0,31%	79%	50
2,17%	100%	25

Fuente: Datos propios,2004

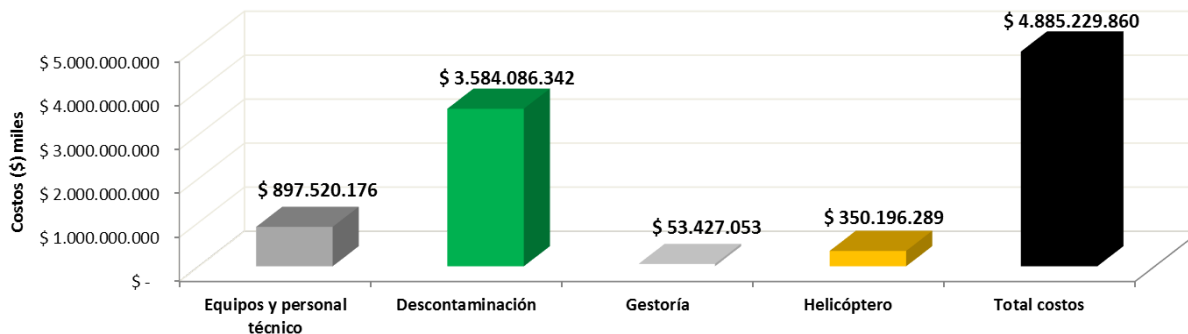
4.3.6.3. costos asociados.

Los costos asociados al derrame tienen en cuenta el costo de reparación por tubería, la descontaminación por producto derramado y el medio de transporte, para lo cual se tuvo en cuenta la investigación de Galvis (2014).

Del costo total de reparación, alrededor del 73% corresponde a descontaminación, el 7% a transporte en helicóptero, el 18% a equipos y personal técnico y el 1% a gestoría. Esto cuando hablamos de tramos inaccesibles donde es necesario la utilización de helicóptero como medio de transporte, adicionalmente cuando hablamos de derrame y contaminación

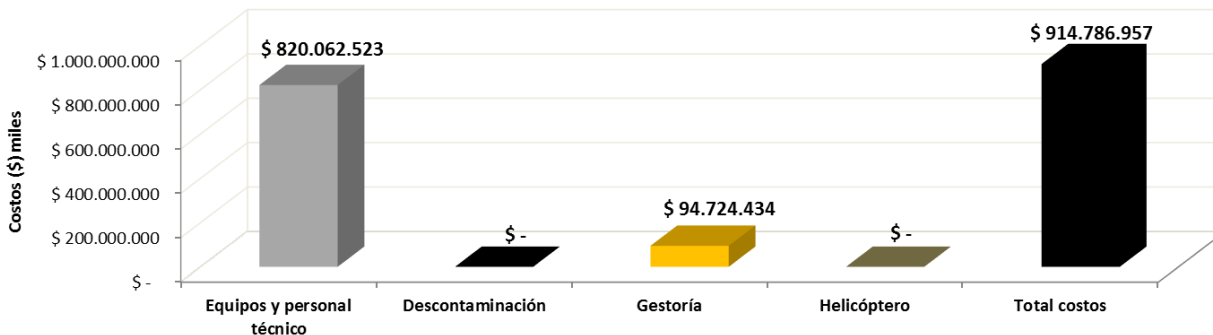
ambiental del subsuelo o cauces de agua que corresponde hacer la descontaminación. Para este caso el costo de reparación es de aproximadamente \$4.885.229.860 como valor total, discriminado como se observa en la Figura 4-5.

Figura 4-5. Costo de reparación tubería en zona de cordillera, contaminación de aguas o suelos cultivados. Fuente: Galvis,2014.



Para tramos donde no presenta contaminación y es de fácil acceso, los porcentajes de inversión cambian notablemente ya que el 90% del costo de reparación corresponde a equipos y personal técnico y el 10% a gestoría. Para este caso el costo de reparación es de aproximadamente \$914.786.857 como valor total, discriminado como se observa en la Figura 4-6.

Figura 4-6. Costo de reparación en zona de cordillera, sin contaminación de aguas o suelos. Fuente: Galvis,2014.



A continuación, se presentan los puntajes, de acuerdo al análisis anterior, ver Tabla 4-34.

Tabla 4-34. Puntaje de Costos Asociados

Descripcion Item	Rango de puntaje	Puntaje
Equipos y personal tecnico	0 - 20	20
Gestoria	0 - 5	5
Helicoptero	0 - 15	0
Descontaminacion	0 - 60	0
Total		25

Fuente: Datos propios,2016

4.3.6.4. calculo de probabilidad índice de riesgo.

El cálculo de probabilidad de acuerdo a los valores obtenidos anteriormente, ver Tabla 4-35, se obtiene una probabilidad del **97%**

Tabla 4-35. Calculo de Probabilidad

Calculo de Probabilidad	Puntaje	Probabilidad
Amenaza	25	96,9%
Vulnerabilidad	50	
Costos	25	
Total	100	

Fuente: Datos propios,2016

Sobre la aceptabilidad del riesgo, se tomó como criterio según

- **Límite inferior para riesgo inadmisibles: 90** (calculado con la probabilidad alcanzada teniendo en cuenta un 60% de eficacia en las medidas de mitigación).
- **Límite inferior para el riesgo tolerable: 70** (calculado con la máxima probabilidad alcanzada teniendo en cuenta un 85% de eficacia en las medidas de mitigación).
- **Riesgo aceptable: menor de 70** (calculado con la máxima probabilidad posible de alcanzar teniendo en cuenta un 100% de eficacia en las medidas de mitigación).

Según lo anterior el tramo de estudio presenta riesgo inadmisibles por contaminación ambiental.

4.3.7. cálculo de cuantificación del riesgo relativo.

Según el modelo de Muhlbauer y la adaptación de acuerdo al proyecto desarrollado, se calcula el riesgo de acuerdo a la Ecuación 2-40, se calcula la cuantificación del riesgo teniendo en cuenta todos los factores calculados anteriormente.

$$R = \text{Probabilidda} \times FI (\text{Consecuencias})$$

$$R = 97\% \times 81$$

$$R = 79$$

No obstante, y de acuerdo a que la probabilidad de ocurrencia que es mayor al 90% el riesgo es inaceptable y las consecuencias ambientales son cercanas al 81%.

4.3.8. calculo índice de riesgo.

Una vez elaborado los análisis de Riesgo, siguiendo la metodología propuesta que se basó en la cuantificación del riesgo por derrame en ductos para hidrocarburos de acuerdo con la metodología propuesta por Muhlbauer y la adaptación hecha al proyecto, con ello se concluye lo siguiente:

- Con base en los resultados obtenidos de amenaza y vulnerabilidad, se plantea una matriz de riesgo donde la amenaza está dada por la probabilidad de falla y la vulnerabilidad de la tubería está dada por la deformación unitaria y % de vulnerabilidad. Entrando a esta matriz, y seleccionando la probabilidad de falla y la deformación unitaria de la tubería, se obtiene la probabilidad de riesgo. A continuación, se presenta, ver Figura 4-7.

Figura 4-7. Matriz de Probabilidad de Riesgo

		VULNERABILIDAD					
		Deformacion Unitaria (ε)	0,00%	0,10%	0,15%	0,31%	2,17%
		% Vulnerabilidad	0,00%	43,46%	63,74%	78,18%	100,00%
AMENAZA	Probabilidad de Falla (en 50 años)	10 ⁻¹	H	VH	VH	VH	VH
		10 ⁻²	M	H	VH	VH	VH
		10 ⁻³	L	M	H	H	H
		10 ⁻⁴	L	L	M	M	H
		10 ⁻⁵	ML	L	L	M	M
		10 ⁻⁶	ML	ML	L	L	M

- Con base en los resultados obtenidos del factor de impacto, que se refiere a las consecuencias ambientales, se plantea una matriz de riesgo, donde está asociada la probabilidad de riesgo y las consecuencias. Entrando a esta matriz y seleccionando la probabilidad de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y el factor de impacto en términos de consecuencias nos dará como resultado el índice de riesgo asociado. A continuación, se presenta, ver Figura 4-8.

Figura 4-8. Matriz de Índice de riesgo asociado

		INDICE DE RIESGO					
		INDICE DE RIESGO	50	70	80	90	100
AMENAZA	Vulnerabilidad	VH	H	H	VH	VH	VH
		H	M	H	H	VH	VH
		M	L	M	H	H	H
		L	L	L	M	M	H
		ML	ML	L	L	M	M

Las matrices planteadas de probabilidad de riesgo e índice de riesgo asociado, se convierten en una herramienta de toma de decisiones, ya que está basada en datos de un análisis particular para llegar a una herramienta general.

Esto implica que, si no se tienen todos los datos a la mano para hacer el análisis previo de amenaza, vulnerabilidad y consecuencias ambientales, se podrá mediante un juicio de expertos utilizar esta herramienta (matrices de riesgo) para valorar el riesgo asociado y toma de decisiones.

Capítulo 5

5. Análisis de Resultados y Conclusiones

Este trabajo se realizó sobre un proyecto piloto, el cual contempla un tramo del oleoducto Medellín Cartago en la abscisa PK 14+675 denominado cruce Aéreo 3, el cual se contó con información del Estudio de Suelos realizado por ECOPETROL S.A., lo que permitió evaluar un tramo particular y generar una metodología de evaluación sobre cualquier tramo en general, la cual se encamino a establecer una guía metodológica para evaluar cuantitativamente el riesgo por rotura de línea de hidrocarburos debido a deslizamientos, realizando la evaluación de la amenaza por deslizamientos, la determinación de la vulnerabilidad de la tubería y la cuantificación de los daños por derrame de hidrocarburos. con el fin de garantizar la integridad del ducto y minimizar los peligros y daños que se puedan ocasionar.

Es de gran importancia mencionar que la metodología planteada ayudará a mitigar, los daños físicos, químicos, sociales, económicos, que puedan ocasionar los derrames de grandes volúmenes de petróleo en lagos, costas y ríos, garantizando operaciones eficientes minimizando los daños y reclamos de terceros.

5.1. Análisis de Resultados de la Amenaza

Una vez elaborado los análisis de evaluación de la amenaza, siguiendo la metodología propuesta que se basó en las condiciones originales del sitio y la determinación y variación de los factores detonantes, así como la determinación de las variables a considerar para plantear los escenarios de diseño, modelar y obtener los factores de seguridad y la probabilidad de falla, con ello se concluye lo siguiente:

- La importancia de determinar las condiciones originales del terreno, permiten tener un conocimiento del sitio, del tipo de materiales y prever su comportamiento o mecanismo de falla que pueda presentar en forma a priori.
- Establecer los factores detonantes del deslizamiento y la variación en los diferentes periodos de retorno, este último cobra gran importancia, debido a que se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Para el factor de Sismicidad: se tuvo en cuenta un periodo de diseño de 50 años, debido a que las curvas de aceleración fueron tomadas del estudio de sismicidad colombiano las cuales se hicieron para exposición de 50 años, razón por la cual el periodo de diseño no podría ser menor.
- Para el factor de Lluvia: fue de gran importancia determinar las curvas de intensidad duración y frecuencia para diferentes periodos de retorno, así mismo se determinó que de acuerdo con la zona se emplearía un tiempo de intensidad de lluvia de 1 hora, para lo cual se realizaron los análisis de infiltración teniendo en cuenta los parámetros hidráulicos del suelo, la succión del mismo y obteniendo infiltraciones para diferentes periodos de retorno. Para lo cual se puede concluir que:
 - las infiltraciones no alcanzaron los 30cm a partir de la superficie para los diferentes periodos de retorno analizados. Es decir que solo se infiltró los 30cm superiores.

Para análisis posteriores se podrá analizar un tiempo de infiltración mayor a una (1) hora, con el fin de observar cuanto puede ser la profundidad de infiltración y poder analizar si el nivel freático alcanza esta profundidad.
 - El nivel freático con el que se trabajó, se dedujo a partir del nivel freático crítico y se estableció como el valor medio del estrato superior es decir a una profundidad de 4.4m; uno de los análisis que se realizó fue la variación del nivel freático respecto a los datos pluviométricos de precipitación máxima en 24 horas obteniendo el coeficiente de variación del mismo. Para lo cual se puede concluir que la variación del nivel freático no alcanza el nivel de infiltración ni mucho menos la superficie; razón por la cual el nivel freático puede variar por la acumulación de las lluvias pero no alcanza a generar un nivel freático colgado que sería una situación bastante crítica.
 - De acuerdo al análisis de la infiltración y variación del nivel freático, es importante realizar estos análisis con el fin de plantear escenarios más realistas, y no plantear escenarios críticos que pueden llegar a ser poco realistas y muy costosos.

- Determinar cuáles son las variables a considerar, es de gran importancia para plantear los escenarios de diseño, las modelaciones, con el fin de obtener los factores de seguridad y las probabilidades de fallas, en este caso las variables consideradas fueron:
 - Visualizar el problema en términos de análisis de datos de campo y laboratorio, como, parámetros geomecánicos y nivel freático, para lo cual se observó que la exploración no registraba nivel freático esto quiere decir que el nivel freático fue abatido por las obras de remediación hechas en el sitio. Por lo anterior, tener solo la condición actual no reflejaría dentro de los análisis la condición real, razón por la cual se realizó un retro-cálculo de la condición actual obteniendo un nivel freático crítico.
 - La determinación de las variables tuvo en cuenta lo anteriormente expuesto, por lo que las variables definidas son los parámetros intrínsecos del suelo como el ángulo de resistencia y la cohesión, así como el nivel freático.
 - Para tener en cuenta el nivel freático, se establecieron dos condiciones de estado: la primera condición es el estado actual sin nivel freático y la segunda condición es el estado actual con nivel freático.
 - Condición de estado 1: se consideró la condición actual sin nivel freático y las variables que se plantearon fueron los parámetros geomecánicos como la cohesión (c) y el ángulo de resistencia (φ). Una vez planteadas las variables y de acuerdo con estimativos puntuales se determina el número de puntos de muestreo y la variación de los parámetros establecidos, que para este caso con dos variables se tomaron 4 puntos de muestreo que sería la variación de los parámetros; y los escenarios planteados es la combinación de estos parámetros con los factores detonantes para diferentes periodos de retorno; razón por la cual las modelaciones en SLIDE fue un total de 169 modelaciones.

Para cada sub-escenario se determinó el factor de seguridad, parámetros estadísticos de confiabilidad y probabilidad de falla, así como la probabilidad de falla del escenario total, para lo cual se puede concluir que:

- Los coeficientes de variación de los parámetros geomecánicos difieren mucho entre sí; un ejemplo de ello, es la cohesión con un

coeficiente de variación cercano a uno (0.94), lo que quiere decir que la desviación estándar es muy cercana a la media. Lo que no ocurre con el ángulo de fricción (φ) que presenta una desviación estándar de 4.93×10^{-3} .

- Se puede concluir que para cohesiones por arriba de la media variando el ángulo de fricción, el factor de seguridad prácticamente no cambia, pasa de 1.7 a 1.69 siendo un talud estable; lo que no ocurre con cohesiones por debajo de la media variando el ángulo de fricción que pasa de una condición estable a una condición inestable obteniendo factores de seguridad de 0.81
- La diferencia de factores de seguridad se muestra muy marcada variando la cohesión y dejando fijo el ángulo de fricción, obteniendo una reducción del factor de seguridad hasta del 47%.
- Combinando la variación de los parámetros geomecánicos con el factor detonante sismo se puede concluir que el factor de seguridad se disminuye notablemente reduciéndose en un 22% para un periodo de retorno de 50 años y llegando a una reducción del 43% para un periodo de retorno de 1000 años, para lo cual se puede concluir que el factor detonante sismo por la carga cíclica inducida al terreno es uno de los factores detonantes más desfavorables que puede ocasionar una licuación o ablandamiento cíclico dependiendo el tipo de material.
- Combinando la variación de los parámetros geomecánicos con el factor detonante Lluvia (infiltración) se puede concluir que el factor de seguridad prácticamente no cambia, se reduce en un 0.8% para un periodo de retorno de 50 años y llegando a una reducción del 1.6% para un periodo de retorno de 100 años, para lo cual se puede concluir que el factor detonante Lluvia con una intensidad, duración y frecuencia de una hora, no es el factor detonante más crítico; no obstante la sola infiltración generara deslizamientos superficiales y la acumulación de lluvias reducirá la succión e incrementara la profundidad de infiltración ocasionado deslizamientos más profundos.

- La combinación de los parámetros geomecánicos con los dos factores detonantes sismo y Lluvia (aceleración e infiltración), se puede concluir como se mencionó arriba, que el factor detonante crítico es el sismo; variando el sismo para diferentes periodos de retorno con una misma infiltración se obtiene una reducción del factor de seguridad de un 24% para un periodo de retorno de 50 años y se reduce hasta un 45% para un periodo de retorno de 1000 años para sismo y 100 años para lluvia. Como se puede analizar el factor detonante lluvia reduce el factor de seguridad en aproximadamente un 2% de acuerdo a lo obtenido si fuera un análisis de solo sismo como se describe arriba.
- Una vez obtenida la probabilidad de falla de cada sub-escenario, esta probabilidad de falla fue afectada por la probabilidad de ocurrencia tanto para sismo como para lluvia en los diferentes periodos de retorno y para un periodo de diseño de 50 años, dando como resultado una probabilidad de falla cercana a de 1 (0.99959); razón por la cual se deberá realizar un monitoreo y mantenimiento permanente a la zona y si es el caso ejecutar obras de mitigación; debido a que la probabilidad de falla es cercana a 1 lo que significa es que va a fallar antes de los 50 años si no se atiende el sitio.
- Condición de estado 2: se consideró la condición actual con nivel freático y las variables que se plantearon fueron los parámetros geomecánicos como la cohesión (c), el ángulo de resistencia (φ) y el nivel freático (NF). Una vez planteadas las variables y de acuerdo con estimativos puntuales se determina los puntos de muestreo y la variación de los parámetros establecidos, que para este caso con tres variables se tomaron 8 puntos de muestreo que sería la variación de los parámetros geomecánicos y nivel freático; y los escenarios planteados es la combinación de los ocho parámetros establecidos con los factores detonantes para diferentes periodos de retorno; razón por la cual las modelaciones en SLIDE fue un total de 337 modelaciones.

Para cada sub-escenario se determinó el factor de seguridad, parámetros estadísticos de confiabilidad y probabilidad de falla, así como la probabilidad de falla del escenario total, para lo cual se puede concluir que:

- Los coeficientes de variación de los parámetros geomecánicos difieren mucho entre sí, como se comentó arriba en la condición de estado 1; adicionalmente el coeficiente de variación del nivel freático el cual fue obtenido de los datos pluviométricos de precipitación máxima en 24 horas, con base en los eventos registrados durante el periodo de 1950 a 2012, obteniendo un coeficiente de variación <1 (0.6), lo que quiere decir que la desviación estándar es aproximadamente la mitad de la media.
- Se puede concluir que para cohesiones por arriba de la media variando el ángulo de fricción y el nivel freático, el factor de seguridad se reduce en un 27%, pasa de 1.65 a 1.21 siendo un talud estable; lo que no ocurre con cohesiones por debajo de la media variando el ángulo de fricción y el nivel freático que pasa de una condición estable a una condición inestable obtenido reducciones hasta del 55% con factores de seguridad de 0.62
- La diferencia de factores de seguridad se muestra muy marcada variando la cohesión y el nivel freático y dejando fijo el ángulo de fricción, obteniendo una reducción del factor de seguridad hasta del 62%.
- Combinando la variación de los parámetros geomecánicos y el nivel freático con el factor detonante sismo se puede concluir que el factor de seguridad se disminuye notablemente reduciéndose en un 23.4% para un periodo de retorno de 50 años y llegando a una reducción del 43% para un periodo de retorno de 1000 años, para lo cual se puede concluir que el factor detonante sismo por la carga cíclica inducida al terreno es uno de los factores detonantes más desfavorables que puede ocasionar una licuación o ablandamiento cíclico dependiendo el tipo de material.
- Combinando la variación de los parámetros geomecánicos con el factor detonante Lluvia (infiltración) se puede concluir que el factor de

seguridad no cambia hasta para un periodo de retorno de 100 años, para lo cual se puede concluir que el factor detonante Lluvia con una intensidad, duración y frecuencia de una hora, en este caso no es un factor detonante; no obstante la acumulación de lluvias reducirá la succión e incrementará la profundidad de infiltración ocasionado deslizamientos superficiales y reducción del factor de seguridad.

El factor detonante lluvia, analizado solo como infiltración no va a afectar en este caso, lo que si va a afectar es la variación del nivel freático debido a que el coeficiente de variación se tomó basado en los datos de lluvia de las 24 horas. Razón por la cual este análisis dio como se esperaba ya que no puede haber dos afectaciones por la misma condición.

- La combinación de los parámetros geomecánicos con los dos factores detonantes sismo y Lluvia (aceleración e infiltración), se puede concluir como se mencionó arriba, que el factor detonante crítico es el sismo; variando el sismo para diferentes periodos de retorno con una misma infiltración se obtiene una reducción del factor de seguridad de un 24% para un periodo de retorno de 50 años y se reduce hasta un 46% para un periodo de retorno de 1000 años para sismo y 100 años para lluvia.
- Una vez obtenida la probabilidad de falla de cada sub-escenario, esta probabilidad de falla fue afectada por la probabilidad de ocurrencia tanto para sismo como para lluvia en los diferentes periodos de retorno y para un periodo de diseño de 50 años, dando como resultado una probabilidad de falla menor de 1 (0.99998); razón por la cual se deberá realizar un monitoreo y mantenimiento permanente a la zona y si es el caso ejecutar obras de mitigación; debido a que la probabilidad de falla <1 lo que significa es que va a fallar en 50 años si no se atiende el sitio.

5.2. Análisis de Resultados de la Vulnerabilidad

Una vez elaborado los análisis de evaluación de la vulnerabilidad, siguiendo la metodología propuesta que se basó en las condiciones geomecánicas del suelo y del relleno

determinado las fuerzas resistentes (lateral y axial), calculando las deformaciones críticas de la tubería y el suelo juntos, por otro lado se ejecutó una segunda metodología, calculando el desplazamiento máximo del terreno basados en las propiedades intrínsecas y factores detonantes, utilizando los mecanismo de falla hallados en la evaluación de la amenaza; adicionalmente obteniendo las deformaciones de la tubería y calculando la vulnerabilidad de la misma, con ello se concluye lo siguiente:

- Para el análisis de las deformaciones críticas de la tubería y el suelo juntos (Metodología 1), se tuvieron en cuenta las siguientes simplificaciones:
 - La deformación axial de la tubería, se iguala con la deformación del terreno, por lo que en este análisis no se puede determinar cuánto se deforma la tubería y cuanto se deforma el suelo.
 - La deformación a flexión, que es la deformación de la geometría, también conocida como la deformación bending, se calcula de acuerdo con la ecuación establecida; no obstante para este caso específico resultaría una constante que lo único que variaría sería el ancho del deslizamiento el cual esta elevado a una potencia 4, por lo que los valores obtenidos de la deformación a flexión, a medida que se incrementa el ancho del deslizamiento la deformación a flexión crece exponencialmente, obteniendo valores poco reales; un ejemplo de ello es para una misma fuerza axial y lateral del suelo variando el ancho del deslizamiento, la deformación axial varía entre el 5 al 7%, datos que están dentro del rango de deformación, lo que no ocurre con la deformación a flexión que para un ancho de deslizamiento de 30m tiene una deformación del 16% llegando hasta una deformación del 2010% para un ancho de 150m.
 - La deformación crítica que tiene en cuenta la deformación axial y la deformación a flexión; es el resultado del desplazamiento crítico de la tubería, no obstante, este desplazamiento no tiene en cuenta el módulo de rotura de la tubería, y para algunos desplazamientos críticos el tubo de encuentra en deformación plástica con una vulnerabilidad cercana al 84%, como se describió en el análisis de vulnerabilidad. Adicionalmente, se evidencia una diferencia muy marcada en la obtención de los esfuerzos de la tubería con una diferencia de 1.58×10^8 Pa para un ancho de

deslizamiento de 30m hasta llegar a una diferencia de 5.3×10^8 Pa para un desplazamiento de 150m.

- Para el cálculo de porcentaje de vulnerabilidad y deformación unitaria, se tuvo en cuenta los parámetros de la tubería como el módulo de elasticidad, el esfuerzo a fluencia, la resistencia última a tensión, y con ello se procedió a calcular la deformación de la tubería variando el esfuerzo axial del tubo desde cero, pasando por el esfuerzo a fluencia y terminado por la resistencia a rotura, por lo que se puede concluir:
- El cálculo de desplazamiento tuvo en cuenta el ancho del deslizamiento y la deformación unitaria calculada previamente, así como el porcentaje de vulnerabilidad correspondiente, para lo cual se puede concluir:
 - ✓ Que al comparar deformación crítica versus desplazamiento, se observa que para una deformación crítica en términos de desplazamiento ha alcanzado una deformación unitaria del 0.45% y una vulnerabilidad del 84%, esto quiere decir que la tubería ha sobrepasado el rango elástico y se encuentra en el rango plástico con deformaciones permanentes y con una vulnerabilidad cercana a la falla.
 - ✓ A realizar el cálculo de desplazamiento y asociando el porcentaje de vulnerabilidad, nos genera una tabla de datos que por sí sola nos dice el rango elástico, plástico y de rotura para los diferentes anchos de deslizamiento. No obstante, no nos da información de donde se encuentra la deformación actual. Razón por la cual se desarrolla la metodología del cálculo del desplazamiento del terreno.
- Para el cálculo de desplazamiento del terreno o más conocido como distancia de viaje de un deslizamiento (Metodología 2) se tuvo en cuenta lo siguiente:
 - Los mecanismos de falla obtenidos de los parámetros originales del terreno y la combinación de factores detonantes que se analizaron en la evaluación de la amenaza, se tomaron en cuenta diferentes factores de seguridad con el fin de obtener la variación del desplazamiento. Para lo cual se puede concluir que para factores de seguridad menor que 1 pero muy cercanos a 1, no se obtiene desplazamiento porque si bien es cierto el talud está fallado

este permanece en equilibrio limite, debido a que no se ha movilizado por que la condición del ángulo del talud frente al ángulo de fricción no ha cambiado, por otro lado para un factor de seguridad de 0.81 se obtuvo un desplazamiento de 4.2m y para un factor de seguridad de 0.50 se obtuvo un desplazamiento de 4.3m, por lo que se puede concluir que cuando falla un talud y se cumple la condición de que el ángulo del talud es superior al ángulo de fricción, ocurre un desplazamiento y el deslizamiento se ha desplazado más de un 93%, por lo que si se sigue reduciendo el factor de seguridad el desplazamiento es mínimo, porque el máximo desplazamiento ha sido en el momento de la falla.

- La deformación unitaria, porcentaje de vulnerabilidad y los desplazamientos de la tubería, se calcularon conforme a la metodología 1.
- Una vez calculado el desplazamiento del terreno de 4.3m y teniendo los desplazamientos de la tubería y el porcentaje de vulnerabilidad se puede concluir lo siguiente:
 - ✓ Que para un ancho de deslizamiento de 30m, la tubería se encuentra con una deformación plástica ultima traducido en una vulnerabilidad de 96.7%, lo que significa que esta lista a fallar.
 - ✓ Para un ancho de deslizamiento de 60m, la tubería se encuentra en deformación plástica con una vulnerabilidad del 85%, lo que significa que se debe liberar de esfuerzos la tubería y atender mecánicamente si es el caso.
 - ✓ Para un ancho de deslizamiento de 90m, la tubería se encuentra en deformación plástica con una vulnerabilidad del 81%, lo que significa que se debe liberar de esfuerzos la tubería y atender mecánicamente si es el caso.
 - ✓ Para un ancho de deslizamiento de 120m, la tubería se encuentra en el límite de la deformación elástica, con una vulnerabilidad del 76%, lo que significa que la tubería no ha sufrido deformaciones permanentes.
 - ✓ Para un ancho de deslizamiento de 150m, la tubería se encuentra en el límite de la deformación elástica, con una vulnerabilidad del 72%,

lo que significa que la tubería no ha sufrido deformaciones permanentes.

- Del análisis anterior, cabe mencionar que para un ancho de deslizamiento pequeño (30m) la tubería se comporta como un elemento rígido, razón por la cual para desplazamientos relativamente pequeños 3.5m la tubería se encuentra en el límite plástico a punto de fallar; no obstante para anchos de deslizamientos relativamente grandes (150m) la tubería se comporta como un elemento flexible, razón por la cual para desplazamientos relativamente pequeños 3.5m la tubería se encuentra en el límite de la deformación elástica.

Por todo lo anteriormente expuesto se puede concluir que la metodología 2 puede ser una alternativa realista de conocer el comportamiento de la tubería frente a la falla de un talud y el desplazamiento del mismo. No obstante, la metodología 1, se puede rescatar el cálculo de elongación y deformación axial de la tubería con el fin de verificar cuanto puede ser la deformación de la misma.

5.3. Análisis de Resultados del Riesgo

Una vez elaborado los análisis de riesgo, siguiendo la metodología propuesta que se basó en la determinación de la peligrosidad del producto derramado, el volumen liberado, definición del factor de dispersión, del receptor, cálculo de probabilidad y cuantificación del riesgo, evaluación de costos asociados al derrame y finalmente la obtención de la matriz del índice de riesgo, con ello se concluye lo siguiente:

- El análisis de riesgo se realizó con base al modelo de Mulhbauer, no obstante y de acuerdo al análisis hecho y a la interpretación de la ecuación para el cálculo del factor de impacto al medio ambiente, se ha propuesto una desviación a la ecuación que resulta un poco más entendible, la variación consiste en sumar los cuatro términos de la ecuación (peligrosidad del producto, volumen liberado, dispersión y receptor) y como se conoce previamente que cada término se encuentra en un rango de valores determinado se dividirá sobre este valor total para dar como resultado el 100% que corresponderá al factor de impacto. Esta variación se realizó debido a que los resultados obtenidos no se encontraban en una escala acorde para realizar

los análisis respectivos. La ecuación planteada es Ecuación 4-1, y la calificación de cada termino es propuesta por el modelo Muhlbauer, ver Tabla 4-31.

- Para el cálculo de probabilidad, de acuerdo al modelo de Mulhbauer, ver Figura 2 10, se realizó una variación al modelo propuesto, debido a que el cálculo de probabilidad se realizó teniendo en cuenta la amenaza, la vulnerabilidad y los costos asociados al derrame, ya que inicialmente se tenía en cuenta daños por terceros, corrosión, diseño y operaciones incorrectas. Adicionalmente se puede concluir:
 - El cálculo de probabilidad de la amenaza es de acuerdo a las probabilidades de falla obtenidas, en el desarrollo de la amenaza, obteniendo probabilidades de falla cercanas a 1.
 - El cálculo de probabilidad por vulnerabilidad es de acuerdo a los porcentajes de vulnerabilidad obtenidos para un desplazamiento del terreno de 4.3m, en el desarrollo de la vulnerabilidad, obteniendo % de vulnerabilidad entre el 79 y el 84%, teniendo en cuenta que el 100% es la rotura.
 - Respecto al costo total de reparación, se distribuye de la siguiente forma:
 - Alrededor del 73% corresponde a descontaminación, el 7% a transporte en helicóptero, el 18% a equipos y personal técnico y el 1% a gestoría. Esto cuando hablamos de tramos inaccesibles donde es necesario la utilización de helicóptero como medio de transporte, adicionalmente cuando hablamos de derrame y contaminación ambiental del subsuelo o cauces de agua que corresponde hacer la descontaminación. Para este caso el costo de reparación es de aproximadamente \$4.885.229.860, pasados en datos reales.
 - Para tramos donde no presenta contaminación y es de fácil acceso, los porcentajes de inversión cambian notablemente ya que el 90% del costo de reparación corresponde a equipos y personal técnico y el 10% a gestoría. Para este caso el costo de reparación es de aproximadamente \$914.786.857

La probabilidad de ocurrencia de acuerdo al cálculo realizado es del 97%, el tramo de estudio presenta riesgo inadmisibles y las consecuencias ambientales son cercanas al 81%. Esto de acuerdo a la aceptabilidad del riesgo de acuerdo con el criterio de Sutton, I. ALARP.

- Adicionalmente se plantean unas matrices de riesgo, referente a la probabilidad de riesgo e índice de riesgo asociado, estas matrices se convierten en una herramienta de toma de decisiones, ya que está basada en datos de un análisis particular para llegar a una herramienta general. Esto implica que, si no se tienen todos los datos a la mano para hacer el análisis previo de amenaza, vulnerabilidad y consecuencias ambientales, se podrá mediante un juicio de expertos utilizar esta herramienta (matrices de riesgo) para valorar el riesgo asociado y toma de decisiones, basados en:
 - con base en los resultados obtenidos de amenaza y vulnerabilidad, se plantea una matriz de riesgo donde la amenaza está dada por la probabilidad de falla y la vulnerabilidad de la tubería está dada por la deformación unitaria y % de vulnerabilidad. Entrando a esta matriz, y seleccionando la probabilidad de falla y la deformación unitaria de la tubería, se obtiene la probabilidad de riesgo.
 - Con base en los resultados obtenidos del factor de impacto, que se refiere a las consecuencias ambientales, se plantea una matriz de riesgo, donde está asociada la probabilidad de riesgo y las consecuencias. Entrando a esta matriz y seleccionando la probabilidad de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) y el factor de impacto en términos de consecuencias nos dará como resultado el índice de riesgo asociado.

Capítulo 6

6. Metodología para la Evaluación del Riesgo

Este trabajo está encaminado a establecer una guía metodológica para evaluar cuantitativamente el riesgo por rotura en línea de hidrocarburos debido a deslizamientos, realizando la evaluación de la amenaza por deslizamientos, la determinación de la vulnerabilidad de la tubería y la cuantificación de los daños por derrame de hidrocarburos. Con el fin de garantizar la integridad del ducto y minimizar los peligros y daños que se puedan ocasionar, ya que las afectaciones debido al rompimiento de la tubería han adquirido gran importancia debido a los accidentes industriales que han ocasionado graves consecuencias de orden social y económico.

A continuación, se presenta la metodología que se explicó durante el desarrollo del trabajo: de acuerdo al a los resultados del tramo evaluado:

6.1. Metodología de Evaluación de la Amenaza

La evaluación de la amenaza contempla la susceptibilidad de que haya deslizamientos; la amenaza por deslizamiento, obedece a una cadena de procesos que se surten a lo largo del tiempo, dentro de lo que se puede destacar las condiciones originales del talud, que comprenden la topografía, geología, cobertura vegetal y características del material, estas condiciones pueden llegar a ser susceptibles a deslizamientos si se modificasen las condiciones originales, que da como resultado la disminución de la resistencia al corte de los materiales, lo que puede generar movimientos en el talud o la activación del mismo como resultado del aumento de esfuerzos a lo largo de la superficie de falla, esta última situación se da por la frecuencia de factores exógenos o detonantes que conciernen a los procesos geomorfológicos y físicos, dentro de estos procesos se resalta: la Neotectónica, la erosión, la sedimentación, la lluvia, las inundaciones, los sismos, las erupciones volcánicas, la expansión de los suelos, entre otros, así mismo otro de los procesos detonantes son los procesos antrópicos donde se resalta, excavaciones, rellenos sobre taludes, cambios de humedad y presión de poros, deforestación, detonación de explosivos y todos aquellos que modifiquen las condiciones originales del terreno.

La ocurrencia de deslizamientos es el producto de las condiciones geológicas, hidrológicas, geomorfológicas y la modificación de estas por procesos geodinámicas, así como la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y la sismicidad. La presencia de deslizamientos es un fenómeno sujeto a muchos grados de incertidumbre debido a que los deslizamientos incluyen diferentes tipos de movimientos, velocidades, nodos de falla, materiales, restricciones geológicas, entre otras.

Para el tramo de estudio se deberá elaborar un modelo geológico geotécnico, donde involucre la caracterización de los factores que afectan la susceptibilidad y sean determinantes tanto en el mecanismo de falla como el comportamiento del talud en movimiento, por lo que se deberá caracterizar y definir elementos fundamentales como:

- **Determinación de las condiciones originales del terreno:**

Para el tramo de estudio se deberá elaborar un modelo geológico geotécnico, donde involucre la caracterización de los factores que afectan la susceptibilidad y sean determinantes tanto en el mecanismo de falla como el comportamiento del talud en movimiento, por lo que se deberá caracterizar y definir elementos fundamentales como:

- La topografía: altura, pendiente y cambios topográficos.
- La Geología: Tipo de formación, tipo de roca parental, proceso de formación del suelo, propiedades de cada uno de los materiales que componen el talud.
- La Geomorfología: formas del terreno, patrones de drenaje y pendientes.
- Hidrología: Nivel freático.
- Las propiedades mecánicas de los materiales: parámetros geomecánicos del suelo como la cohesión, ángulo de fricción interna del material y peso unitario del suelo, permeabilidad.
- La cobertura vegetal, entre otros.

Por lo anteriormente expuesto, la investigación del talud, consiste en obtener toda la información posible sobre las características anteriormente mencionadas, con el objetivo de realizar un modelo geológico – geotécnico que describa la condición actual. Esta investigación debe evaluar la estabilidad del talud determinando el mecanismo de falla, magnitud y profundidad.

- **Determinación de Los parámetros Geomecánicos**

- Una vez hecha la investigación de campo se obtiene la estratigrafía y la localización de los sondeos.
- Luego de tener los resultados de laboratorio, donde se visualizan a diferentes profundidades granulometrías, % de humedad, peso unitario, límites de Atterberg, clasificación de los materiales USCS y ensayo de SPT.
 - A partir de ensayos SPT donde se reporta el número de golpes obtenido en la exploración, se procede a calcular los parámetros intrínsecos del suelo como el ángulo de fricción interna, mediante las correlaciones propuesta por González (1999). A partir del ángulo de fricción calculado, se obtiene el esfuerzo cortante máximo y con el esfuerzo efectivo calculado previamente, se procede a graficar Esfuerzo efectivo ($\sigma'v$) Vs Esfuerzo Cortante (τ), obteniendo la envolvente de falla, a partir de la cual y mediante una regresión lineal se obtienen los parámetros intrínsecos del suelo tales como Cohesión y ángulo de resistencia

- **Determinación de Los Parámetros Probabilísticos**

Existen varios procedimientos probabilísticos para el análisis de estabilidad de taludes los cuales varían en suposiciones, limitaciones, capacidad de manejar problemas complejos y complejidad matemática. La mayoría de ellos pertenecen a dos categorías: métodos aproximados (Primer Orden Segundo Momento, Estimativos Puntuales, Hasofer-Lind) y simulación de Monte Carlo (El-Ramly H., Morgenstern N.R., & Cruden D.M.,2002).

Los métodos aproximados hacen suposiciones simplificadas que generalmente limitan su aplicación a tipos de problemas específicos. Muy a menudo se ignoran la variabilidad espacial de las propiedades del suelo. Los métodos aproximados permiten la estimación de la media y la varianza del factor de seguridad.

Una vez obtenidos los parámetros geomecánicos se procede a calcular los parámetros probabilísticos correspondientes a la varianza y desviación estándar de cada parámetro y para cada estrato, mediante un modelo lineal. Esto para los parámetros geomecánicos (Cohesión y ángulo de fricción). De acuerdo a las siguientes ecuaciones:

- La varianza conocida como el segundo momento central o momento de inercia de la variable. Este valor indica que tan distantes están los valores del valor medio. A continuación, se presenta las ecuaciones de la varianza del intercepto y la pendiente de la correlación.

- Ecuación 2-14.
$$\text{Var}(\tan \phi) = \frac{\sigma^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - u)^2}$$

- Ecuación 2-15.
$$\text{Var}(C) = \sigma^2 * \frac{\sum_{i=1}^n (X_i)^2}{n * \sum_{i=1}^n (X_i - u)^2}$$

- Desviación Estándar: Una medida más clara de la dispersión es la desviación estándar σ calculada a partir de la raíz cuadrada de la varianza calculada ya sea para el intercepto o para la pendiente.

- Ecuación 2-16.
$$\sigma_x = \sqrt{\sigma^2_x}$$

No obstante, para determinar la desviación estándar del Nivel freático, se procede a realizar un análisis estadístico, tomando como base los datos pluviométricos de precipitación máxima en 24 horas, donde se obtienen parámetros estadísticos como: la media, la Varianza y el coeficiente de variación, a partir de estos parámetros y del valor medio del nivel freático, se procede a calcular la desviación estándar.

- **Determinación del Perfil Geotécnico**

La determinación del perfil geotécnico promedio es basada en los parámetros geotécnicos de cada estrato obtenido a partir de la investigación realizada previamente y a partir del levantamiento topográfico correspondiente a la zona de estudio. De no ser posible identificar un perfil general dada la variabilidad en el subsuelo, se debe proponer una zonificación geotécnica. Luego de analizar los resultados obtenidos en las etapas de exploración del subsuelo y laboratorio, se debe presentar en un formato tabular para cada estrato o material con toda la información del subsuelo incluido los parámetros que sean obtenidos por medio de correlaciones con resultados de pruebas de campo.

- **Determinación de Factores Detonantes:**

Establecer los factores detonantes toma gran importancia porque en últimas son los que van a activar el movimiento que tendrán como resultado el aumento en el

esfuerzo al cortante a lo largo de una superficie de falla el cual podrá ser progresivo o inmediato.

Para este caso específico se consideró dos (2) factores detonantes:

- **Factor Lluvia:**

Generalmente los procesos de remoción en masa están asociados a los períodos lluviosos, por lo que la precipitación en términos de intensidad y duración de la lluvia cobra gran importancia debido a que estos factores disparan el movimiento y depende en cada caso de las condiciones iniciales de humedad y de la posición del nivel freático en la zona; estas variables guardan una estrecha relación con la precipitación precedente a que ha estado sometido el talud.

El agua es el factor que más comúnmente se le asocia con las fallas de los taludes en zonas tropicales, debido a que la mayoría de los deslizamientos ocurren después de lluvias fuertes o durante periodos lluviosos y el control del agua subterránea es uno de los sistemas más efectivos para la estabilización de deslizamientos.

- Se debe recolectar información pluviométrica de los últimos 50 años.
- Se debe construir curvas Intensidad Duración y Frecuencia para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, mediante el método de Díaz Granados.
- Se debe definir el tiempo de concentración de lluvia de acuerdo a la zona, se recomienda analizar tiempos de concentración superior a 1 hora, con el fin de observar cuanto puede ser la profundidad de infiltración y poder analizar si el nivel freático alcanza esta profundidad.
- Se deben establecer las texturas y los parámetros hidráulicos del suelo: ya sea por ensayos de laboratorio o basados:
 - Utilizando el triángulo de suelos de la USDA (EE UU), se define la textura del suelo para los diferentes estratos, teniendo en cuenta los parámetros de cada estrato como la granulometría, los límites de Atterberg y la clasificación de suelos USCS.

- Una vez definida la textura de cada estrato se va a la tabla donde se encuentra las doce (12) texturas de suelos propuesta por Van Genuchten, y se obtienen los parámetros hidráulicos de los materiales de cada estrato, tales como contenidos volumétricos de agua saturada y residual, permeabilidad y parámetros característicos de la curva de succión.
- Por último, se calcula la succión y la profundidad del frente húmedo para un tiempo de concentración determinado y para los periodos de retorno definidos. De acuerdo a:
 - Ecuación 2-7.
$$I_{min} = \frac{\mu}{T_{min}} \left[z_w - S \ln \left(\frac{S+z_w}{S} \right) \right] \left(\frac{z_w+S}{z_w} \right)$$
 - Ecuación 2-8.
$$k_{min} = I_{min} \left(\frac{z_w}{z_w+S} \right) = \frac{\mu}{T_{min}} \left[z_w - S \ln \left(\frac{S+z_w}{S} \right) \right]$$
- Se calcula la probabilidad de excedencia para un periodo de diseño determinado.

○ **Factor Sismo:**

Los movimientos sísmicos pueden activar deslizamientos de tierra. En el caso de un sismo existe el triple efecto de aumento de esfuerzo cortante, disminución de resistencia por aumento de la presión de poros y deformación asociados con la onda sísmica; pudiéndose llegar a la falla al cortante y hasta la licuación, en el caso de suelos granulares saturados.

- Se debe recolectar las curvas de amenaza de la zona de acuerdo al estudio general de amenaza sísmica de Colombia.
- Se debe construir curvas de amenaza sísmica obteniendo las aceleraciones para los diferentes periodos de retorno de 2.33, 5, 50, 100, 200, 475 y 1000 años.
- Cabe mencionar que las curvas están construidas para periodos de 50 años, esto se debe verificar, de ser así el periodo de diseño será de 50 años
- Se calcula la probabilidad de excedencia para un periodo de diseño determinado.

- **Determinación de Variables:**

Establecer las variables a considerar, es de gran importancia para plantear los escenarios de diseño, las modelaciones, con el fin de obtener los factores de seguridad y las probabilidades de fallas.

- Parámetros geomecánicos (cohesión y ángulo de fricción):
- Nivel Freático.
 - Una vez, se establecen el número de variables, que en este caso serían tres variables (ángulo de fricción, cohesión y nivel freático).
 - Mediante la ecuación de estimativos puntuales (2^n), se calcula el número de puntos de muestreo, que en este caso serían 8 puntos de muestreo.
 - Una vez conocido los puntos de muestreo y a partir de valor medio y desviación estándar se establece la ubicación de los puntos de muestreo.
 - Una vez calculado los puntos de muestreo y su ubicación, se obtiene la variación de los parámetros mediante las ecuaciones:
 - Ecuación 2-9. $x_{i+} = \mu_{X_i} + \xi_{X_{i+}} \sigma_{X_i}$
 - Ecuación 2-10. $x_{i-} = \mu_{X_i} + \xi_{X_{i-}} \sigma_{X_i}$
 - Ecuación 2-11. $\xi_{X_{i+}} = \frac{v_{X_i}}{2} + \sqrt{1 + \left(\frac{v_{X_i}}{2}\right)^2}$
 - Ecuación 2-12. $\xi_{X_{i-}} = \frac{v_{X_i}}{2} - \sqrt{1 + \left(\frac{v_{X_i}}{2}\right)^2}$

- **Determinación de Escenarios de Diseño:**

Una vez establecidos los puntos de muestreo se procede a establecer los escenarios de diseño que se van a modelar, que en términos generales son las variables definidas con la variación de sus parámetros incluyendo los factores detonantes definidos como lo son el sismo de diseño y la lluvia de diseño.

- Condición actual.
- Condición actual + Sismo de Diseño.
- Condición actual + Lluvia de Diseño.
- Condición actual + Sismo de Diseño + Lluvia de Diseño

- **Modelación SLIDE 6.0 - Cálculo de Probabilidad de Falla:**

Una vez teniendo los escenarios de diseño, se realizará el análisis del movimiento del talud utilizando el método de equilibrio límite, el cual se basa en las leyes de la estática y no tiene en cuenta las deformaciones del terreno, este método considera un equilibrio global de la masa deslizante que en este caso se utilizaría el método de las dovelas, el cual supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. El análisis se realizó utilizando el método de Bishop simplificado, con superficies de falla circulares, equilibrio de momentos, donde se asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero, este método consiste en dividir el área de falla en tajadas verticales o dovelas, donde se tiene en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas.

La iteración y modelación de los diferentes escenarios se realizó con el programa de computador SLIDE 6.0 con el objeto de determinar la probabilidad de falla, para las diferentes simulaciones, donde se calcularon los factores de seguridad de cada escenario. Posteriormente, considerando criterios de incertidumbre de los parámetros geomecánicos de los materiales, y con los factores de seguridad ya calculados, se determinó las probabilidades de falla preliminar y la probabilidad de falla total que es la probabilidad de falla preliminar afectada por la probabilidad de excedencia ya sea por sismo o por lluvia para cada una de los escenarios analizados en cada condición de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

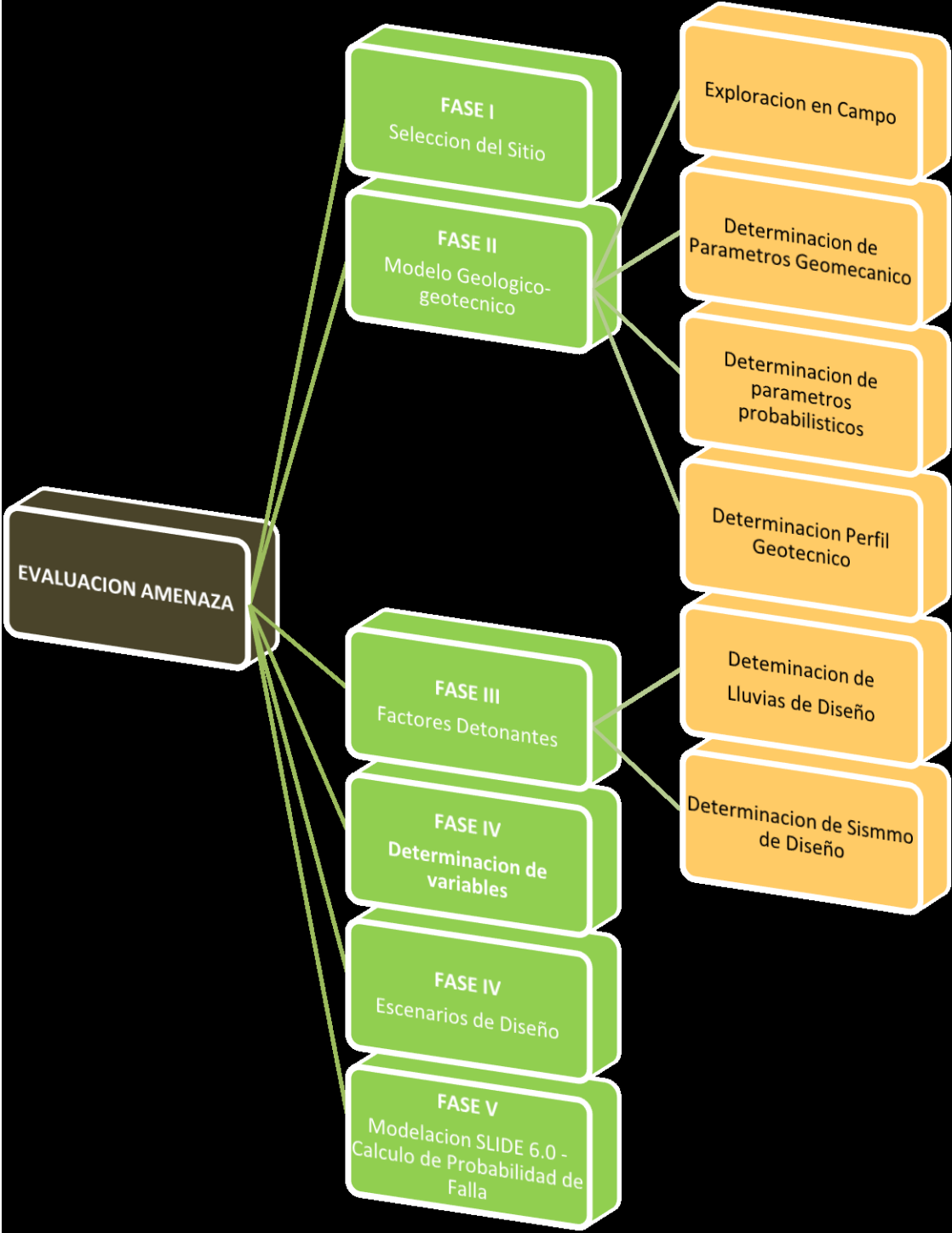
- Ecuación 2-17. $P(f) = P(FS \leq 1)$

- Ecuación 2-18. $P(f) = 1 - \Phi(\beta)$

- Ecuación 2-19. $\beta = \frac{(E[F.S]-1)}{\sigma[F.S]}$

A continuación, se muestra la metodología establecida:

Figura 6-1. Esquema de la Metodología para la evaluación de la Amenaza



6.2. Metodología de evaluación de la vulnerabilidad

La evaluación de la vulnerabilidad contempla la susceptibilidad de rotura de la tubería debido a la amenaza por deslizamiento, lo cual va depender estrictamente de las características de la tubería, como su geometría, propiedades de resistencia, espesor, entre otros; y a su vez va a depender de las propiedades de resistencia del suelo, características del deslizamiento y magnitud del mismo.

Para el tramo de estudio, se analizará los desplazamientos de la tubería como consecuencia del deslizamiento que actúa en sentido perpendicular al eje de la tubería.

Cabe resaltar que el comportamiento de las tuberías afectadas debido a la inestabilidad del terreno se debe al incremento de fuerzas deslizantes, es decir en condiciones estáticas se considera que un talud es estable si las fuerzas resistentes son mayores a las fueras deslizantes asociado a su geometría; sin embargo, durante los sismos las fuerzas deslizantes se incrementan de tal forma que provocan inestabilidad y falla del terreno.

Por lo anterior, es importante realizar un análisis del movimiento del terreno determinando la distancia de viaje, que permita hacer una estimación razonable del desplazamiento ocurrido durante la falla, mediante la representación de un talud como un bloque que se desliza por un plano inclinado, este planteamiento pretende estimar el deslizamiento irreversible que se producirá como consecuencia de la acción de un movimiento en el terreno.

De acuerdo al tramo analizado y a los resultados obtenidos de esta evaluación, se estableció una metodología general que se explicó durante el desarrollo del trabajo y a continuación se presenta un resumen:

- **Selección de parámetros de entrada:**
 - Se deben establecer los parámetros geomecánicos del suelo de fundación (c, φ, γ) .
 - Se deben establecer los parámetros geomecánicos del suelo de Relleno (c, φ, γ) .
 - Se debe establecer el ancho del deslizamiento.
 - Se debe establecer los parámetros de la tubería $(\emptyset, Grado, E)$.

- **Calculo de fuerzas Resistentes del Suelo:**

- Calcular los factores de capacidad portante lateral para el ángulo de fricción del suelo de fundación. De acuerdo a:

Ecuación 2-25.
$$N_{ch} = a + bx + \frac{c}{(x+1)^2} + \frac{d}{(x+1)^3} \leq 9$$

Ecuación 2-26.
$$N_{qh} = a + b(x) + c(x)^2 + d(x)^3 + e(x)^4$$

- Los factores de capacidad portante son:

Factor	ϕ	X	a	b	c	d	e
Nch	0,00°	H/D	6,752	0,065	-11,063	7,119	0
Factor	ϕ	X	a	b	c	d	e
Nqh	0,00°	H/D	0	0	0	0	0
Nqh	20,00°	H/D	2,399	0,439	-0,03	1,059E-03	-1,75E-05
Nqh	25,00°	H/D	3,332	0,839	-0,09	5,61E-03	-1,32E-04
Nqh	30,00°	H/D	4,565	1,234	-0,089	4,28E-03	-9,16E-05
Nqh	35,00°	H/D	6,816	2,019	-0,146	7,65E-03	-1,68E-04
Nqh	40,00°	H/D	10,959	1,783	0,045	-5,43E-03	-1,15E-04
Nqh	45,00°	H/D	17,658	3,309	0,048	-6,44E-03	-1,30E-04

- Calcular la resistencia lateral ultima teniendo en cuenta los parámetros del suelo de fundación y los factores de capacidad portante lateral. De acuerdo a:

Ecuación 2-24.
$$P_u = N_{ch} * c * D + N_{qh} * \gamma * HD$$

- Calcular la resistencia lateral última teniendo en cuenta los parámetros del suelo de relleno y los factores de empuje de tierras e iteración suelo tubería. De acuerdo a:

Ecuación 2-28.
$$t_u = \pi D c \alpha + \pi D H \gamma * \frac{1+K_0}{2} \tan \delta'$$

- **Calculo de la deformación critica de la tubería y el terreno juntos:**

- Calculo de la deformación a flexión

La deformación a flexión se calcula de acuerdo con lo establecido en el marco teórico, donde en su numerador contempla la resistencia lateral ultima y los anchos de deslizamiento considerados con exponente a la 4 y su denominador es una constante multiplicada por el módulo de elasticidad y la inercia; razón por la cual la deformación critica a flexión aumenta

exponencialmente conforme aumenta el ancho del deslizamiento. De acuerdo a:

$$\text{Ecuación 2-29.} \quad \delta_{\text{critica-flexión}} = \frac{P_u W^4}{384EI}$$

- Calculo de la deformación axial.

La deformación Axial se calcula de acuerdo con lo establecido en el marco teórico, mediante la Ecuación 2 -34, donde se estableció que en el centro de la deformación permanente el desplazamiento del suelo es mayor que el de la tubería y la interacción del suelo y la tubería desarrollara la máxima fuerza resistente lateral. Y como se tiene una sola ecuación y dos incógnitas que en este caso sería el desplazamiento de la tubería y el desplazamiento del suelo, razón por la cual una de las premisas para resolver esta ecuación es asumir que la tubería y el suelo se mueven junto con el mismo desplazamiento por lo que se relaciona la fuerza axial de tensión de la tubería con el desplazamiento del terreno De acuerdo a:

$$\text{Ecuación 2-34.} \quad \delta^4 - \left(\frac{W^4 P_u}{4\pi^3 D t E} \right) \delta - \left(\frac{W^5 P_u^2}{64\pi^3 D t E t_u} \right) = 0$$

- Calculo de la deformación crítica.

La deformación critica se calcula de acuerdo con lo establecido en el marco teórico, mediante la Ecuación 2-35, teniendo en cuenta que la componente a flexión está dada para deformaciones permanente pequeñas que corresponde a una tubería rígida, representada por una viga con 2 extremos fijos, soportando una carga distribuida uniforme, para la cual la deflexión máxima se presenta en el centro de luz. Por otro lado, la componente axial está dada para deformaciones permanentes muy grandes que corresponde a una tubería flexible es decir que se comporta como un cable flexible y su comportamiento está dado por la fuerza axial. En general, si se considera que la componente axial y de flexión involucradas en el concepto de deformación crítica actúan en paralelo, la deformación crítica para cualquier ancho de la zona de deformaciones permanentes, W De acuerdo a:

Ecuación 2-35.
$$\delta_{critica} = \frac{1}{\frac{1}{\delta_{critica-flexion}} + \frac{1}{\delta_{critica-axial}}}$$

- **Construcción de curvas de vulnerabilidad:**

- Definir propiedades de la tubería (\emptyset , Grado, E, fy, n, r, fult).
- Calcular la deformación unitaria:

La deformación unitaria se calculó conforme a lo establecido en el marco teórico; mediante la Ecuación 2-38, variando el esfuerzo desde cero, pasando por el esfuerzo de fluencia y terminando en la resistencia ultima a la tensión (esfuerzo de rotura), con el fin de determinar la deformación en el rango elástico, plástico y rotura, adicionalmente se calculó el porcentaje de vulnerabilidad tomando como el 100% la resistencia ultima a la rotura. De acuerdo a:

Ecuación 2-38.
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left(1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right)$$

- Variando el esfuerzo desde cero, pasando por el esfuerzo de fluencia y terminando con el esfuerzo de rotura
- Calculo del % de vulnerabilidad. Teniendo en cuenta que el daño es el 100%.

- **Calculo de Desplazamiento**

- Calculo de desplazamiento.

El desplazamiento se calculó conforme a lo establecido en el marco teórico; mediante la Ecuación 2-36 y Ecuación 2-37, teniendo en cuenta el cálculo previamente realizado de deformación unitaria y el porcentaje de vulnerabilidad, ver Tabla 4-17, el cálculo de desplazamiento tuvo en cuenta el ancho del deslizamiento y fuerza resistente axial del terreno, así como su esfuerzo. De acuerdo a:

Ecuación 2-36.
$$\varepsilon_{elastico} = \frac{\sigma}{E} \pm \frac{\pi^2 \delta D}{W^2} \quad \delta \leq \delta_{critica}$$

- **Calculo del desplazamiento del terreno:**

Este método consiste en calcular el desplazamiento del terreno, conforme a lo establecido en el marco teórico, mediante la Ecuación 2-23, donde depende

expresamente de las propiedades mecánicas del material a deslizar, así como la geometría del talud.

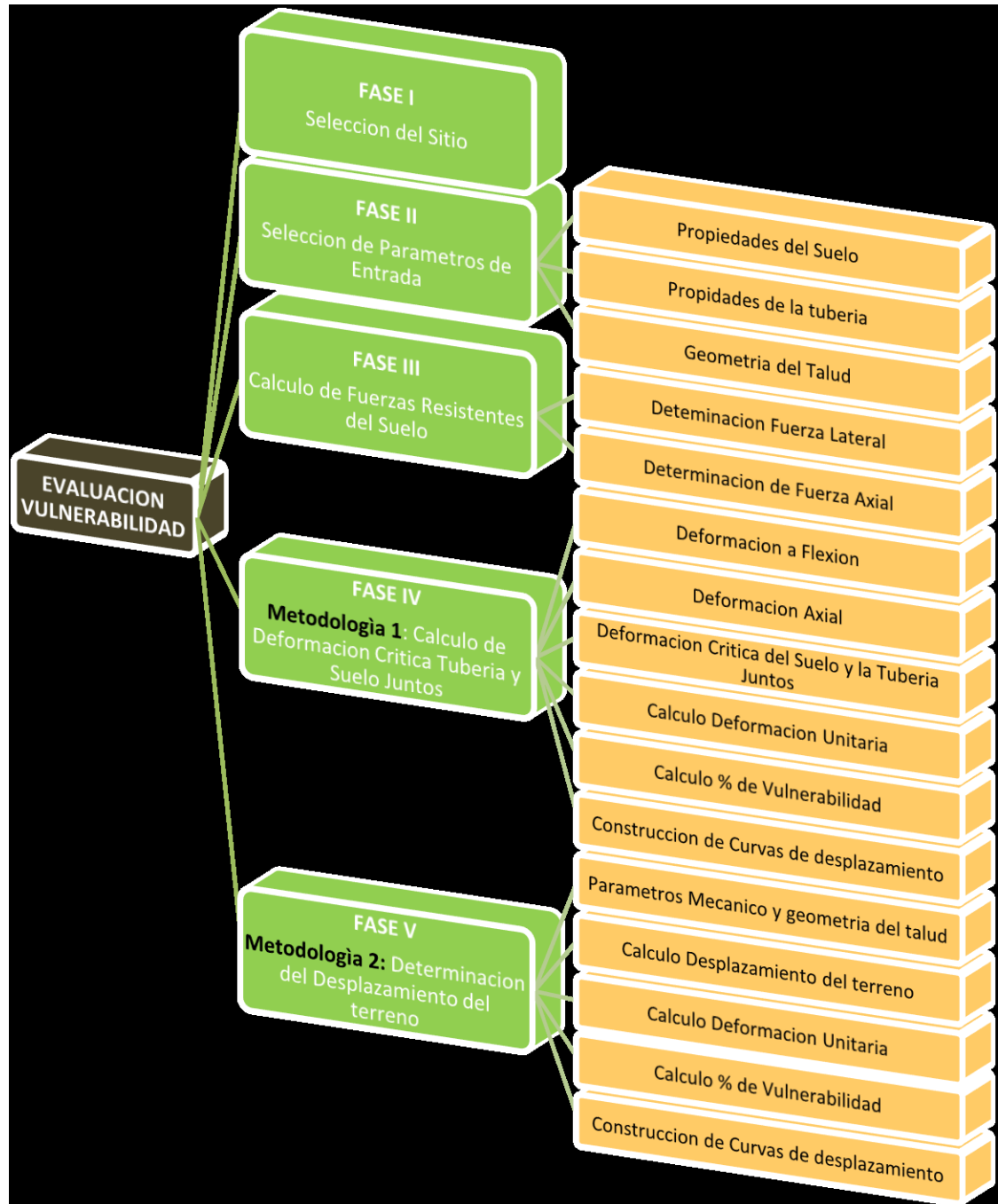
- Determinar geometría del talud y mecanismo de falla (H, L, β, φ).
- Calcular distancia de viaje. De acuerdo a:

$$\text{Ecuación 2-23.} \quad d = \left(1 - \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}\right) \frac{H}{\tan \varphi}$$

- Una vez calculado el desplazamiento del terreno, se procede a calcular la deformación unitaria y el porcentaje de vulnerabilidad conforme a lo establecido en el numeral 4.2.2.4, adicionalmente se procede a calcular el desplazamiento de la tubería conforme a lo establecido en el numeral 4.2.2.5.
- Una vez surtido el paso anterior se procede a revisar de acuerdo al desplazamiento que porcentaje de vulnerabilidad le corresponde con el fin de determinar la deformación de la tubería y establecer el rango en que se encuentra la tubería que puede ser elástico, plástico o de rotura.

A continuación, se muestra la metodología establecida:

Figura 6-2. Esquema de la Metodología para la evaluación de la Vulnerabilidad



6.3. Metodología de Evaluación de los Daños

El riesgo se estima como la magnitud esperada de un daño, que presenta un elemento o sistema, en un lugar dado y durante un tiempo de exposición determinado. Se evalúa en términos de pérdidas y daños físicos, económicos, sociales y ambientales que podrían presentarse si ocurre el evento amenazante.

Por lo anterior uno de los componentes de la evaluación del riesgo será valorar los daños generados debido a la materialización de la amenaza por deslizamiento y la vulnerabilidad de la tubería, la cual a su vez va a depender de la velocidad del movimiento y el tipo de hidrocarburo transportado, y como consecuencia generará diferentes grados de daños, dentro de los que se evaluará será el derrame, que incluye determinación de la peligrosidad del producto derramado, el volumen liberado, definición del factor de dispersión, del receptor, cálculo de probabilidad y cuantificación del riesgo, evaluación de costos asociados al derrame y finalmente la obtención de matrices de riesgo donde se correlaciona la amenaza, la vulnerabilidad y el índice de riesgo obteniendo el riesgo asociado.

Por lo anterior, es necesario definir el tipo de hidrocarburo que se transporta, identificando la principal propiedad física con la cual son diferenciados los crudos, que es su grado API, que no es más que una forma de expresión de la gravedad específica del mismo, dentro de la clasificación se conocen crudos ultraliviano, liviano, mediano, pesado y extra pesado.

Existen muchos métodos organizativos para realizar análisis de riesgos; en este caso por la gran variedad de aspectos que tiene en cuenta, y que se adapta perfectamente a las condiciones de la estructura a evaluar, se ha seleccionado el método de Muhlbauer¹⁸, que responde al flujograma que se presenta en la Figura 2-10. La Ecuación 2-40. Simboliza el proceso de la cuantificación de los riesgos:

$$\text{Ecuación 2-40. } R = \text{Probabilidad} \times \text{FI (Consecuencias)}$$

- **La Valoración del factor de impacto (FI) por derrame del producto.**

La evaluación de los índices o factores de riesgos que no son más que los iniciadores o detonadores de una situación peligrosa, responde la pregunta “que puede ir mal”. La estimación de las probabilidades de que ciertos daños ocurran, responden a la pregunta “cuáles son las consecuencias” y para los ductos esta se

responde evaluando el factor del impacto de las fugas o derrames de los productos que transportan. Este factor se estima o valora según:

$$\text{Ecuación 6-1.} \quad FI = PS * VL * D * R$$

- **Peligrosidad de la sustancia (PS).**

El impacto de una sustancia peligrosa puede definirse como agudo o sea de comienzo repentino y que demanda una atención inmediata y que tiene poca duración, ej. Fuego, explosiones, toxicidad por contacto son amenazas inmediatas a un derrame), o crónico cuando sus efectos y las acciones para eliminarlos son de larga duración.

Los peligros de escape o derrame de gases o líquidos transportados por tuberías son considerados agudos, independientemente de que algunos lleven intrínsecos peligros crónicos como por ej. En el derrame de petróleo crudo el peligro de inflamación es remoto, sin embargo, a la larga la contaminación del medio ambiente tiene mayor peso.

La peligrosidad de una sustancia está definida por los peligros agudo y crónico de acuerdo a:

$$\text{Ecuación 6-2.} \quad PS = RA + RQ$$

- **Peligro agudo RA:**

Sustancias Inflamables:

Bajos puntos de inflamación, < 40 °C se inflaman y queman rápidamente. Si también tiene un punto de ebullición menor que 40 °C, entonces está considerado como de la Clase más inflamable. Entre estos está el gas metano.

Sustancias que tienen el punto de inflamación, < 40 °C y punto de ebullición > 40 °C. Se vaporiza menor cantidad de producto y forma mezclas inflamables con el aire. En esta Clase se incluyen la gasolina, petróleo crudo, nafta y algunos combustibles jet.

De acuerdo a la NFPA, se tiene la siguiente escala, ver Tabla 6-1:

Tabla 6-1. Valores de Inflamabilidad

Descripcion	Nf
No combustible	0
FP > 200°F	1
10°F < FP < 200°F	2
FP < 100°F and BP < 100°F	3
FP < 73°F and BP < 100°F	4

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

Sustancias combustibles:

Puntos de inflamación mayores de 40 °C y que se mantienen la llama mayor tiempo. Esta clase de sustancias incluye el diésel y el keroseno.

De acuerdo a la NFPA, se tiene la siguiente escala, ver Tabla 6-2:

Tabla 6-2. Valores de Reactividad

Descripcion Exotermia °c	Nr
>400	0
305 - 400	1
215 - 305	2
125 - 215	3
< 125	4

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

Toxicidad:

Existen diferentes metodologías que asignan índices basado en la dosis mínima efectiva durante exposiciones repetitivas y a la severidad de los efectos. Este índice se encuentra reportado en la literatura internacional

De acuerdo a la NFPA, se tiene la siguiente escala, ver Tabla 6-3:

Tabla 6-3. Valores de toxicidad

Descripcion	Nh
No hay peligro de que más allá de los combustibles comunes	0
lesión residual menor Sólo es probable	1
La atención médica inmediata necesaria	2
Materiales que causan lesiones serias o con consecuencias	3
La exposición a corto cause la muerte o lesión grave	4

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

▪ **Peligro Crónico RQ:**

La determinación del peligro crónico el cual afecta al medio ambiente por largo periodo de tiempo y el cual requiere actividades especiales de limpieza o remediación, este parámetro fue obtenido del manual de Pipeline risk management de Muhlbauer, para este caso el producto evaluado es combustible y su estimación de peligro crónico es de acuerdo a las cantidades reportadas se indica en los reglamentos de EE. UU y de acuerdo a la clasificación del producto químico en cada una de estas categorías, ver Tabla 6-4:

Tabla 6-4. Valores de peligro crónico

Descripcion	RQ	Peligro Cronico
Metano, etano, propano, etileno, propileno	5000	2
Gasolina, diesel, Kerosene	100	6
Agua, Nitrogeno, Hidrogeno	0	0

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

• **Volumen Liberado de la Sustancia Peligrosa VL.**

Existen correlaciones con las que se ha determinado este índice (VL), en dependencia del peso molecular del producto que se trate y el volumen derramado.

El volumen derramado se determina igualmente para gases y para líquidos aplicando primeramente la Ecuación 2-44, utilizada para determinar la velocidad de liberación de la sustancia, (sin tener en cuenta en gases el factor de expansión) McAllister, E.W. Pipeline,2005.

$$\text{Ecuación 6-3. } q = C * A \left[144 * \Delta P \left(\frac{2g}{\rho} \right) \right]^{1/2}$$

El puntaje se encuentra a continuación de acuerdo al volumen liberado después de 10 minutos, ver Tabla 6-5.

Tabla 6-5. Volumen liberado (lb) después de 10 minutos

Peso Molecular	0 - 5.000	5.000 - 50.000	50.000 - 500.000	>500.000
> 50	1 punto	2 Puntos	3 puntos	3 puntos
28 - 49	2 punto	3 Puntos	4 puntos	5 puntos
< 27	3 punto	4 Puntos	5 puntos	6 puntos

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

- **Factor de Dispersión D**

Este tiene que ver con el área específica donde ocurra el derrame. Por ejemplo, cuando se trata de gas natural, al ser menos denso que el aire se dispersa inmediatamente cuando es liberado a la atmosfera. No ocurre así en el caso del derrame de combustible que se mezcla con el agua y la tierra, pueden trasladarse con ellas o permanecer en el lugar por largo tiempo mientras que no se realicen las actividades de remediación. Este factor puede ser evaluado teniendo en cuenta la velocidad de liberación del producto en (lb/hora) .

El puntaje se encuentra a continuación de acuerdo al volumen liberado después de 1 hora, ver Tabla 6-6:

Tabla 6-6. Dispersión

Libras/hora	Puntuacion por Vulnerabilidad
< 1.000	1
1.001 - 10.000	2
10.001 - 100.000	3
100.001 - 1.000.000	4
> 1.000.001	5

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

- **Características del Receptor**

Existen muchas normas que clasifican la población implicada en los estudios de riesgos; una de las más empleadas es la regulación federal de E.U. (DOT Class). Para la evaluación del receptor (Re) en el caso de ductos se tiene en cuenta las características del factor a aproximadamente 200m a ambos lados del ducto, a lo largo de 1Km de longitud lo que implica su valoración cada 0.4Km² de la traza.

El puntaje se encuentra a continuación de acuerdo a las densidades poblacionales establecidas, ver Tabla 6-7:

Tabla 6-7. Puntaje de acuerdo a densidades poblacionales

Descripcion	Rango de calificacion
Poblacion	0 -10
Zona de Alto Valor	0 - 10
Tierras públicas (parques y bosques nacionales)	0-5
humedales	0-5
Bocatomas	0-5
aguas	0-5
cursos de agua navegables comercialmente	0-5
Total	45

Fuente: Pipeline Risk Management Manual,2004

- **Cálculo de Factor de Impacto al Medio Ambiente**

De acuerdo al modelo de Mulhbauer y a la interpretación de la ecuación para el cálculo del factor de impacto al medio ambiente, se ha propuesto una desviación a la ecuación que resulta un poco más entendible, la variación consiste en sumar los cuatro términos de la ecuación y como se conoce previamente que cada término se encuentra en un rango de valores determinado se dividirá sobre este valor total para dar como resultado el 100% que corresponderá al factor de impacto.

La ecuación propuesta, se presenta a continuación, ver Ecuación 4-1, la calificación propuesta por cada término se observa en la Tabla 6-8, este puntaje es propuesto por el modelo de Muhlbauer.

Ecuación 6-4.
$$FI = \frac{PS+VL+D+R}{\# \text{ puntaje total}}$$

Tabla 6-8. Tabla de puntaje

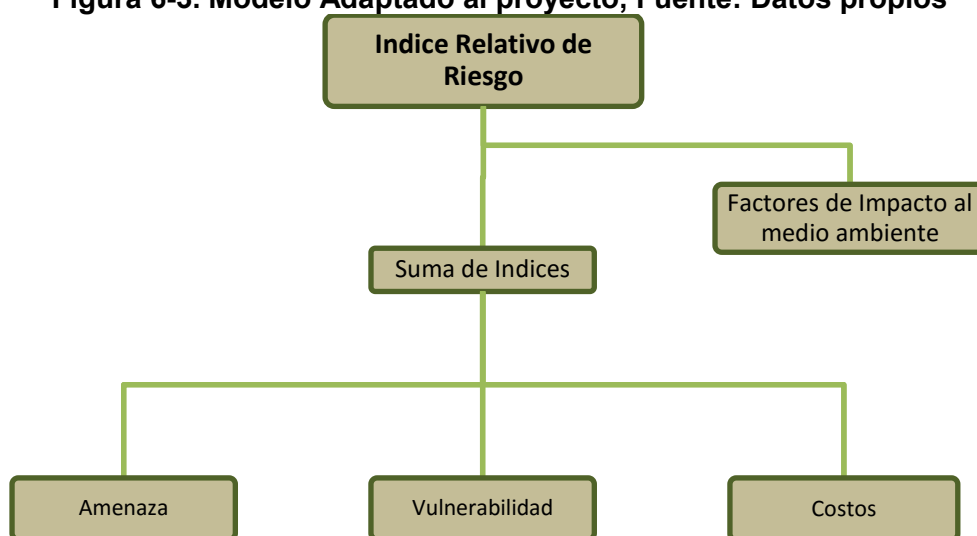
Terminos	Calificacion
PS	22
VL	6
D	5
R	45
Total Puntaje	78

Fuente: Datos propios,2016

- **Cálculo de Probabilidad**

De acuerdo al modelo de Mulhbauer, ver Figura 2-10, se realizó una variación al modelo propuesto, debido a que el cálculo de probabilidad se realizó teniendo en cuenta la amenaza, la vulnerabilidad y los costos asociados al derrame. A continuación, se presenta el nuevo modelo, ver se asignó una calificación a cada uno de los factores, a continuación, se muestra la calificación obtenida para cada uno de los factores:

Figura 6-3. Modelo Adaptado al proyecto, Fuente: Datos propios



○ **Probabilidad por amenaza**

De acuerdo a las probabilidades de falla obtenidas, en el desarrollo de la amenaza anteriormente expuesto, ver Tabla 6-9, el puntaje asignado para probabilidad de falla es:

Tabla 6-9. Probabilidad de Falla

Probabilidad de falla	Puntaje
10^{-1}	25
10^{-2}	50
10^{-3}	75
10^{-4}	100

Fuente: Datos propios,2016

○ **Probabilidad por Vulnerabilidad**

De acuerdo a los % de vulnerabilidad obtenidos anteriormente. A continuación, se presenta los puntajes obtenidos para los diferentes % de vulnerabilidad, ver Tabla 6-10.

Tabla 6-10. Vulnerabilidad

Deformacion Unitaria	% Vulnerabilidad	Puntaje
0,10%	43%	100
0,15%	64%	75
0,31%	79%	50
2,17%	100%	25

Fuente: Datos propios,2016

○ **Costos Asociados**

Los costos asociados al derrame tienen en cuenta el costo de reparación por tubería, la descontaminación por producto derramado y el medio de transporte, para lo cual se tuvo en cuenta la investigación de la ingeniera Galvis (2014). Y se deberá tener en cuenta:

- Para tramos inaccesibles donde es necesario la utilización de helicóptero como medio de transporte, adicionalmente cuando existe derrame y contaminación ambiental del subsuelo o cauces de agua que corresponde hacer la descontaminación. Para este caso el costo de reparación es de aproximadamente altísimo.
- Para tramos donde no presenta contaminación y es de fácil acceso, los porcentajes de inversión cambian notablemente ya que el solo se tiene en cuenta el costo de reparación corresponde a equipos y personal técnico y a la gestoría. Para este caso el costo de reparación se reduce considerablemente.

A continuación, se presentan los puntajes, de acuerdo al análisis anterior, ver Tabla 6-11.

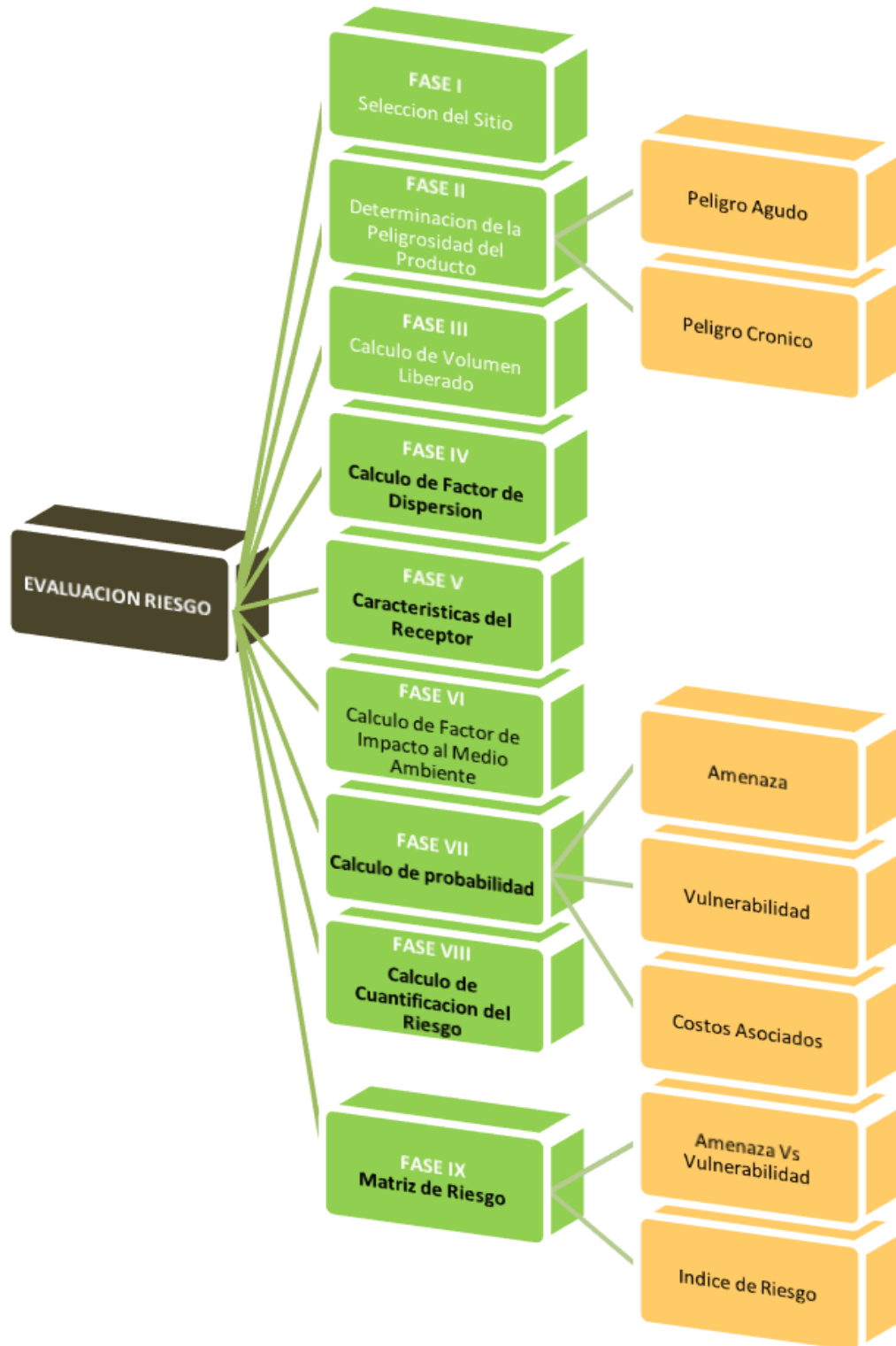
Tabla 6-11. Puntaje de Costos Asociados

Descripcion Item	Rango de puntaje	Puntaje
Equipos y personal tecnico	0 - 20	20
Gestoria	0 - 5	5
Helicoptero	0 - 15	0
Descontaminacion	0 - 60	0
Total		25

Fuente: Datos propios,2016

- **Calculo de probabilidad Índice de Riesgo:**
 - Se debe calcular la probabilidad de acuerdo a los datos obtenidos
 - Se debe tener en cuenta el siguiente criterio para la aceptabilidad:
 - **Límite inferior para riesgo inadmisibles: 90** (calculado con la probabilidad alcanzada teniendo en cuenta un 60% de eficacia en las medidas de mitigación).
 - **Límite inferior para el riesgo tolerable: 70** (calculado con la máxima probabilidad alcanzada teniendo en cuenta un 85% de eficacia en las medidas de mitigación).
 - **Riesgo aceptable: menor de 70** (calculado con la máxima probabilidad posible de alcanzar teniendo en cuenta un 100% de eficacia en las medidas de mitigación).

Figura 6-4. Esquema de la Metodología para la evaluación de la Vulnerabilidad



7. Bibliografía

1. Adriana Galvis Fuentes. Trabajo de especialización “propuesta de una estrategia para la atención de tramos de tubería, bending strain (deformación por curvado), en sistemas de transporte de hidrocarburos.2014
2. Amórtegui José Vicente, Taller ARPEL Geotecnia en Derechos de Vía de Ductos de Petróleos y Gas 2011.
3. American Petroleum Institute. “Specification for Line Pipe, API Specification 5L, American Petroleum Institute, USA, 1990.
4. Ekanayake, J. C., & Phillips, C. J. (1999). A model for determining thresholds for initiation of shallow landslides under near-saturated conditions in the East Coast region, New Zealand. *Journal of Hydrology (NZ)*, 38(1), 1–28.
5. El-Ramly H., Morgenstern N.R., & Cruden D.M. (2002). Probabilistic slope stability analysis for practice. *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 665–683.
6. González Álvaro, Zamudio Eduardo, Castellanos Ramiro. Relaciones de precipitación crítica – Duración de lluvias que disparan movimientos de masa en Santafé de Bogotá Colombia.
7. Guidelines for Design of Buried Steel Pipes, Código ALA (2001)
8. HANSEN, Brinch J. “A General Formula for Bearing Capacity”, Bulletin No. 11, Geoteknisk Institute Akademiet for Tekniske Videnskaber, Copenhagen, Suecia, 1961.
9. Jaime Suarez. Deslizamientos: Análisis Geotécnico capítulo 3, 2009.
10. Muhlbauer, W.K.: Pipeline Risk Management Manual. 3era Ed. Elsevier, 2004.Caps. 1, 7, 15. ISBN: 0-7506-7579-9.
11. McAllister, E.W. Pipeline rules of thumbs. Handbook. Ed. Elsevier, Cap 17, UK,. 2005.ISBN: 0-7506-7852-6.
12. McAllister, E.W. Pipeline rules of thumbs. Handbook. Ed. Elsevier, Cap 17, UK,. 2005.ISBN: 0-7506-7852-6.
13. Manuel García López y Hugo Ernesto Acosta. X Jornada Geotecnia de la Ingeniería Colombiana. Comportamiento de sistemas de gas sometidos a sismos 1995.

14. LIU, Xuejie, O'ROURKE Michael J. "Behaviour of Continuous Pipeline Subject to Transverse PGD". En: Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26 (1997) pp. 989 – 1003.
15. Rourke 1997, Behaviour of continuous pipeline subject to transverse permanent ground deformation (PGD)
16. Pradel, D., & Raad, G. (1993). Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes. Journal of Geotechnical Engineering, 119(2), 315–332. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:2(315).
17. Russelli, C. (2008). Probabilistic methods applied to the bearing capacity problem
18. Ruperto Enrique Olivera Villaseñor y Alejandro Rodríguez Castellanos, Estudio de Riesgos en Ductos de Transporte de Gasolina y diésel en México 2005.
19. Ramberg, M., and Osgood, W R. Description Of Stress – Strain Curves By Three Parameters, Technical notes: National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, July 1943.
20. Sutton, I. ALARP (as low as reasonably practicable) risk. <http://suttonbooks.wordpress.com/article/alarp-as-low-as-reasonably-practicable-2vu500dglb4m-10/>
21. Sutton, I. ALARP (as low as reasonably practicable) risk. <http://suttonbooks.wordpress.com/article/alarp-as-low-as-reasonably-practicable-2vu500dglb4m-10/>
22. Suárez Díaz Jaime, Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales 1998.
23. Sweeney, Gasca, García Lopez, Palmer. Pipelines and landslides in rugged terrain: A database, historic risks and pipeline vulnerability.
24. WLF3. World Landslide Forum 3. Dynamics of large and Rapid Landslide with long travel distances under dense gas expanding power

Anexo 1: Parámetros Geotécnicos

Anexo 2: Análisis Sísmico

Anexo 3: Análisis de Lluvias

Anexo 4: Escenarios de Diseño

Anexo 5: Modelaciones SLIDE

Anexo 6: Calculo Desplazamiento Máximo de un Deslizamiento y una Tubería Juntos

Anexo 7: Calculo de Vulnerabilidad

Anexo 8: Calculo Desplazamiento del Terreno

Anexo 9: Matrices de Riesgo
