



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **MÉTODOS PARA LA MITIGACIÓN TEMPRANA DE IMPACTOS POR DESLIZAMIENTOS DE ROCAS EN CORREDORES VIALES, MEDIANTE TÉCNICAS DE VOLADURA.**

**JOHN ALEXANDER LEÓN CASTILLO**  
Estudiante Doctorado de Geografía

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Humanas  
Departamento de Geografía  
Doctorado en Geografía  
Bogotá D.C. - Colombia  
2025

# **MÉTODOS PARA LA MITIGACIÓN TEMPRANA DE IMPACTOS POR DESLIZAMIENTOS DE ROCAS EN CORREDORES VIALES, MEDIANTE TÉCNICAS DE VOLADURA.**

**JOHN ALEXANDER LEÓN CASTILLO**

Geógrafo, Especialista en técnicas de voladura para obras de ingeniería civil y militar, MSc en Geología.

Tesis doctoral presentada como requisito para optar al título de:

**Doctor en Geografía**

**GERMAN VARGAS CUERVO**

Director

Doctor Ciencias de La Tierra

Grupo de Investigación: GEOTECNOLOGÍAS

Línea de Investigación: Riesgos naturales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Humanas

Departamento de Geografía

Doctorado en Geografía

Bogotá D.C. - Colombia

2025

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco a DIOS por darme siempre fuerzas para continuar sin importar las adversidades, por guiarme en el camino de lo prudente y darme sabiduría para mejorar día a día en mi profesión

Al mismo tiempo quiero agradecer a mi director de tesis, Dr. German Vargas Cuervo, por su orientación, esfuerzo y dedicación, aspectos que fueron fundamentales en mi formación como investigador, también agradecer al Mayor retirado del Ejército Hermes Mauricio Alvarado Sachica, cuya gestión se permitió el desarrollo de contactos vitales para el desarrollo adecuado de esta tesis y finalmente al ejército nacional de Colombia cuyo apoyo a permitió el desarrollo de actividades que permitieron alcanzar los logros de esta investigación.

## **Dedicatoria**

A mi padre Gregorio Ezequiel Leon, quien en vida fue mi sostén incondicional en cada una de las etapas de mi vida en las que estuvo presente, quien me enseñó el valor del esfuerzo, por creer en mí cuando yo dudaba, por acompañarme con paciencia y amor. Cada logro que he alcanzado lleva consigo su sacrificio silencioso, a mis hijos Aaron y Moises quienes con su presencia me inspira a ser mejor cada día, esta meta también es para ellos, porque me enseñan con su alegría y su ternura que todo esfuerzo vale la pena, a ellos gracias por ser mi hogar, mi fuerza y mi mayor motivación.

## RESUMEN

### **Métodos para la mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura**

Los deslizamientos de rocas en corredores viales afectan la movilidad de personas, mercancías y recursos que se desplazan por las diferentes vías, lo que obliga al cierre parcial o total del corredor por largos periodos de tiempo, por lo que el desarrollo de un método para la mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura, contribuye en dar una solución técnicamente viable, rápida y económica a la problemática de la movilidad, dando respuesta reales y oportunas, ya que dada la ubicación del territorio colombiano, el mantener del flujo vial y los procesos de movilidad es estratégico en los procesos socioeconómicos del país. Desde la perspectiva técnica relacionada a los explosivos y agentes de voladura, el aprovechar propiedades usadas en labores de minería como su capacidad energética y generación de gases en fracturamiento de roca y desplazamiento de grandes volúmenes de material, permite dar otra perspectiva en el aprovechamiento de sus propiedades en la atención de eventos que afecten la infraestructura vial, para el desarrollo de esta tesis se analizaron 40 casos de voladura de tipo secundaria (Air cushion pop blasting), desarrolladas en los departamentos del Tolima, Caquetá, Meta y Antioquia, en donde como resultado del análisis de variables relacionadas al material, entorno y agente explosivo, dieron como resultado la estructura del proceso de validación de un método, con el que se propone un protocolo para el uso de agentes explosivos en procesos de atención de desastre ante deslizamientos por caída de rocas en corredores viales.

## **ABSTRACT**

### **Methods for the Early Mitigation of Rockfall Impacts on Road Corridors through Blasting Techniques**

Rockslides on road corridors affect the mobility of people, goods, and resources traveling along different routes, forcing the partial or total closure of the corridor for extended periods. Therefore, developing a method for the early mitigation of the impacts of rockslides on road corridors, using blasting techniques, contributes to providing a technically viable, rapid, and economical solution to the mobility problem, offering real and timely responses. Given the location of Colombian territory, maintaining road flow and mobility processes is strategic for the country's socioeconomic processes. From a technical perspective related to explosives and blasting agents, leveraging properties used in mining operations, such as their energy capacity and gas generation during rock fracturing and the displacement of large volumes of material, allows for a different approach to utilizing these properties in addressing events that affect road infrastructure. For the development of this thesis, 40 cases of secondary blasting (air cushion pop blasting) were analyzed in the departments of Tolima, Caquetá, Meta, and Antioquia. The analysis of variables related to the material, environment, and explosive agent resulted in the validation process structure for a method, which proposes a protocol for the use of explosive agents in disaster response processes involving rockfalls on road corridors.

## **PALABRAS CLAVE**

Deslizamiento, Fragmentación, Método, Protocolo, Voladura

## **KEYWORDS:**

Sliding, fragmentation, Method, protocol, Blasting

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	20
ESTADO DEL ARTE .....	22
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	29
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	31
JUSTIFICACIÓN .....	32
OBJETIVOS.....	37
OBJETIVO GENERAL.....	37
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	37
METODOLOGÍA.....	38
CAPÍTULO 1 .....	47
GENERALIDADES.....	47
1.1. Marco geográfico .....	47
1.2. Marco conceptual .....	49
1.2.1. Infraestructura vial.....	50
1.2.2. Movimientos en masa en redes viales .....	54
1.2.3. Caída de rocas en corredores viales.....	56
1.2.4. Problemática de la infraestructura vial en Colombia.....	58
1.2.5. Explosivos .....	61
CAPÍTULO 2 .....	65
VARIABLES.....	65
2.1. Variables a considerar en el uso de explosivos.....	66
2.1.1. Características técnicas del explosivo .....	67
2.1.2. Características de la litología.....	68
2.2. Litología.....	71
2.2.1. Caracterización de los materiales macizos rocosos .....	72
2.1.2. Definición de roca y su clasificación.....	73
2.1.3. Selección de rocas para voladura.....	74
2.1.4. Clasificación de materiales rocoso para voladura.....	82
2.1.5. Frecuencia de las caídas y su distribución.....	84

2.1.6. Inclinación de la pendiente .....	84
2.1.7. Hidrología .....	85
2.1.8. Factores antrópicos.....	86
2.2. Mecanismo de fragmentación de la roca .....	86
2.2.1. Factores que influyen en el mecanismo de rotura de la roca .....	88
2.2.2. Influencia de las características de la roca .....	89
2.3. Factores que afectan el diseño de la voladura.....	90
2.4. Criterios de selección del explosivo .....	93
2.5. Parámetros de voladura.....	93
2.5.1. Análisis de voladura .....	94
2.5.2. Cálculos usados en voladura .....	96
2.6. Voladura secundaria.....	100
2.6.1. Voladura de plasteo .....	100
2.6.2. Voladura de cachorro .....	101
2.6.3. Valoración de las vibraciones y longitud de afectación por onda.....	102
2.6.4. Relación Emulsión – ANFO.....	102
CAPITULO 3 .....	103
IMPACTOS .....	103
3.1. Vías en Colombia.....	103
3.2. Eventos Históricos.....	106
3.3. Caso vía al Llano (Bogotá - Villavicencio) .....	94
3.3.1. Construcción de la vía .....	94
3.3.2. Año 1927. Avalancha, vereda Naranjal, municipio de Quetame .....	95
3.3.3. Año 1974. Derrumbe, Quebrada Blanca, municipio de Quetame .....	95
3.3.4. Año 1991. Caída de rocas entre Puentequetame y Cáqueza .....	100
3.3.5. Año 1997. Avalancha en la quebrada La Quina.....	101
3.3.6. Año 1998. Caída de rocas, kilómetro 80, municipio de Guayabetal .....	101
3.3.7. Año 2004. Avalancha, kilómetro 46+200, municipio de Quetame (Cundinamarca)	102
3.3.8. Año 2019. Derrumbe, kilómetros 57 y 58 + 500 m., municipio de Guayabetal .....	102
3.3.9. Año 2023. Avalancha, sector Naranjal, municipio de Quetame .....	105
3.4. Análisis y percepción social del impacto .....	106
3.5. Impactos generados por los cierres en la vía al Llano.....	110

CAPÍTULO 4 .....	125
MÉTODOS.....	125
4.1. Métodos tradicionales para el mantenimiento, restablecimiento o apertura de corredores viales para el restablecimiento de la comunicación vía terrestre .....	126
4.1.1. Constitución y tipos de materiales.....	126
4.1.2. Despeje por medio de maquinaria.....	127
4.2. Métodos tradicionales para despeje vial .....	131
4.2.1 Método 1. Excavación y lleno adyacente.....	131
4.2.2. Método 2. Excavación y lleno o disposición del material alejado .....	132
4.2.3. Método 3. Utilización de la Mototrailla .....	135
4.3. Método propuesto a partir de técnicas de voladura para el corte o la fragmentación de bloques.....	135
4.3.1. Voladuras secundarias .....	136
Voladura de cachorro.....	136
Voladura de cachorros amortiguados (Air cushion pop blasting).....	138
Aspectos de seguridad .....	138
Voladura secundaria sin perforación .....	140
CAPÍTULO 5 .....	142
ESTUDIO DE CASO- .....	142
5.1. Caso de validación de voladura N. 1. Vía Ibagué - Combeima - Villa Restrepo (Tolima). ....	145
5.1.1. Análisis de caso Vía Ibagué - Combeima - Villa Restrepo (Tolima). .....	153
5.2. Caso de validación de voladura N. 2. Vía San Vicente del Caguán (Caquetá).....	154
5.2.1. Análisis de caso Vía San Vicente del Caguán (Caquetá) .....	161
5.3. Caso de validación de voladura N. 3. Vía Florencia (Caquetá).....	162
5.3.1. Análisis de caso Vía Florencia (Caquetá).....	169
5.4. Caso de validación de voladura N. 4. Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. ESP, Acueducto de Villavicencio – Villavicencio (Meta).....	154
5.4.1. Análisis de caso N. 4. Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. ESP, Acueducto de Villavicencio – Villavicencio (Meta).....	180
5.5. Caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. ESP, Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta).....	181
5.5.1. Análisis de caso N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. ESP, Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta) .....	190
5.6. Caso de validación de voladura N. 6. Vía San Luis – Marinilla – Medellín (Antioquia) .....	199
5.6.1. Análisis de caso N. 6. Vía San Luis – Marinilla – Medellín (Antioquia).....	205

5.7. Caso de validación de voladura N. 7. Alcantarillado de San Luis Antioquia.....	206
5.7.1. Análisis de caso N. 7. Alcantarillado de San Luis Antioquia .....	211
CAPÍTULO 6 .....	181
PROPUESTA DE PROTOCOLO .....	181
6.1. Aspectos Normativos .....	181
6.1.1 Capacitación en uso y manejo de explosivos .....	187
6.2. Protocolo .....	188
6.2.1. Compra de explosivo .....	188
6.2.2. Autorización para compra de explosivo.....	192
6.2.3. Autorización para la movilización de material explosivo (salvoconducto de transporte) .....	192
6.2.4. Facturación y entrega del material solicitado.....	193
6.2.5. Transporte interno y externo en vehículos.....	193
6.2.6. Requisitos de vehículos y transportadores .....	196
6.2.7. Transporte manual.....	198
6.2.8. Almacenamiento de explosivo y accesorios.....	199
6.2.9. Operaciones y uso de explosivos .....	204
6.10 Elementos de protección personal generales para el trabajo .....	212
6.11. Señalamiento en los alrededores de la zona de fragmentación, corte y/o voladura ....	213
6.12. Manejo de material post voladura y/o fragmentación.....	213
6.13. Impactos a manejar.....	214
6.14. Diagrama de procesos.....	206
RECOMENDACIONES.....	214
Identificación de puntos críticos .....	214
CONCLUSIONES .....	206
BIBLIOGRAFÍA.....	217

# DIAGRAMAS

Diagrama 1. Metodología general implementada en el desarrollo del proyecto.....	40
Diagrama 2. Metodología general y actividades para el desarrollo del primer objetivo del proyecto .....	41
Diagrama 3. Metodología general y actividades para el desarrollo del segundo objetivo del proyecto .....	42
Diagrama 4. Metodología general y actividades para el desarrollo del tercer objetivo del proyecto .....	45
Diagrama 5. Metodología general y actividades para el desarrollo del cuarto objetivo del proyecto .....	45
Diagrama 6. Metodología general y actividades para el desarrollo del quinto objetivo del proyecto .....	46
Diagrama 7. Composición de agentes explosivos .....	62
Diagrama 8. Aspectos generales y variables a evaluar en el uso de explosivos .....	65
Diagrama 9. Características y variables controlables y no controlables de los Explosivos.....	70
Diagrama 10. Variables controlables en el uso de explosivos .....	70
Diagrama 11. Variables no controlables en el uso de explosivos .....	71
Diagrama 12. Factores que afectan el diseño de la voladura .....	91
Diagrama 13. Capacitación en uso y manejo de explosivos.....	188
Diagrama 14. Diagrama de flujo general para el desarrollo de una voladura .....	206
Diagrama 15. Solicitud de compra de material explosivo y accesorios .....	208
Diagrama 16. Retiro de material, transporte y almacenamiento de materia explosivo y accesorios .....	210
Diagrama 17. Proceso de voladura y manejo de productos postvoladura .....	212
Diagrama 18. Cierre de la voladura.....	213
Diagrama 19. Identificación de puntos críticos. Etapa 1.....	217
Diagrama 20. Identificación de puntos críticos Etapa 2.....	220
Diagrama 21. Identificación de puntos críticos Etapa 3.....	221
Diagrama 22. Identificación de puntos críticos. (Etapa 4). .....	223
Diagrama 23. Identificación de puntos críticos. (Etapa 5) .....	226

Diagrama 24. Diagrama de flujo general para la identificación de zonas de alerta en el proceso de adquisición de explosivos y desarrollo de la voladura. .... 206

## IMAGENES

Imagen 1. Red vial colombiana .....	53
Imagen 2. Zonas identificadas con procesos de inestabilidad según el SGC a 2020.....	55
Imagen 3. Zonas identificadas con procesos de caída de rocas según el SGC .....	57
Imagen 4. Zonas identificadas con procesos de movimiento en masa durante el fenómeno de la niña según el INVIAS .....	60
Imagen 5. Tipos de fisuras en las proximidades del barreno .....	88
Imagen 6. Esquema de Voladura de Plasteo .....	101
Imagen 7. Esquema de voladura de Cachorro .....	101
Imagen 8. Sitios críticos recurrentes identificados por el INVIAS, durante el fenómeno de la Niña 2010 – 2020.....	91
Imagen 9. Reporte del diario El espectador de los hechos ocurridos en Quebrada Blanca - Cundinamarca .....	98
Imagen 10. Reporte del diario El Tiempo de los hechos ocurridos en Quebrada Blanca - Cundinamarca .....	98
Imagen 11. Ampliación de la noticia realizada por el diario el Tiempo .....	98
Imagen 12. Nota del diario el Espectador de Declaratoria de Campo Santo del Kilómetro 54 del Sector de Quebrada blanca.....	99
Imagen 13. Reporte de pérdidas por el cierre de la vía Ministerio de transporte Gobernación del Meta. Septiembre 2019 .....	103
Imagen 14. Proceso de voladura de Cachorro. ....	137
Imagen 15. Esquema de voladura implementado. ....	144
Imagen 16. Ubicación de la zona de voladura en el departamento del Tolima.....	146
Imagen 17. Zona de voladura en imagen de satélite .....	147
Imagen 18. Ubicación de las zonas de voladura desarrolladas en el departamento del Caquetá	155
Imagen 19. Zonas de voladura en imagen de satélite.....	156
Imagen 20. Ubicación de las zonas de voladura desarrolladas en el departamento del Caquetá	163
Imagen 21. Zonas de voladura cercanías de Florencia - Caquetá en imagen de satélite .....	164
Imagen 22. Comunas de Villavicencio.....	171
Imagen 23. Ubicación de las zonas de voladura desarrollada en la ciudad de Villavicencio .....	172

Imagen 24. Ubicación de las zonas de voladura en la ciudad de Villavicencio en imagen tipo Landsat .....	173
Imagen 25. Ubicación específica de la caída de bloques sobre las rejas y rejillas en la quebrada Caño Grande, zona de desarrollo de la voladura en cercanía de la bocatoma en la ciudad de Villavicencio, en imagen tipo Landsat. ....	175
Imagen 26. Ubicación de bloques que obstruían el cauce y paso de agua a la bocatoma .....	177
Imagen 27. Ubicación de zonas de voladura en la vereda La Argentina y Santa María Alta .....	182
Imagen 28. Ubicación de las zonas de voladura en las veredas la Argentina y Santa María Alta y la bocatoma en imagen Landsat .....	185
Imagen 29. Ubicación de las zonas de voladura .....	186
Imagen 30. Ubicación de zonas de voladura en el municipio de San Luis .....	199
Imagen 31. Ubicación de los puntos de deslizamiento en el municipio de San Luis .....	201
Imagen 32. Ubicación de las zonas de voladura en el municipio de San Luis - Antioquia .....	207
Imagen 33. Ubicación de los puntos de voladura en zanjas en el municipio de San Luis .....	209

## TABLAS

Tabla 1. Propiedades y características de los explosivos .....	64
Tabla 2. Estimación cualitativa de la resistencia al fracturamiento de una roca.....	67
Tabla 3. Clasificación y tipo de materiales para excavación en roca .....	75
Tabla 4. Clasificación general de rocas.....	77
Tabla 5. Descripción del grado de meteorización .....	78
Tabla 6. Estimación cualitativa de la resistencia al fracturamiento de una roca.....	79
Tabla 7. Criterio de clasificación de macizo rocoso para Voladura. Modificado de Lilly (1986) .....	84
Tabla 8. Gasto Específico en dependencia del coeficiente de fortaleza de la roca .....	97
Tabla 9. Patrones de voladura, expresados en función del diámetro de los barrenos.....	97
Tabla 10. Valores de kd - parámetro de depositación de la roca.....	99
Tabla 11. Valores de Ks – parámetros estructurales de la roca .....	99
Tabla 12. Valores de A en función de calidad de la roca.....	100
Tabla 13. Relación Emulsión-ANFO .....	102
Tabla 14. Comparativo de daños y pérdidas por desastres de alta y baja magnitud ocurridos en Colombia entre los años 1970 y 2012. ....	107
Tabla 15. Afectaciones de la primera temporada invernal 2010 .....	83
Tabla 16. Afectaciones de la primera temporada invernal 2011 .....	83
Tabla 17. Afectaciones de la primera temporada invernal 2012 .....	83
Tabla 18. Total, de daños por departamento (millones de pesos) .....	85
Tabla 19. Corredores viales con puntos críticos de recurrencia de movimientos en masa identificados por el INVIAS, durante el fenómeno de la Niña 2010 – 2020 .....	90
Tabla 20. Características generales de las encuestas realizadas .....	107
Tabla 21. Resultados del análisis estadístico de las encuestas .....	107
Tabla 22. Cantidad de explosivo, o equivalente en m/lb .....	140
Tabla 23. Valores de carga aproximada para plastas.....	141
Tabla 24. Clasificación de rocas según su resistencia a la compresión simple .....	145
Tabla 25. Clasificación de bloques sobre la Vía Ibagué - Combeima - Villa Restrepo (Tolima).....	148
Tabla 26. Resumen caso de validación de voladura N. 1. Vía Ibagué - Combeima - Villa Restrepo (Tolima). ....	154
Tabla 27. Clasificación de bloques sobre la Vía San Vicente del Caguán (Caquetá) .....	157

Tabla 28. Resumen caso de validación de voladura N. 2. Vía San Vicente del Caguán (Caquetá)..	162
Tabla 29. Clasificación de bloques sobre la Vía Florencia (Caquetá) .....	165
Tabla 30. Resumen caso de validación de voladura N. 3 Vía Florencia (Caquetá).....	170
Tabla 31. Clasificación de bloques sobre la Quebrada Caño Grande, que afecta la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. ESP, Acueducto de Villavicencio – Villavicencio (Meta) ....	178
Tabla 32. Resumen caso de validación de voladura N. 4. Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. ESP, Acueducto de Villavicencio – Villavicencio (Meta) .....	181
Tabla 33. Clasificación de bloques sobre el río Guatiquia, que afectan la Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. ESP, Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta) .....	187
Tabla 34. Resumen caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. ESP, Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta) .....	191
Tabla 35. Resumen caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. ESP, Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta) .....	196
Tabla 36. Resumen caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. ESP, Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta) .....	197
Tabla 37. Resumen caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. ESP, Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta) .....	198
Tabla 38. Clasificación de bloques sobre la vía que comunica el municipio de San Luis y Marinilla – Antioquia.....	202
Tabla 39. Resumen caso de validación de voladura N. 6. Vía San Luis – Marinilla – Medellín (Antioquia).....	206
Tabla 40. Resumen caso de validación de voladura N. 7. Alcantarillado de San Luis Antioquia ....	212
Tabla 41. Parámetros de evaluación de bloques .....	177
Tabla 42. Predicción de fragmentación y requerimientos .....	179
Tabla 43. Normatividad asociada a la seguridad y salud en el trabajo .....	182
Tabla 44. Normatividad asociada a la gestión del riesgo de desastres.....	182
Tabla 45. Normatividad asociada al almacenamiento y uso de explosivos .....	183
Tabla 46. Normatividad asociada a la adquisición de explosivos .....	183
Tabla 47. Normatividad asociada al transporte de explosivos .....	183
Tabla 48. Normatividad asociada a las disposiciones del Ministerio de Minas y Energía - MINENERGIA en el tema de explosivos.....	184

Tabla 49. Normatividad asociada a las disposiciones de la Agencia Nacional de Minería ANM en el tema de explosivos.....	184
Tabla 50. Normatividad asociada a la Escuela de Ingenieros Militares ESING en el tema de explosivos .....	184
Tabla 51. Normatividad asociada a Departamento Control Comercio de Armas -DCCA en el tema de explosivosl .....	185
Tabla 52. Normatividad asociada a la Industria Militar Colombiana - INDUMIL en el tema de explosivos .....	186
Tabla 53. Normatividad asociada a la capacitación dada por el SENA en el tema de explosivos...	186
Tabla 54. Normatividad Técnica asociada al ICONTEC en el tema de explosivos .....	187
Tabla 55. Normatividad internacional aplicada en Colombia asociada al tema de explosivos .....	187
Tabla 56. Matriz de Identificación de Aspectos e Impactos Ambientales en operación de voladura y/o fragmentación.....	205
Tabla 57. Tiempo estimado en trámites para la adquisición de agentes explosivos y accesorios .	209

## FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Disposición típica de una malla de perforación.....	95
Fotografía 2. Disposición típica de un barreno en un bloque de roca .....	96
Fotografía 3. Bloque sobre la vía Bogotá - Villavicencio. ....	86
Fotografía 4. Bloque vía Medellín - Bogotá. 2017.....	87
Fotografía 5. Bloque sobre la vía Barichara - Guane.....	88
Fotografía 6. Sector Quebrada Blanca – Quetame – Cundinamarca, después del deslizamiento....	96
Fotografía 7. Búsqueda de cuerpos en el lecho de la quebrada .....	97
Fotografía 8. Movilización de pobladores por la zona de deslizamiento.....	97
Fotografía 9. Cruz Roja Colombiana, realizando el rescate de cadáveres en zona de deslizamiento .....	97
Fotografía 10. Policía Nacional de Colombia, realizando operativos de rescate de cadáveres en la zona de deslizamiento.....	97
Fotografía 11. Vía al Llano Bogotá - Villavicencio año 1980 .....	99
Fotografía 12. Vía al Llano Bogotá - Villavicencio año 1994 .....	101
Fotografía 13. Zona de avalancha, kilómetro 46+200, municipio de Quetame (Cundinamarca)...	104
Fotografía 14. Panorámica del sector de la avalancha, kilómetro 46+200, municipio de Quetame (Cundinamarca).....	104
Fotografía 15. Desmonte.....	128
Fotografía 16. Despalme .....	129
Fotografía 17. Bombeo de agua en deslizamiento.....	130
Fotografía 18. Corte y lleno Adyacente.....	131
Fotografía 19. Volqueta por debajo del nivel de sustentación de la retroexcavadora.....	132
Fotografía 20. Volqueta al mismo nivel de sustentación de la excavadora.....	133
Fotografía 21. Excavación bajo condiciones de repaleo .....	134
Fotografía 22. Volqueta está por encima del nivel de sustentación.....	134
Fotografía 23. Excavación con Mototrailla.....	135
Fotografía 24. Presencia de 3 bloques que obstruyen Vía que comunica la ciudad de Ibagué con los municipios de Combeima y Villa Restrepo (Tolima) .....	148
Fotografía 25. Perforación de barreno en uno de los bloques de roca .....	149
Fotografía 26. Momento de la detonación para fragmentar el 1.er bloque de roca .....	150

Fotografía 27. Resultado de la detonación, fragmentación del 1er bloque de roca .....	151
Fotografía 28. Bloque que obstruyen vía que comunica la ciudad de Ibagué con los municipios de Combeima y Villa Restrepo (Tolima).....	151
Fotografía 29. Momento de la detonación para fragmentar el 2.º bloque de roca .....	152
Fotografía 30. Resultado de la detonación, fragmentación del 2do bloque de roca .....	152
Fotografía 31. Bloque cargado y con cordón detonante .....	158
Fotografía 32. Proceso de carga y tacado de explosivo en bloque.....	159
Fotografía 33. Resultados de la voladura.....	159
Fotografía 34. Resultados de la voladura.....	160
Fotografía 35. Manejo de escombros, proceso de reafirmado en la vía .....	160
<i>Fotografía 36. Proceso de inspección del área de voladura.....</i>	<i>166</i>
<i>Fotografía 37. Medición y evaluación de las características físicas del bloque a volar .....</i>	<i>167</i>
<i>Fotografía 38. Evaluación de las características físicas del bloque a volar.....</i>	<i>168</i>
Fotografía 39. Voladura del bloque en vía secundaria sobre talud con alta pendiente .....	169
Fotografía 40. Inicio de creciente por lluvias en zona de la bocatoma.....	175
Fotografía 41. Creciente y afectación en la zona de bocatoma .....	176
Fotografía 42. Bocatoma sepultada por barro.....	176
Fotografía 43. Perforación de barrenos en el bloque .....	179
Fotografía 44. Inspección de bloque antes de la voladura .....	188
Fotografía 45. Proceso de amarre y corte de cordón detonante y ubicación de detonadores .....	189
Fotografía 46. Transporte de plantas eléctricas requeridas para los trabajos técnicos .....	190
Fotografía 47. Bloque que obstruye la vía entre los municipios de San Luis y Marinilla – Antioquia .....	202
Fotografía 48. Corte y/o fragmentación de bloque .....	202
Fotografía 49. Resultados de la fragmentación del bloque de roca N. 01 municipio de San Luis ..	203
Fotografía 50. Resultados de la fragmentación del Bloque de roca N. 02 municipio de San Luis ..	204
Fotografía 51. Resultados de la fragmentación del Bloque de roca N. 03 municipio de San Luis ..	204
Fotografía 52. Municipio de San Luis - Antioquia .....	208
Fotografía 53. Bloque de tonalita fragmentado.....	210
Fotografía 54. Zanja con bloque de tonalita fragmentados.....	210

# INTRODUCCIÓN

En Colombia más del 80 % de la población y su infraestructura productiva se localiza en la zona montañosa de los Andes colombianos, donde interactúan una serie de factores naturales y antrópicos que generan condiciones para la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa, comúnmente denominados deslizamientos. La apertura de corredores viales en zonas montañosas propicia la detonación de movimientos en masa de roca y depósitos no consolidados, principalmente por los cambios morfológicos en las bases de los taludes por el corte de las vías, cambios en la cobertura vegetal y efectos en las redes de drenaje entre otros factores.

La ocurrencia de caídas de grandes volúmenes de roca en zonas viales de importancia, produce interrupciones de varios días hasta meses (caso vía Bogotá - Villavicencio), ocasionando grandes perjuicios sociales y económicos por la interrupción del transporte de carga y la movilidad de las personas. Ante este escenario, las técnicas de voladura con explosivo, ofrecen una alternativa técnicamente viable, de bajo costo y oportuna para minimizar los impactos.

Actualmente, hay métodos y se aplican técnicas de voladuras de forma efectivas, pero aún hay mucho desconocimiento del carácter técnico y científico, así como de su alcance y aplicación, para hacer de esta técnica un proceso generalizado en las empresas responsables del mantenimiento y operación vial.

Ante este problema, el alcance de la investigación aquí propuesta contempla la comparación de diferentes métodos de voladura para la remoción de los depósitos de roca en zonas viales e inestables, a partir de las características del material deslizado y las propiedades del terreno in situ e inestable como la geomorfología, la geología de rocas y estructuras asociadas, las características de los taludes y laderas inferiores y superiores, entre otros factores incidentes. La integración de métodos técnicos para el uso de explosivo (características, comportamiento, energía liberada), permiten a partir de funciones físico-matemáticas, predecir del comportamiento del explosivo durante la detonación y la respuesta de los elementos en el área de detonación e influencia (masa a remover, talud, vía, etc.), a fin de establecer factores de seguridad en el diseño de voladura e intervención y remoción de material inestable y depositado en corredores viales.

Se destaca en el capítulo de estudio de caso, la presentación de diferentes casos con datos para la validación del método en donde se cuenta con información relacionada con 80 casos de voladura que se desarrollaron en los departamentos del Tolima, Caquetá, Meta y Antioquia, entre los años 2017 a 2023, por parte del Batallón de Infantería N.18 de la Sexta (6.ª) Brigada del Ejército Nacional de Colombia y el Grupo Marte de la Quinta División del Ejército Nacional de Colombia, Batallón de Infantería N.18 de la Cuarta (4.ª) Brigada del Ejército Nacional de Colombia y el Grupo Marte de la Quinta División del Ejército Nacional de Colombia, la empresa Voladura Demolición y Perforación 3JY de la ciudad de Medellín - Antioquia, cuyos datos sirvieron como insumo para la validación de los resultados del método y desarrollo del protocolo propuesto.

Cabe anotar que la investigación y desarrollo del tema está soportada en la formación académica, certificación legal para el uso de explosivos y la experiencia del estudiante de Doctorado John Alexander León, además como apoyo logístico para esta investigación se formalizaron acciones previamente adelantadas con la Escuela de Ingenieros Militares - ESING, la Industria Militar Colombiana - INDUMIL y Ejército Nacional de Colombia y el Instituto Nacional de Vías - INVIAS. La investigación se enmarca en la línea de riesgos naturales y antrópicos del Grupo de Investigación de GEOTECNOLOGÍAS, de categoría B de COLCIENCIAS (2018), sobre el cual se integrará el estudiante y su proyecto.

## ESTADO DEL ARTE

La optimización en los procesos de fragmentación y el desplazamiento de material, productos de la voladura es el objetivo de las operaciones productivas, rentables y con bajo costo de operación, donde la voladura de rocas representa una de las operaciones unitarias de mayor relevancia, donde se debe entender la interacción entre macizo rocoso y los valores de energía aplicados en la voladura. (León & Erwin, 2011)

Las reacciones termodinámicas de la descomposición de los explosivos (detonación) sobre la roca y la geometría de la voladura a realizar, se evalúan mediante la energía explosiva que es la característica más importante de una mezcla explosiva, que se encuentra almacenada como energía química que durante la detonación es liberada en la roca circundante en dos formas diferentes: energía de tensión (es un indicador de la capacidad del explosivo para producir la fragmentación deseada en la roca) y la energía de burbuja (formación de gases, causa principal del desplazamiento de la masa rocosa), donde la energía explosiva puede ser medida o calculada para determinar su rendimiento termoquímico de mezcla explosiva. (León & Erwin, 2011)

Se establece que entre un 15 % a 35 % de la energía total generada durante la voladura es trabajo útil en los mecanismos de fragmentación y el desplazamiento de la roca, en donde entre el 5% y el 53% de la energía del explosivo va asociada a la onda de choque, según los distintos tipos de roca que se desea fragmentar y la clase de explosivo a usar. Existe una relación entre el tamaño medio del fragmento y la de energía aplicada a la voladura por unidad de volumen de la roca (carga específica) en función al tipo de roca. (Kuznetsov, 1973)

La energía química de un explosivo se libera como calor, el cual se produce un proceso adiabático (este fluido realiza un trabajo que impide la transferencia de calor con el entorno, se usa el incremento de la energía interna para la expansión o compresión); adecuadamente iniciado, se transforma a través de la detonación en productos gaseosos a altas presiones y temperaturas, físicamente el proceso corresponde a un choque dinámico en el medio circundante, relacionado con la reacción termodinámica de descomposición del explosivo y cuya acción en el entorno, es la transmisión de una onda de choque «shock wave» generada por la detonación de una carga explosiva que inicialmente es fuerte, luego se convierte en ondas de esfuerzo «stress waves» en la

roca circundante, que a medida que la onda se mueve radialmente hacia fuera del taladro la presión disminuye y la onda llega a ser compresiva «compressive wave» y elástica «elastic wave», es así como se genera las ondas de esfuerzo en la roca, lo anterior aplicado a los valores de energía en la voladura nos permite distribuir la energía que simplifica el proceso de la voladura donde aporta una valiosa percepción de a dónde va la energía durante las diversas fases del proceso, cuando los gases de explosión se expanden desde la presión inicial en el barreno hasta la presión atmosférica, no toda la energía disponible es útil en la fragmentación, proyección y desplazamiento del material puesto que es posible mejorar la eficiencia del proceso, utilizando combinaciones de explosivo o explosivos ideales diseñados para minimizar las pérdidas de energía y así conseguir resultados óptimos en la fragmentación, el esponjamiento y desplazamiento del material a una determinada distancia, en donde los gases cumplen un papel decisivo. (León & Erwin, 2011)

Es de destacar que las investigaciones desarrolladas en el campo de explosivos están enfocadas de manera particular en el sector militar y el sector minero, siendo el explosivo usado en el sector minero o explosivos de uso civil, objeto de estudio del presente método y en donde en concreto las empresas mineras y productoras de explosivo centran las investigaciones en los procesos de optimización de la voladura con el fin de reducir los costos de operación, producción y el control de vibraciones, desde esta perspectiva en este método se trataran otras características y propiedades fundamentales del explosivo que pueden ser aprovechadas e implementadas para el despeje de depósitos viales generados por deslizamiento, como son la generación de gases y el efecto burbuja, aprovechando estas características se genera efectos de fragmentación y desplazamiento.

Se destaca que pese a las potencialidades que brinda esta técnica no ha sido implementada de manera regular en procesos de despeje vial, pese a su eficacia e impacto positivo, no se implementa en especial por las limitaciones del personal técnico y profesional requerido para el desarrollo de una voladura técnica y sin impactos colaterales, desde este panorama el desarrollo de este método brinda una oportunidad pionera en el país, para la implementación de una solución técnica, rápida, viable y económica para dar solución a los problemas de obstrucción en vías, generando a las entidades de planeación y demás entidades asociadas a la administración y mantenimiento de la red vial una herramienta útil con otra perspectiva de solución, desde esta premisa a nivel nacional e internacional en los últimos 25 años, se destacan los siguientes estudios:

- **Aplicación de cámaras de aire en tronadura de producción de una mina de hierro.** Trabajo de investigación del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción, La investigación busca establecer bases para demostrar la factibilidad de la utilización de cámaras de aire en voladuras para mejorar los resultados y disminuir las eyecciones, vibraciones y emanación de polvo. (Garrido, 2020)
- **Diseño de perforación y voladura para mejorar fragmentación del mineral en mina Virgen del Rosario - U.P. Hualanyog.** Trabajo de investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Busca establecer una manera de mitigar en estos casos se requieren que los caballos se rompan en fragmentos grandes para reducir la dilución, para la solución del problema se elige de manera no aleatoria los tajos y se ha modificado el uso del ANFO porque debido al gran volumen de gases genera muchos finos. (Avila & Gutarra, 2020)
- **Optimización del diseño de voladura primaria aplicando el uso de mezcla explosiva gasificada en el tajo Ferrobamba en la Unidad Minera las Bambas.** Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, la investigación tuvo la finalidad de demostrar los resultados de las pruebas de voladuras con una nueva alternativa en explosivo, una mezcla explosiva gasificada, y los beneficios que representa en optimización en los resultados de fragmentación, vibraciones, gases nitrosos y ahorro en Costos. El trabajo describe el desarrollo de las pruebas llevadas a cabo el año 2018. (Donaires et al., 2019)
- **Aplicación de modelos matemáticos de fragmentación para la reducción de costos, en perforación y voladura en el tajo Jesica, Mina Aruntani S.A.C.** Trabajo de investigación de la facultad de geología, geofísica y minas de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. La investigación analizó la aplicación de modelos matemáticos de fragmentación para la reducción de costos, en perforación y voladura, aplicados a la solución de problemas de minería, se desarrolló durante el año 2016 a 2017 analizando el tamaño de los fragmentos de la voladura y como afecta la remoción de material volado, a partir de un modelo semiempírico de predicción granulométrica de fragmentación de rocas por voladuras. (Chiclla et al., 2019)
- **Un nuevo enfoque predictivo de la fragmentación en la Voladura de Rocas.** Publicado en el año 2018 en la Revista Industrial Data, de la Facultad de Ingeniería Industrial, en la UNMSM Universidad Nacional Mayor de San Marcos, se hace una descripción de Fisne,

Hudaverdi y Kuzu (2012) donde se describe la fragmentación de la voladura, usando el tamaño medio de la fragmentación y el índice de la fragmentación, basándose en un análisis multivariante; los postulados de Huang, Shi, Wei, Wu y Zhou (2011) en donde se plantea un nuevo enfoque de análisis vectorial con el apoyo de máquinas, para predecir del tamaño medio de las partículas en la fragmentación rocas, en las voladuras superficiales; lo descrito por Hudaverdi, Kulatilake, Kuzu y Qiong (2010) quien proponen un nuevo enfoque para la predicción del tamaño medio de las partículas en la fragmentación en la voladura de rocas, usando redes neuronales. Aspectos fundamentales a analizar para poder predecir desplazamientos y proyecciones como resultado de una voladura. (Rojas, 2018)

- **Procedimiento técnico para la elaboración de voladuras en proyectos de infraestructura.** Proyecto de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Cooperativa de Colombia. El documento recoge procedimiento técnico y de seguridad aplicados en voladuras en proyectos viales, tales como voladuras en caisson, voladura de sobretamaños de excavación, voladura a cielo abierto y voladura de precorte en taludes, teniendo en cuenta la normatividad en seguridad industrial e higiene ocupacional vigente. (Montenegro, 2018)
- **Análisis de la fragmentación resultante de voladura para la evaluación de la expansión de las mallas de perforación aplicando sistema de iniciación electrónico en minera Coimolache.** Trabajo de investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Metalurgia de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. El estudio se enfocaría en el análisis para expandir mallas de perforación y mantener el mismo tamaño en la fragmentación, se desarrolla a partir del análisis de información histórica recolectada durante las voladuras, haciendo hincapié en los resultados de la fragmentación y se puntualizan las diferencias encontradas en voladuras con detonadores pirotécnicos y electrónicos. (Arenas & Dalmiro, 2018)
- **Implementación de parámetros de perforación y voladura en el nivel 70, frente 1 de la cantera planta Tolú Viejo de la empresa cementos ARGOS S.A.,** Trabajo de investigación del Programa de Ingeniería de Minas de la Fundación Universitaria del Área Andina. El estudio consiste en realizar pruebas de voladura en donde se buscará, por medio de la implementación de nuevos parámetros de perforación y voladura, una reducción en la cantidad de granos finos generados en las mismas, y un aumento gradual en la granulometría obtenida. (Nacira, 2018)

- **Evaluación técnico - económica con el uso de emulsión gasificada en voladura Mina Cuajone.** Trabajo de investigación de la facultad de geología, geofísica y minas de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. La investigación tiene la finalidad de demostrar los resultados de las voladuras con una nueva tecnología en explosivo, una mezcla explosiva gasificable, y los beneficios que representa, el trabajo describe el desarrollo de las pruebas las cuales se llevaron a cabo en el año 2014 donde se obtiene una reducción de la fragmentación de 7.1 %. (Llallacachi & Magno, 2017)
- **Diseño del sistema de perforación y voladura en los bancos d, e y f en la mina de caliza El Tesoro, contrato de concesión ILI-16111 ubicada en la vereda Las Caleras del municipio de Nobsa - Boyacá.** Publicado en el año 2017, Trabajo de investigación de la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad Pedagógica Tecnológica de Colombia. El proyecto establece las características técnicas que definen los criterios y parámetros en voladura, por lo cual se tienen en cuenta; aspectos geológicos, estructurales, diseño de la explotación, propiedades físicas y mecánicas de los bancos, donde se contempla una malla que garantice una fragmentación adecuada, proyección de rocas y vibraciones dentro de los estándares que marcan las normas, teniendo en cuenta la cercanía de la cantera a las zonas residenciales aledañas al proyecto. (Correa et al., 2017)
- **Voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho – Minera Chinalco Perú S.A.** Trabajo de investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Centro del Perú. La investigación tuvo como objetivo determinar cómo la afecta la voladura el uso de detonadores electrónicos en comparación a los pirotécnicos y a su vez como se optimiza la fragmentación, con rocas de dureza 2, 3 y 4. (Romero, 2016)
- **Control de fragmentación, proyección y apilamiento de roca en voladuras de canteras en la cantera Cerro Negro.** Trabajo de investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional de Piura. Aborda los problemas tres problemas principales encontrados en la voladura de roca: La diferencia en la granulometría; La altura de apilamiento de material tiene que ser adecuado, para que los equipos de carguío no se expongan al desprendimiento del material; la proyección de roca producto de las voladuras, tiene que ser controlada para evitar daños a una planta ubicada a 150 metros. (Berru & Roberth, 2015)

- **Optimización de la voladura mediante el uso de detonadores de microrretardo en explotaciones mineras subterráneas en consorcio minero Horizonte S.A.** Trabajo de investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Centro del Perú. La investigación tiene como objeto exponer la factibilidad de reducir costos y optimizar la voladura, aplicando para ello de detonadores electrónicos de microrretardo y aumentar los procesos de estabilidad del macizo rocoso. (Edmer et al., 2015)
- **Optimización de la fragmentación de rocas empleando el sistema electrónico y métodos de predicción en lagunas norte - Minera Barrick Misquichilca.** Proyecto de investigación de la escuela profesional de ingeniería de minas de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Resume las teorías de la ingeniería de explosivos, propiedades de los explosivos usados en minería y la tecnología de los accesorios electrónicos usados para el control de la voladura a fin de ser implementadas estas características en modelo de predicción de fragmentación de la roca antes de la voladura, así como los aspectos ambientales, de seguridad e higiene minera. (Rojas, 2013)
- **Análisis y diseño de la operación de perforación y voladuras en minería de superficie empleando el enfoque de la programación estructurada.** Publicado en el año 2012, en el Boletín Ciencias de la Tierra, Nro. 32 de la Universidad Nacional de Colombia, el cual busca crear una interfaz, por medio de la cual se ingresan la densidad del explosivo, diámetro e inclinación de la perforación, resistencia a la compresión de la roca y dimensiones del banco. Luego se obtiene el valor de las variables más importantes que condicionan el diseño de la operación de perforación y voladuras, esto con el propósito de mostrar un algoritmo que al emplearlo permite realizar los cálculos de los parámetros fundamentales en el diseño de perforación y voladura. (Diaz & Guarín, 2012)
- **Optimización de la fragmentación aplicando valores de energía en voladura al tajo vidal, Nivel 4190 Cantera De Caliza Cerro Palo Cemento Andino S. A.** Trabajo de investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Centro del Perú. La investigación busca el entender la interacción entre macizo rocoso y los valores de energía aplicadas en la voladura, aplicando las propiedades físico mecánicas de la roca, conociendo las mezclas explosivas, la reacción termodinámica de la descomposición de los explosivos (detonación) sobre la roca y la geometría de la voladura a realizarla, ya que se evalúa mediante la energía explosiva que es la característica más importante de una mezcla explosiva que se encuentra almacenada como energía química que durante la detonación

se libera en la roca circundante en dos formas diferentes: energía de tensión (es un indicador de la capacidad del explosivo para producir la fragmentación deseada en la roca) y la energía de burbuja (formación de gases, causa principal del desplazamiento de la masa rocosa). (Carchuancho, 2011)

- **Influencia de la fragmentación por perforación y voladura en el Throughput de chancadora.** Trabajo de investigación de Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería, la investigación busca mejorar la fragmentación con el cambio de parámetros de perforación y voladura, basándose en pruebas llegando a parámetros óptimos de búrden y espaciamiento, así como la reducción de tiempos de carga. (Mejía, 2009)
- **Manual técnico para el uso de explosivos utilizados en voladuras a cielo abierto en vías terrestres.** Trabajo de investigación del Centro de Estudios de Posgrado de la Universidad Técnica de Ambato. Se analiza los explosivos, las dinamitas, las emulsiones y anfos, sus características físicas, una comparación de los agentes de voladuras, proceso de perforación, diseño de las mallas, las características del macizo rocoso, y resultados de la voladura en fragmentación, ruido, proyecciones y vibraciones. Un estudio de las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, con la selección de rocas para voladuras, la geología y sus efectos en la voladura. (Romero, 2009)
- **Efecto de las vibraciones generadas por voladuras en minas sobre edificaciones residenciales de mampostería simple en Colombia.** Publicado en el año 2017 en la Revista de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Se analizan los explosivos usados en minería y la generación de ondas y vibraciones, así como los posibles efectos en las edificaciones cercanas a la zona de detonación y se comparan con los límites de vibración aceptados internacionalmente para evitar daños en edificaciones. (Ruiz et al., 2007)
- **Uso de explosivos en demoliciones para voladuras controladas.** Publicado en el año 2003, en la revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina de la Universidad Militar Nueva Granada. Busca establecer un adecuado balance en el consumo de explosivo, requerido en la voladura utilizando varios métodos para reducir el exceso de rompimiento, reduciendo al mínimo los esfuerzos y la fractura de la roca. (Carrillo, 2003)

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los deslizamientos de rocas en corredores viales en el territorio colombiano, afectan de manera considerable las actividades económicas, sociales, culturales, la infraestructura, la movilidad y en donde de múltiples formas la población que en un 80 % se concentra en la zona andina, en la que encontramos rocas y materiales litológicos de tipo sedimentario, ígneo y metamórfico con depósitos no consolidados y grandes efectos tectónicos, a causa de la tectónica activa, generando fallas geológicas activas e inactivas que producen una degradación mecánica de los materiales generando movimientos en masa entre los cuales se destacan los deslizamientos de roca.

Los deslizamientos y caídas originan grandes volúmenes de material como rocas, en los corredores viales, los que se depositan en la banca vial causando la obstrucción parcial o total de esta, por tiempos prolongados, causando grandes pérdidas y efectos económicos a la economía local, regional y/o nacional, por la interrupción del suministro de bienes y servicios básicos como los alimenticios, energéticos, industriales y sociales, al limitar el transporte y comunicación entre ciudades, obliga a sus pobladores a tomar rutas alternas de larga duración y/o mal estado, incrementando el riesgo de accidentes, el caso más crítico es para el traslado de enfermos. En Colombia los casos más relevantes de las últimas décadas están relacionados con la vía al llano, la que comunica la ciudad de Bogotá con la ciudad de Villavicencio.

En los últimos treinta años, los eventos invernales han afectado a gran escala las vías colombianas. Durante este período los cierres de vías por derrumbes han sido tema recurrente. Sáenz (2009), presenta un diagnóstico del estado de la infraestructura vial del país, en este se identifica dos causas principales a los problemas viales, uno asociado a la escasa y precaria tecnología implementada en el mantenimiento de carreteras las que no cuentan con sistemas de información que permita conocer la vulnerabilidad específica de las vías, y el problema principal la falta de planeación en el diseño y proyección vial; en donde las principales rutas actuales se construyeron a partir de caminos improvisados y posteriormente ampliadas con estudios técnicos superficiales. Por su parte, Flórez (2010), afirma que Colombia presenta un rezago de 40 años en materia de infraestructura vial.

El Container (2011), señala que, entre las vías nacionales, primarias, secundarias y terciarias, el país acumuló entre enero y septiembre de ese año 28.574 días de cierres, es decir, un equivalente en

tiempo a 78 años, considerando los cierres totales y parciales acumulados, según INVIAS (2021) para el año 2020 entre enero y septiembre se realizó cierre en 145 corredores viales del país generando casi 20.000 días de cierre, es decir, un equivalente en tiempo a 54 años.

En general, la inestabilidad de los taludes de las carreteras es un problema permanente que se intensifica en periodos invernales. Hoy en día más fuertes y con mayores consecuencias nocivas para la economía y la sociedad. Dentro de este panorama se exigen mejores métodos para la mitigación temprana de impactos por deslizamiento y caída de rocas en corredores viales, en donde se exige procesos de intervención con explosivos, los que, permiten la remoción rápida de materiales, generando fragmentos de roca manejables o el desplazamiento de estos a fin de generar el despeje del corredor vial.

Dado que la remoción de grandes volúmenes de rocas o en casos de un solo bloque de gran tamaño, se dificulta por métodos convencionales como el uso de maquinaria amarilla retroexcavadora y buldócer, los que no cuentan con la potencia para remover estos volúmenes de roca, sumado al riesgo de verter este material pendiente abajo afectando cauces, terrenos agrícolas, viviendas, etc.

Las técnicas de voladura se utilizan de forma efectiva, en algunos casos para mitigar estos efectos, sin embargo, su uso se ha caracterizado por la carencia de información de los procesos técnicos y de modelos para la su evaluación, por lo que desde el desconocimiento se podrían causar efectos secundarios y daños por la pronta solución del problema.

Esta investigación busca el establecimiento de métodos de mitigación temprana por depósitos de roca en corredores viales, integrando las características del terreno inestable y el depósito de material deslizado, utilizando técnicas de voladura, estableciendo el uso técnico, adecuado, temprano y eficaz del explosivo, desde donde se propondrá un protocolo que puede ser usado por las entidades responsables de la atención de este tipo de emergencias y el proceso de mitigación.

Como zona de evaluación, se realizará un análisis de eventos pasados y de ocurrencia actual en corredores viales que permitan la investigación con el apoyo de entidades como INVIAS y otros operadores de consorcios viales. La vía Bogotá - Villavicencio, por sus antecedentes, cercanía, marco geológico y geotécnico, es un área de interés para la el desarrollo de la investigación.

## **PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

1. ¿Cuáles son las condiciones geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, hidrológicas que pueden propiciar grandes deslizamientos de rocas en corredores viales?
2. ¿Cuáles son los impactos económicos, sociales y/o ambientales generados por la obstrucción prolongada de vías por deslizamientos de rocas?
3. ¿Cuáles son los métodos de mitigación para la remoción temprana de depósitos de deslizamientos en corredores viales?
4. ¿Cuáles son las técnicas y métodos para el uso de voladura con explosivos en la remoción de depósitos de deslizamientos de roca y taludes inestables en corredores viales?
5. ¿Cuáles son las directrices o protocolos existentes para el uso adecuado de explosivos en la intervención de corredores viales?

# JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de un método para la mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura, el cual contribuya al mantenimiento de la movilidad vial dando una respuesta rápida, oportuna, técnicamente viable y económica, ante la manifestación de un evento tiene amplias áreas de justificación, donde se destaca las de nivel económico, dada la ubicación del territorio colombiano el mantener el flujo vial es estratégico en los procesos de comunicación, transporte de mercancías y el comercio con la región sudamericana, en la economía nacional, es fundamental en los procesos regionales y locales en el transporte de insumos mercancías, productos agrícolas, el turismo, acceso a los centros de producción o empleo, a fin de evitar el aumento de los fletes por transporte; a nivel físico dada la combinación de factores geológicos, climáticos y el relieve que presenta el territorio nacional hace que al interior se presenten zonas con corredores viales con condiciones de alta inestabilidad en los taludes viales, que hacen pertinente una intervención oportuna; a nivel sociocultural dado que se debe mantener y garantizar las redes de comunicación entre los diferentes centros poblados, puesto que por estas se movilizan las personas para tener acceso a la atención médica y otros servicios económicos sociales, culturales o de entretenimiento; a nivel de la administración y el control territorial dado que de los procesos de movilidad vial se desprenden las perspectivas que orientan las evaluaciones del destino de la inversión pública y desde esta se definen los proyectos integrales en torno al modelo económico y social, en armonía con el medio ambiente y el patrimonio cultural, que se traducen en el desarrollo de políticas públicas de corto, mediano y largo plazo; por otra parte, desde una perspectiva técnica asociada al explosivo, el aprovechar la experiencia por el uso dado tradicionalmente a este en labores de minería, en donde se aprovecha su capacidad energética y la generación de gases para el fracturamiento de la roca y el desplazamiento de grandes volúmenes de material.

El territorio colombiano posee una ubicación estratégica y se considera como la entrada a Suramérica y con el paso del tiempo se ha convertido en paso obligado para aquellas embarcaciones que necesitan llegar a las naciones que se encuentran ubicadas al Este y Oeste del país. Sin embargo, el Departamento Nacional de Planeación (DPN) expresa que como resultado de sus informes presentados desde el año 2012, el estado colombiano presenta una de las geografías más

fragmentadas y con mayores distancias entre los centros de producción y de consumo, así como las mayores dificultades para la movilidad. (*LegisComex. Sistema de Inteligencia Comercial.*, 2021)

La Cámara Colombiana de Infraestructura (CCI) señala que en los últimos años se ha duplicado la inversión en el sector al pasar de un 1,2 % en el 2012 a un 2 % en el 2013, de esta forma, ubica al país en el tercer puesto de naciones con mayor inversión en Latinoamérica, sin embargo, pese a estos resultados y a los grandes cambios en infraestructura, esta inversión aún es deficiente y ubica a Colombia con una de las calificaciones más bajas, comparando sus estructuras viales con las de países como Zambia, Bolivia, Zimbabue y Camerún. Por otra parte, la CCI manifestó que, a pesar de las inversiones, aún existen sobrecostos en el transporte, así como impactos económicos obtenidos por el rezago de la infraestructura. Ejemplo de esto son los USD 1,3 millones que se pagan por demoras en el Puerto de Buenaventura, así como USD 250 por cada viaje en carretera, como consecuencia de los desvíos a causa de los deslizamientos y la baja calidad de las vías. (*LegisComex. Sistema de Inteligencia Comercial.*, 2021)

El 71 % de la carga transportada al interior del país se moviliza por carreteras, el 28 % en vías férreas, el 1 % a través de los ríos y menos del 0,5 % en avión, según el estudio «Indicadores del sector transporté en Colombia» al 18 de diciembre del 2013 realizado por la Fundación para la Educación Superior y el Desarrollo (FEDESARROLLO). De igual forma, estos indicadores explican que Colombia presenta un rezago considerable en la inversión en infraestructura de transporte y que requiere de grandes cambios para mejorar la productividad y competitividad de sus sectores productivos. Los requerimientos de inversión para el movimiento de carga son las obligaciones más grandes que hay en el país y abarcan tanto el mantenimiento y rehabilitación de las vías en mal estado, como un mejoramiento de la red vial. (*LegisComex. Sistema de Inteligencia Comercial.*, 2021)

En Colombia existen 142.000 kilómetros de vías terciarias, de las cuales solo el 6 % está en buen estado. Estas vías unen a los municipios con las veredas y reflejan el abandono de las zonas rurales del país. Así se resalta en el debate de control político que se realizó en la Comisión Sexta y en el que se trató el tema de inversión en la red terciaria del país. En donde el Instituto Nacional de Vías – INVIAS, señala que el 94 % de las vías terciarias del país se encuentran en mal estado, afirmando que, de los 142.000 kilómetros de vías terciarias, solo el 6 % está en condiciones para la movilidad. (Henríquez, 2019)

El sector transporté, es de los gremios que registra las mayores pérdidas directas al patrimonio de la nación, en el caso de los Megaproyectos de infraestructura y servicios, como los puertos, aeropuertos y represas, estos han sido diseñados bajo estándares de control de riesgo más exigentes y cuentan con planes de contingencia, pero en relación con el subsector vial, ocurre todo lo contrario, se presenta de forma frecuente afectaciones como resultado de eventos desastrosos, siendo la red vial nacional la que sufre de manera recurrente el impacto de los eventos desastrosos y no cuenta con acciones adecuadas de formulación y revisión antes del suceso. (Banco Mundial, 2012)

Según la base de datos de DesInventar, en los últimos 40 años se han afectado aproximadamente 75 mil kilómetros de vías, cifra que además se considera conservadora, dado que los daños frecuentemente no son reportados por los Comités Locales y Regionales y no se ingresan en el sistema. La cuarta parte de los registros (7.748) presenta afectaciones de diverso tipo sobre las vías, los cuales se relacionan con fenómenos como deslizamientos (52 %), inundaciones (30 %), y lluvias, vendavales y avenidas torrenciales (13 %), donde la mayor cantidad de emergencias están concentradas en la zona Andina. Durante el fenómeno de La Niña 2010 - 2011 se impactaron 92 puentes y más de 1.690 kilómetros de la red primaria, equivalentes al 9,7 % de esta red; 2.453 kilómetros de la red secundaria (7 %) y 27.492 kilómetros de la red terciaria (20,3 %), demandando la atención de más de 600 emergencias viales en más de 290 tramos de la infraestructura vial nacional. (Banco Mundial, 2012)

Se considera acorde a la magnitud de los daños en vías y el hecho de que este tipo de infraestructura es principalmente de propiedad del Estado, se puede concluir que es el sector que más pérdidas directas genera al patrimonio de la nación como resultado de la manifestación de eventos naturales peligrosos, la red vial cuenta con una longitud aproximada de 166.233 kilómetros, de los cuales 74.746 kilómetros pertenecen a la red terciaria a cargo de los municipios, INVÍAS y privados (Banco Mundial, 2004); 66.082 kilómetros son de la red secundaria a cargo de los departamentos, y 16.786 kilómetros son de la red primaria a cargo de INVÍAS y la Agencia Nacional de Infraestructura. (Banco Mundial, 2012).

El INVÍAS, destina recursos de la cuenta «Construcción obras de emergencia para la red vial nacional», invierte en promedio \$50 mil millones anuales, aunque en los períodos de mayor intensidad de las precipitaciones, las inversiones se incrementan considerablemente, como ocurrió en el año 2009, cuando sobrepasó los \$120 mil millones. (*Infraestructura para la Prosperidad 2010 - 2014*, 2011) En tanto, la Agencia Nacional de Infraestructura, no dispone de recursos presupuestales para atender las emergencias que se presentan en las concesiones viales de primera y segunda generación. Además de los impactos directos al patrimonio de la nación, la afectación vial produce daños indirectos asociados a la suspensión del servicio, agravando las limitaciones en la calidad del transporte terrestre, y por ende el crecimiento económico y el desarrollo del país. (Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia, 2012).

Para el año 2010 el 50 % de las vías, lo que corresponde a 83 mil kilómetros, se encontraba en malas condiciones, y tan solo el 15 %, es decir 25 mil kilómetros del total de vías, estaba pavimentada (Santos, 2010), por otra parte, siendo esta situación, por sí misma compleja se agrava de manera permanente por el impacto de los desastres en las vías. En el caso del fenómeno de La Niña de los años 2010 - 2011, los deslizamientos obligaron a realizar cierre en los tramos Honda - Villeta, Bucaramanga - Barrancabermeja y Manizales - Mariquita, lo que generó trastornos en el transporte de mercancías entre los centros de producción del interior del país con los puertos. (Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia, 2019)

El Estudio de vulnerabilidad económica de la vía Bogotá-Villavicencio de la Pontificia Universidad Javeriana del año 2004, concluyó que durante el período 2000 – 2004, la vía estuvo interrumpida en promedio 7,01 días por año, ocasionando pérdidas por \$ 16 mil millones para el año 2004 (Pontificia Universidad Javeriana, 2004); además el cierre de esta vía durante el año 2019 por 6 meses que duró el manejo de evento, generó un cierre indefinido dejó más de \$ 2,5 billones en pérdidas solo para el departamento del Meta en los primeros 93 días. («Desde junio, se perdieron \$2,5 billones por el cierre en la vía al Llano», 2019)

Por otra parte, según la Asociación de Transportadoras de Carga (ATC) el bloqueo por deslizamientos de la vía Cisneros-Buenaventura, en marzo del 2011, produjo afectaciones estimadas en \$16 mil millones, que equivalen a \$ 2 mil millones diarios. El gremio de transporte de carga estima que el impacto económico por el fenómeno de La Niña 2010 - 2011 asciende a \$ 344 mil millones,

representados en lucro cesante, prestaciones y salarios, así como las industrias relacionadas (hospedajes, talleres mecánicos, montallantas y estaciones de servicio), lo que corresponden al 30 % de la afectación (ATC - Asociación de Transportadores de Carga, 2011) Otros efectos indirectos incluyen la afectación del transporte de pasajeros y la posibilidad de sacar oportunamente la producción agropecuaria perecedera con impactos importantes, pero no medidos ni cuantificados. (Banco Mundial, 2012)

De acuerdo con Cardona (2004), el nivel de recurrencia de los eventos con consecuencias graves en Colombia, ubica al país como uno de los menos seguros en América Latina (con aproximadamente 600 eventos al año). Cardona señala que el impacto por este tipo de eventos y las pérdidas económicas han oscilado entre el 0,18 % y el 1,84 % del PIB nacional del año en que ocurrieron. Eventos de menor magnitud y mayor recurrencia, han generado daños equivalentes a US\$ 2.227 millones y han dejado más de 9 mil muertos, 14,8 millones de personas afectadas, 89 mil viviendas destruidas y 185 mil averiadas, y cerca de 3 millones de hectáreas de cultivos deterioradas, con un costo estimado de 2,66 % del PIB del año 2000, cifra superior al déficit fiscal colombiano para el año 2005. (Rodríguez, 2007)

Desde este panorama la presente investigación surge de la evaluación de los antecedentes y diagnósticos viales colombianos, donde los requerimientos viales del país hacen no solo que se requieran grandes inversiones a corto, mediano y largo plazo, al mismo tiempo que se requieren soluciones en aspectos de mantenimiento y la atención de las emergencias que se puedan presentar en la infraestructura vial, siendo este último el objeto principal de esta investigación, cuyo resultado busca una alternativa para garantizar los procesos de movilidad. (Yepes et al., 2013)

# OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

- El objetivo general de esta investigación es la evaluación de métodos para la mitigación temprana de impactos por depósitos de deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las variables controlables y no controlables bajo las cuales se generan los movimientos de roca en los taludes, a fin de relacionarla con las variables controlables y no controlables de los explosivos, para su aplicación en el proceso de evacuación del depósito.
- Determinar los impactos por movimientos de rocas en corredores viales.
- Valorar los diferentes métodos para la mitigación por depósitos de deslizamientos de rocas en corredores viales.
- Valorar las diferentes técnicas de voladura para la remoción de zonas inestables y/o depósitos de deslizamientos de roca en corredores viales.
- Proponer un protocolo para la remoción temprana de depósitos por movimiento de rocas en zonas viales mediante técnicas de voladura.

# METODOLOGÍA

A continuación, se describe de manera general la metodología para el desarrollo del proyecto, desde la cual se establecen los conceptos básicos y particulares, de las variables involucradas y necesarias para la intervención de un área afectada por deslizamientos de rocas, se desarrolla un modelo conceptual de voladura, de tipo predictivo el cual definirá los procesos correctivos (tipo de explosivo, carga y tiempo de retardo) estableciendo los parámetros de aplicación del método para la mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura.

El desarrollo del método, mediante técnicas de voladura busca aplicación en áreas individuales o en conjunto, con características aproximadamente homogéneas, en términos del comportamiento (resistencia a la compresión simple) de los materiales depositados (deslizamiento de rocas), a fin de desarrollar una voladura, estimando los parámetros para la misma a partir de las características de los materiales y las variables controlables del explosivo, a fin de generar la fragmentación y el desplazamiento de la masa deslizada.

De acuerdo al análisis de las características de los materiales y las variables del explosivo que intervendrán en el método de voladura, se agrupan en variables de las que dependerá el proceso de evaluación y el desarrollo de la misma.

La metodología hace énfasis en la evaluación y análisis de los componentes geológicos, edafología y la vegetación, para definir zonas que presenten materiales con comportamientos geomecánicos similares y que se pueden agrupar en zonas homogéneas para el desarrollo de la deflagración del explosivo.

De acuerdo con lo anterior y de manera general, la información temática requerida para el desarrollo del método, se divide en:

- **Evaluación de variables controlables y no controlables:** de los materiales rocosos deslizados o inestables a remover, Perfiles y propiedades, índice de los materiales geológicos, propiedades hidráulicas, propiedades de los suelos y rocas, deformación y

resistencia de suelos y rocas. Esta evaluación se efectúa para datos espaciales, y del comportamiento del explosivo, lo cual implica el uso de herramientas de geoestadística en su evaluación. Variables geológicas y geomorfológicas: Incluye unidades geológicas superficiales, densidad estructural, estructuras geológicas, unidades geomorfológicas, procesos geomorfológicos. En esta evaluación, la geología y geomorfología se aplica a evaluaciones propias de la ingeniería.

- **Variable del explosivo:** incluye las características físico-químicas dentro de un manejo temático de su comportamiento en términos de la física y la ingeniería, la información de sus propiedades direcciona las cantidades y cálculo del desarrollo de energía necesaria para el desplazamiento de la masa deslizada.
- **Variable hidrológica e hidrogeológica:** incluye la caracterización de ciertas variables climáticas que tienen influencia directamente en los cambios ocurridos en los materiales deslizados y al uso de explosivos resistentes al agua y su correlación está dada hacia el comportamiento físico y mecánico de los materiales y de las evaluaciones propias de la ingeniería.
- **Variable Antrópica:** incluye la caracterización del entorno, la cercanía de infraestructura urbana o centros poblados.

Se evaluarán las diferentes variables del material, entorno y explosivo, con el fin de analizar el comportamiento de los explosivos, a través de la correlación de diversas variables que permitan el desplazamiento, remoción y evacuación de los bloques producto de deslizamientos de roca en los sistemas viales afectados, mediante el desarrollo de una detonación controlada.

Se realizó un proceso de verificación y validación del método a partir de datos recolectados en el desarrollo de 80 casos de voladura, en los departamentos de Tolima, Caquetá, Meta y Antioquia; voladuras que se desarrollaron con el apoyo del Batallón de Infantería N.18 de la Sexta (6.ª) Brigada del Ejército Nacional de Colombia y el Grupo Marte de la Quinta División del Ejército Nacional de Colombia, Batallón de Infantería N.18 de la Cuarta (4.ª) Brigada del Ejército Nacional de Colombia y el Grupo Marte de la Quinta División del Ejército Nacional de Colombia, la empresa Voladura Demolición y Perforación 3JY de la ciudad de Medellín – Antioquia.

Finalmente, se realiza un análisis de los distintos escenarios de voladura y fragmentación de bloques de rocas, como de los datos recolectados, los que sirvieron como insumo para el desarrollo y elaboración del protocolo propuesto.

A continuación, se presentan diagramas relacionados con los procesos metodológicos y aspectos generales para el desarrollo del proyecto, así como los objetivos y actividades anexas a cada uno de estos.

El Diagrama 1. Metodología general implementada en el desarrollo del proyecto, nos muestra las tres etapas que se desarrollaron en la investigación, la Etapa I, muestra el proceso inicial referente al rastreo inicial y revisión de la información, la Etapa II, hace referente al proceso de revisión y análisis de información y la Etapa III muestra el proceso asociado a la elaboración y desarrollo del protocolo, se destaca que este diagrama solo muestra los procesos y actividades generales, que hicieron parte de las etapas para el culmino del presente proyecto de investigación.

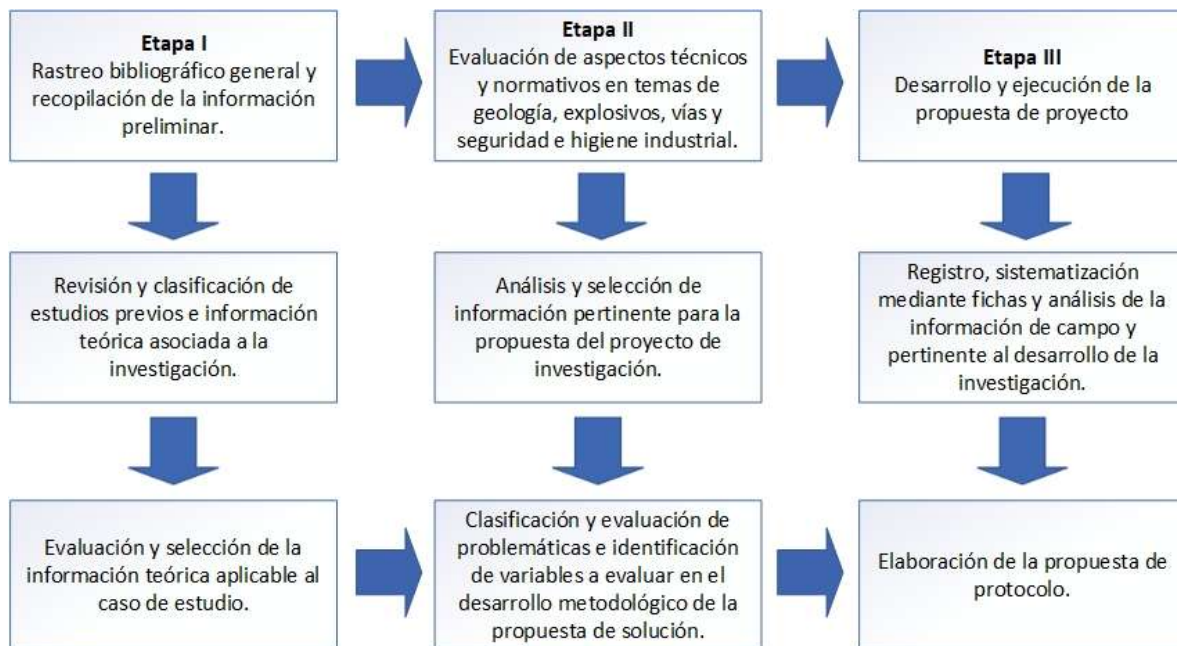


Diagrama 1. Metodología general implementada en el desarrollo del proyecto.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

El Diagrama 2. Metodología general y actividades para el desarrollo del primer objetivo del proyecto, muestra el objetivo a desarrollar, así como cada una de las actividades necesarias y realizadas, así como los aspectos evaluados en cada una de las actividades que hicieron parte en el desarrollo y

ejecución del primer objetivo del proyecto, de este objetivo se resalta que su desarrollo llevo a una evaluación y análisis de las variables físicas involucradas en el proyecto de investigación, permitiendo una correlación e integración adecuada en las relaciones y análisis establecidos.

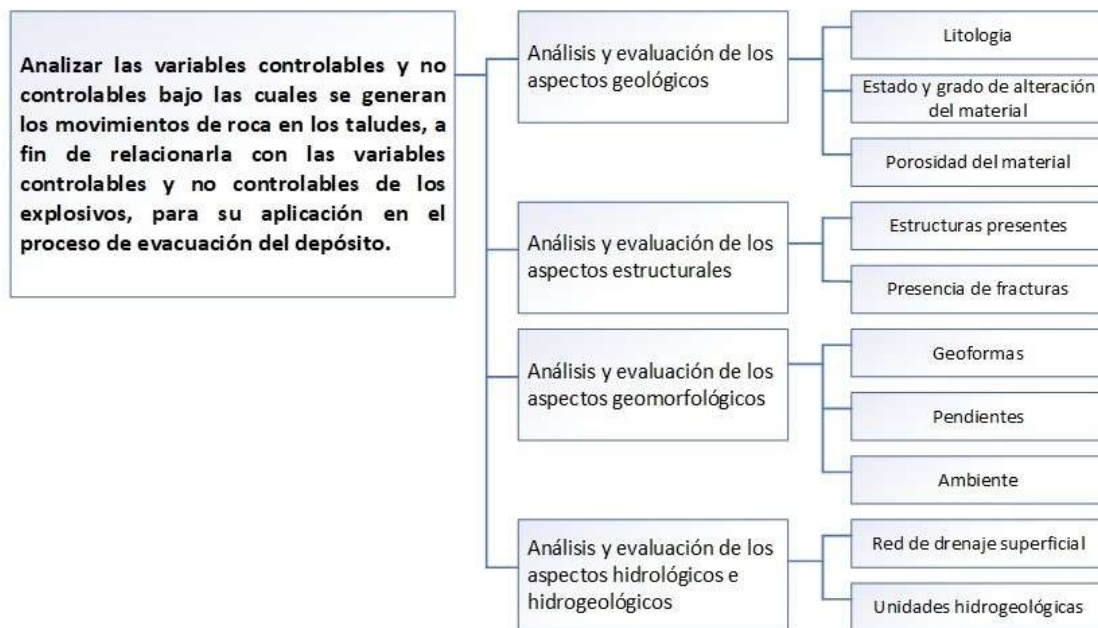


Diagrama 2. Metodología general y actividades para el desarrollo del primer objetivo del proyecto.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

El Diagrama 3. Metodología general y actividades para el desarrollo del segundo objetivo del proyecto, muestra el objetivo, así como cada una de las actividades necesarias y realizadas, así como los aspectos evaluados en cada una de las actividades que hicieron parte del desarrollo y ejecución del segundo objetivo del proyecto.

El Análisis y evaluación de los aspectos geológicos, incluye variables como: la Litología, el Estado y grado de alteración del material y la Porosidad del material, estas variables deben ser analizadas a cada bloque de roca, dado que determinan la cantidad de explosivo a usar en la fragmentación del mismo, puesto que al afectar de manera distinta la cohesión, la textura, determinan la capacidad de la roca para soportar esfuerzos.

- El Análisis y evaluación de los aspectos estructurales, incluye variables como: Estructuras presentes, Presencia de fracturas, las cuales favorecen, el rápido escape de los gases, provocando la reducción de la capacidad fragmentadora del explosivo.

- El Análisis y evaluación de los aspectos geomorfológicos, incluye variables como: Geoformas, Pendientes, Ambiente, es fundamental a fin de determinar algún grado de susceptibilidad al comportamiento de la onda generada durante la detonación y su potencial capacidad para generar procesos de inestabilidad en áreas cercanas a la zona de voladura.
- El Análisis y evaluación de los aspectos hidrológicos e hidrogeológicos, incluye variables como: Red de drenaje superficial, Unidades hidrogeológicas, presentes en la zona donde se desprende el bloque de roca, afectan de manera directa el comportamiento mecánico de la roca y su estabilidad. El agua es uno de los factores más poderosos en los procesos de meteorización, pérdida de resistencia y generación de zonas de potencial escape de gases y reducción del potencial fragmentador del explosivo.

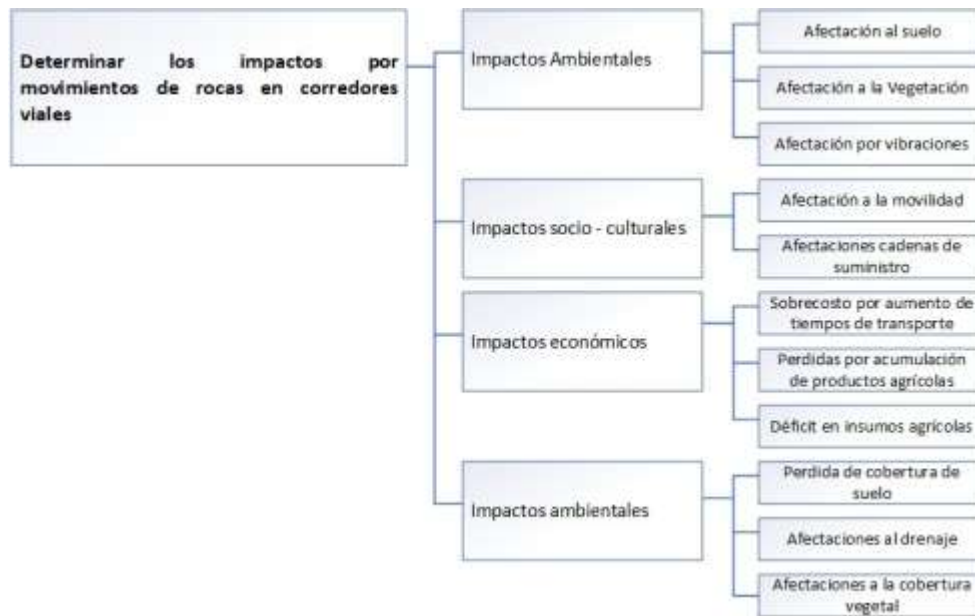


Diagrama 3. Metodología general y actividades para el desarrollo del segundo objetivo del proyecto.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

El Diagrama 4. Metodología general y actividades para el desarrollo del tercer objetivo del proyecto, muestra el objetivo, así como cada una de las actividades necesarias y realizadas, así como los aspectos evaluados en cada una de las actividades que hicieron parte del desarrollo y ejecución del tercer objetivo del proyecto.

Impactos Ambientales, incluye variables como: Afectación al suelo, Afectación a la Vegetación y Afectación por vibraciones

- El análisis de una potencial afectación al suelo, radica en los posibles efectos físicos generados como la compactación y densificación, producto de la onda de choque, la cual puede comprimir los poros del suelo, reduciendo la permeabilidad, dificultando el procesos de infiltración del agua, inducir a la generación de grietas y potenciales movimientos laterales o hundimientos; además de la generación de cráteres en el desarrollo de voladuras superficiales, donde si no se toman las debidas medidas el suelo puede ser expulsado, dejando el hueco en la zona de voladura y alterando el relieve.
- Afectación a la Vegetación, al desarrollar voladuras sin las debidas medidas de seguridad se podría incurrir en la destrucción mecánica de la vegetación, a causa de la onda expansiva, o fragmentos de roca y material expulsado los que pueden arrancar las plantas, cortar tallos y dañar raíces superficiales.
- Afectación por vibraciones, al no realizar el cálculo adecuado de cargas, se pueden producir onda sísmica, la cual podría producir fisuras en paredes, techos y cimentaciones, donde en casos severos, puede comprometer la estabilidad estructural de las edificaciones débiles o desajustar equipos sensibles y tuberías subterráneas, además la onda aérea de por la sobrepresión, causa un aumento rápido de presión atmosférica la cual puede romper vidrios, puertas y techos livianos, finalmente las proyecciones de material (fly rock), producto de la sobrepresión lanza rocas a gran velocidad las que pueden impactar edificaciones, maquinaria y redes de servicios.

Los Impactos socio – culturales, incluye variables como: Afectación a la movilidad y Afectaciones cadenas de suministro

- Afectación a la movilidad, con el uso de caras indebidas puede presentarse afectaciones a la movilidad de personas y mercancías, lo que altera el área tanto por daño físico en la infraestructura como por posteriores restricciones preventivas. Al ser desarrollada la voladura de fragmentación de forma adecuada permite dar paso por los corredores viales con bloqueo, se pueden dar cierres de vías preventivos por parte de las autoridades, por procedimientos de seguridad.

- Afectaciones cadenas de suministro, el desarrollo de cálculos no adecuados puede dependiendo de puede provocar la reducción de capacidad de la vía, disminución de la velocidad, desvíos del tráfico a rutas alternas, limitaciones al paso de vehículos pesados, incluso se pueden presentar efectos psicológicos y de seguridad al presentarse restricciones de movilidad por miedo, en donde las personas evitan áreas intervenidas con explosivos por temor a nuevas detonaciones.

Impactos económicos, incluye variables como: Sobrecosto por aumento de tiempos de transporte, Pérdidas por acumulación de productos agrícolas y Déficit en insumos agrícolas

- **Sobrecostos por aumento de tiempos de transporte:** a causa de los deslizamientos se interrumpen la circulación en los corredores viales primarios y secundarios, obligando al uso de rutas alternas, aumentando los tiempos de transporte al transitar por corredores más largos o en condiciones precarias, o incluso por detenimiento total del tránsito. Estas condiciones eleva los costos de operación al incurrir en mayor consumo de combustible, mantenimiento de vehículos, pagos adicionales de horas laborales y tarifas logísticas, sobre costos afectan al ser transferidos a transportistas, comerciantes y al consumidor final, lo que genera procesos de inflación local en los precios de alimentos, así como de bienes y servicios.
- **Pérdidas por acumulación de productos agrícolas,** en las zonas de producción agrícola, las demoras para sacar los productos perecederos (frutas, verduras, lácteos, flores) hacia los centros de acopio y mercados, genera pérdidas a causa del deterioro de los perecederos dada su descomposición o reducción en la calidad comercial, lo que trae como consecuencias la reducción de los ingresos de los agricultores y se encarece el producto para el consumidor, contribuyendo al debilitamiento de las economías locales y rupturas en la cadena de suministro.
- **Déficit en insumos agrícolas:** la obstrucción vial impiden el ingreso de fertilizantes, semillas, y demás insumos agroquímicos, y alimentos para el ganado y maquinaria agrícola, aspectos que pueden escalar al verse afectado el ciclo de siembra y cosecha, reduciendo la disponibilidad de productos y se genera dependencia de los productos importados

Los Impactos ambientales, incluye variables como: Pérdida de cobertura de suelo, Afectaciones al drenaje y Afectaciones a la cobertura vegetal

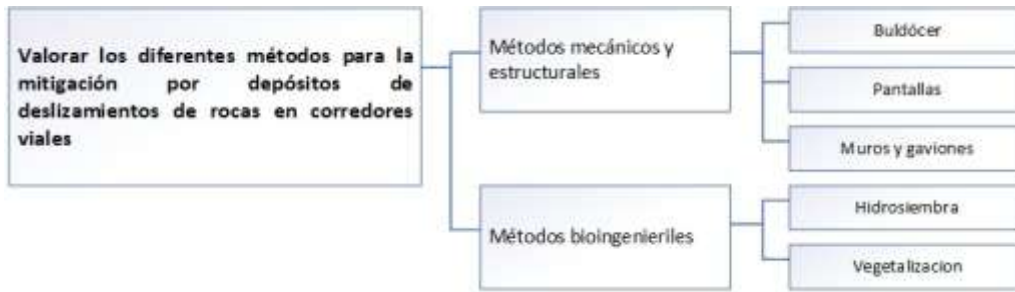


Diagrama 4. Metodología general y actividades para el desarrollo del tercer objetivo del proyecto.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

El Diagrama 5. Metodología general y actividades para el desarrollo del cuarto objetivo del proyecto, muestra el objetivo, así como cada una de las actividades necesarias y realizadas, así como los aspectos evaluados en cada una de las actividades que hicieron parte del desarrollo y ejecución del cuarto objetivo del proyecto.



Diagrama 5. Metodología general y actividades para el desarrollo del cuarto objetivo del proyecto.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

El Diagrama 6. Metodología general y actividades para el desarrollo del quinto objetivo del proyecto, muestra el objetivo, así como cada una de las actividades necesarias y realizadas, así como los aspectos evaluados en cada una de las actividades que hicieron parte en el desarrollo y ejecución del quinto objetivo del proyecto.

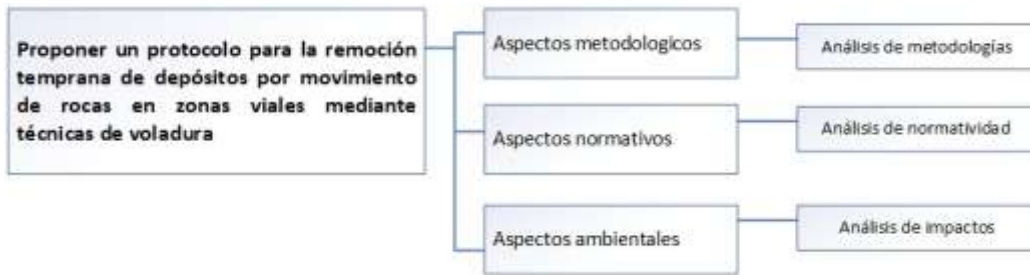


Diagrama 6. Metodología general y actividades para el desarrollo del quinto objetivo del proyecto.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

En el capítulo 1, encontramos el marco geográfico que nos muestra las condiciones bajo las que se puede presentar el fenómeno, además de un marco conceptual que muestra los aspectos generales asociados a infraestructura vial en Colombia, la relación existente entre los movimientos en masa y la infraestructura vial, además de una descripción a nivel general de los diferentes tipos y clases de explosivos que se usan en el desarrollo de voladuras, destacando que se remite solo a los explosivos producidos y disponibles en el mercado colombiano.

### 1.1. Marco geográfico

Los desprendimientos de bloques o caídas de rocas son una amenaza geológica de alta importancia en el territorio colombiano, siendo uno de los fenómenos dentro de los movimientos en masa que más afectaciones genera, en las zonas montañosas tropicales, donde los taludes son susceptibles a sufrir caída de rocas, debido a que generalmente, se reúnen cuatro elementos importantes para su ocurrencia como lo son la topografía (condiciones de pendiente media, alta a abrupta), generación de vibraciones (por voladura, pequeños sismos, actividad sísmica), procesos de meteorización y erosión, y fenómenos climáticos (elevadas precipitaciones). (Benavides, 2012)

La interacción de factores hace variar las fuerzas que actúan sobre la roca o degradan su resistencia, este fenómeno natural típico de zonas de topografía abrupta y que se observa en cualquier tipo de roca en zona de montañosa y especialmente en la cordillera, razón por la cual la inestabilidad de los bloques de roca es muy variada, por lo que resulta difícil establecer metodologías sencillas para analizar este tipo de problemas, al ser una combinación de múltiples factores, en los cuales iniciado el fenómeno, el principal parámetro que controla la trayectoria del bloque en su caída es la geometría del talud, se debe entender el comportamiento y respuesta de los taludes en zonas tropicales, en donde se requiere establecer una serie de pautas en lo referente a nomenclatura y clasificación, en donde para ello en la literatura se encuentran múltiples sistemas de clasificación, en los que se resaltan dos por los parámetros evaluados el sistema de clasificación propuestos por Hutchinson (1968) y por Varnes (1958 y 1978). Este último sistema fue actualizado por Cruden y

Varnes en el «Special Report 247» del Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996) y es el sistema que más se referencia y utiliza en estas condiciones. (Suarez, 1998)

Al evaluar el entorno geográfico del fenómeno se debe establecer las características de la ladera, talud a nivel de topografía, geotécnicas y ambientales, las que permiten un diagnóstico preciso del fenómeno, destacando en la topografía (altura, pendiente, curvatura, largo y ancho), donde actuando en forma conjunta o separada, afectan la estabilidad del talud, por cuanto determina el nivel de esfuerzos totales y la fuerza de gravedad que provocan el movimiento, además controla la tasa de meteorización y la tasa de infiltración y movimiento de agua a través del material del talud, afectando la cantidad de agua disponible, además el nivel de esfuerzos es también determinado por el volumen y ubicación de los bloques o masas de materiales, factores que dependen de las características topográficas, las principales características topográficas a evaluar son:

- **Pendiente:** Los perfiles más profundos de meteorización se encuentran en los taludes suaves más que en los empinados, en donde para cada formación o material, en un estado determinado de meteorización, existe un ángulo de pendiente a partir del cual el talud es inestable.
- **Curvatura:** Se define como concavidad o convexidad, ya sea tanto en sentido longitudinal como transversal y afecta el equilibrio de la masa en sí, así como la capacidad de infiltración y de erosión por su efecto en la velocidad del agua de escorrentía.
- **Largo – ancho:** Entre más largo sea un talud, mayor recorrido tendrán las aguas de escorrentía sobre este y, por lo tanto, el talud estará más expuesto a la erosión superficial.
- **Áreas de infiltración arriba del talud:** Es importante identificar áreas de concentración de agua arriba del talud, que coinciden con depresiones topográficas o zonas de regadío intenso, entre más grande sea la zona que aporte agua al talud, será mayor la cantidad de agua que está afectando la estabilidad del talud.

A nivel geológico se define las características o propiedades de la roca, la formación geológica determina la presencia de materiales duros o de baja resistencia y las discontinuidades pueden facilitar la ocurrencia de caída de rocas a lo largo de planos de debilidad, los elementos geológicos principales a estudiar son los siguientes:

- **Formación Geológica:** Los materiales de origen ígneo - metamórfico poseen un comportamiento diferente a los de origen sedimentario.
- **Estructura y discontinuidades:** En las rocas, la estratificación y las discontinuidades actúan como planos de debilidad o como conductores de corrientes de agua subterránea y las características de estas pueden facilitar las caídas de bloques.
- **Meteorización:** La descomposición física o química produce alteraciones en la roca, las cuales modifican substancialmente los parámetros de resistencia y permeabilidad, facilitando la ocurrencia de caídas.

Los cambios en el régimen de aguas subterráneas actúan como detonantes de caídas de rocas, en laderas o taludes, y estos se encuentran, generalmente, relacionados con la lluvia y la hidrología superficial, en donde el estudio debe contemplar los parámetros relacionados con la hidrogeología:

- **Características de las lluvias:** La ocurrencia de períodos lluviosos intensos produce ascensos en los niveles piezométricos y la saturación disminuye las tensiones capilares.
- **Agua subterránea:** Los niveles de agua freática pueden fluctuar de manera considerable con el tiempo y modificar la resistencia de los materiales y el estado de esfuerzos.

Aunque se puede presentar el fenómeno en diferentes zonas del país, en el desarrollo del proyecto se incorpora datos de voladuras desarrolladas, en el departamento del Tolima sobre la vía Ibagué - Combeima - Villa Restrepo, en el departamento del Caquetá la vía que comunica el municipio de San Vicente del Caguán con la ciudad de Florencia y la vía Florencia – Neiva, en el departamento del Meta en la ciudad de Villavicencio en Caño Grande y la vereda la Argentina, en el departamento de Antioquia sobre la vía que comunica Vía San Luis – Marinilla con la ciudad de Medellín y en el municipio de San Luis, en todos los casos, se produjo desprendimiento de bloques de roca, que generaron afectación en procesos de movilidad vial de personas, transporte de alimentos e insumos, abastecimiento y potabilización de agua, construcción de infraestructura.

## **1.2. Marco conceptual**

Dentro del marco conceptual, encontraremos aspectos teóricos, pertenecientes y/o asociados a la infraestructura vial, aspectos generales asociados al desarrollo y características de la infraestructura

vial en Colombia, además de la relación de esta con la manifestación de movimientos en masa, además de una descripción general de los diferentes tipos y clases de explosivos usados de manera frecuente en el desarrollo de voladuras y que son desarrollados y producidos por la industria militar colombiana INDUMIL y se encuentran disponibles en el mercado nacional.

### **1.2.1. Infraestructura vial**

Según el Diccionario de la Lengua Española (DLE), la infraestructura es el «conjunto de elementos, dotaciones o servicios necesarios para el buen funcionamiento de un país, de una ciudad o de una organización cualquiera» y una vía es «la calzada construida para la circulación rodada». De este modo, la infraestructura vial es el conjunto de elementos empleados para circular de un punto a otro, productos y personas a fin de lograr el funcionamiento de un país o ciudad. La infraestructura vial abarca obras como: carreteras, vías férreas, puertos y aeropuertos. (ASALE & RAE, 2020)

La vía o carretera son una infraestructura de transporte compuesta de fajas de terreno empleadas para la movilización de vehículos de manera continua en el espacio y el tiempo, asegurando condiciones adecuadas de seguridad y comodidad. Su correcto diseño tiene el propósito de hacer una carretera segura, cómoda, estética, económica y compatible con el medio ambiente. (Cárdenas, 2014)

La clasificación de las vías está dada según su funcionalidad y tipo de terreno. En cuanto a su funcionalidad, las vías pueden ser: primarias, secundarias y terciarias. La red primaria es aquella que cumple la función de comunicar las principales ciudades entre departamentos, las cuales son zonas de producción y consumo del país. (INVIAS & Ministerio de Transporte, 2016), estas vías deben funcionar pavimentadas y con especificaciones geométricas adecuadas; asimismo estas vías tienen la mayor circulación de vehículos y carga de un país. (Ospina, 2016) La red secundaria, las que pueden funcionar con o sin pavimento, está constituida por vías que comunican las cabeceras municipales entre sí y/o una cabecera municipal con una vía de orden primario. (INVIAS & Ministerio de Transporte, 2016) Y la red terciaria, son las vías que conectan las veredas entre sí y/o unen las cabeceras municipales con las veredas; gran parte de estas vías están compuestas de afirmado, aunque pueden estar pavimentadas o no; son angostas y algunas tienen pendientes fuertes;

comparado con la red primaria, las vías terciarias no tienen volúmenes de tránsito elevados y en consecuencia su carga es menor o mínima cuando es comparada. (Ospina, 2016)

El desarrollo de la infraestructura vial en un país se debe regir por ciertos lineamientos que se han establecido en libros, manuales y normativas. Se debe entender que el hecho de conocer algunas características de la zona a intervenir o carretera a mejorar, contribuye desde la planeación de proyectos hasta la construcción y mantenimiento de dichas vías. (Acosta & Alarcón, 2017) dentro de los lineamientos que rigen el desarrollo vial encontramos:

- La decisión de construir o mejorar las vías en un país no es una decisión de fines personales, sino que es una decisión que surge de un propósito como el controlar y erradicar el rezago de la infraestructura vial del país, estos propósitos se articulan dentro de los planes nacionales de transporte y deben seguir un cuidadoso proceso de planificación. (Carciente, 1965)
- La planificación de las actividades económicas para el desarrollo de los proyectos de infraestructura vial, es indispensable dado que permite cuantificar la demanda de transporte y analizar las alternativas para satisfacer los requerimientos de la sociedad. (Acosta & Alarcón, 2017)
- El desarrollo vial en un país está directamente relacionado y es proporcional al desarrollo social y económico, en donde el proceso de transporte cobra gran importancia la producción de la tierra, la comercialización y la accesibilidad a otros lugares, en donde la relevancia que tienen el desarrollo vial, se refleja en la inversión que traen las obras viales y lo complejo que representa el sector de la infraestructura vial a la económica, lo que son argumentos fiables para la planificación del transporte en un país. (Carciente, 1965)
- En cuanto a la inversión que se requiere para el desarrollo de proyectos viales, esta representa un alto porcentaje del PIB total del país, ya que se debe entender que una vía no se limita a unir dos puntos geográficos, sino que debe satisfacer las necesidades económicas de un pueblo; por ello que no basta con solo construir la carretera, dado que el mantenimiento es fundamental para que continúe operando en el tiempo. (Carciente, 1965).
- La debida inversión en la infraestructura vial del país impacta a nivel positivo en la industria manufacturera, puesto que incentiva el ingreso de mano de obra, como ejemplo de ello

tenemos ciudades como Bogotá y Medellín donde ha aumentado la demanda y la capacidad de pago, sin embargo, debido al poco mantenimiento de las vías y otros aspectos, como el aumento del costo del transporte, impiden un proceso productivo y de consumo adecuado. (Gonzales & Acero, 2006)

- Se debe mantener el principio teórico de que todas las vías que conforman la red vial nacional se complementan entre sí y que ninguna de estas tiene un grado de importancia inferior (Carciente, 1965), esta idea debe persistir en cualquier territorio del país para lograr un desarrollo en infraestructura vial óptimo.
- El desarrollo regional aplicado a la infraestructura vial, plantea varias teorías como: la localización de puntos en el país que maximicen los beneficios de los habitantes y mejoren la calidad de vida; y los costos de transporte, por tanto, de aquí salen los insumos proyectados al mejoramiento de la infraestructura vial. (Gonzales & Acero, 2006).
- Un desarrollo en la infraestructura vial adecuado, empieza con la adecuada organización y administración de la red vial nacional y establecer los kilómetros exactos que esta contiene, sin embargo, una aproximación sobre los kilómetros que hay en la red terciaria (la cual es la que se encuentra en mayor rezago) y sus características como el estado en el que se encuentran, dan una perspectiva de la demanda a satisfacer y a ejecutar. (Acosta & Alarcón, 2017)

La Imagen 1. Red vial colombiana, muestra la red vial del territorio colombiano, en donde se destaca la red primaria en línea continua de color rojo, la red secundaria en línea continua de color verde y la red terciaria en línea no continua color azul, mapa realizado por el autor con información en formato Shapefile registrada oficialmente a 31 de diciembre de 2022 por el Instituto Nacional de Vías – INVIAS, agencia descentralizada de la rama ejecutiva del gobierno colombiano a cargo de la asignación, regulación y supervisión de los contratos para la construcción de autopistas y carreteras y el mantenimiento de las vías, adscrita al Ministerio de Transporte y el Ministerio de Desarrollo, información que reposa en el portal único del estado colombiano.

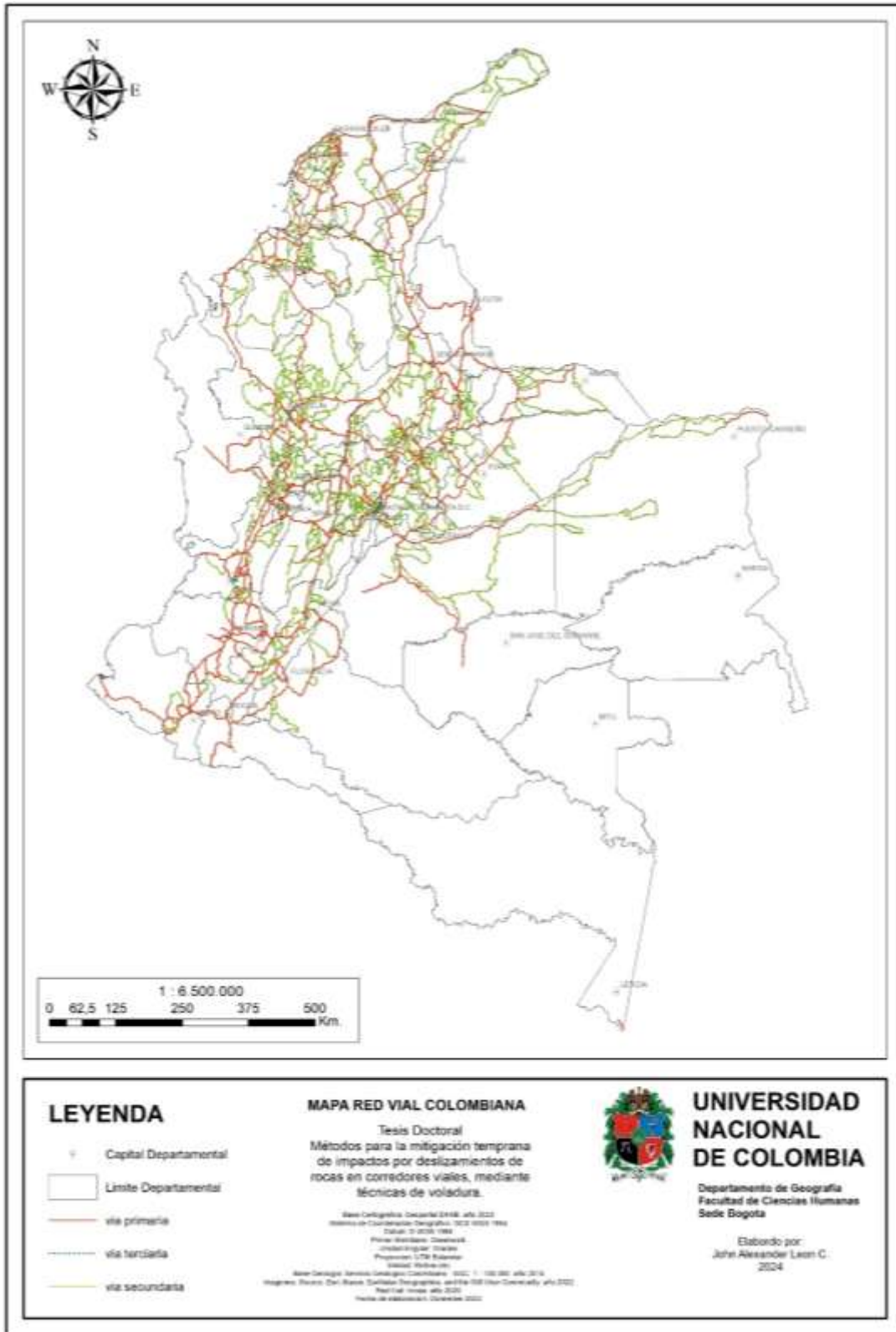


Imagen 1. Red vial colombiana.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

### **1.2.2. Movimientos en masa en redes viales**

Los movimientos en masa son una de las principales causas de pérdidas económicas y humanas, alrededor del mundo, principalmente en zonas de montaña y ambientes tropicales. Gran parte de estas pérdidas se presentan a lo largo de infraestructuras lineales para el transporte de productos y servicios públicos, especialmente en vías. (Jiménez & Aristizábal, 2018) El territorio colombiano presenta una red vial con 166.233 km de longitud, de los cuales 16.786 km corresponden a la red primaria, 66.082 km pertenecen a la red secundaria, y 74.746 km pertenecen a la red terciaria. (BM - Banco Mundial, 2012)

En los últimos 40 años se registran de manera oficial cerca de 75 mil kilómetros de vías afectadas, donde el 52 % de los registros se relacionan con movimientos en masa. Solo en los años 2010 – 2011, durante el fenómeno de La Niña, que golpeó gran parte del territorio colombiano, 1600 km de infraestructura vial fueron afectados, de los cuales el 9,7 % correspondió a la red primaria, el 24,7 % a la red terciaria y el 0,9 % a la red concesionada. Un indicador de la magnitud de la problemática en Colombia es que la mayor inversión pública para la reducción del riesgo se realiza por parte del INVIAS, del orden de US\$ 350 millones en promedio anual entre el periodo 1999 - 2008, superada solo por la inversión de las Corporaciones Autónomas Regionales para la conservación de cuencas. Sin embargo, aunque la reconstrucción de un kilómetro de vía puede valer hasta cinco veces el costo de realizar un buen mantenimiento preventivo, el 91 % de las inversiones se destina a la atención y rehabilitación de vías y solo el 9 % se invierte en la prevención. (BM - Banco Mundial, 2012)

La Imagen 2. Zonas identificadas con procesos de inestabilidad según el SGC a 2020, muestra 6826 áreas reportadas por el Servicio Geológico Colombiano – SGC, con problemas de movimientos en masa en el territorio nacional. Mapa realizado por el autor con información en formato Shapefile, registrada oficialmente a 31 de diciembre de 2022 por el Servicio Geológico Colombiano SGC, información que reposa en el Geoportal del SGC y el portal único del estado colombiano.

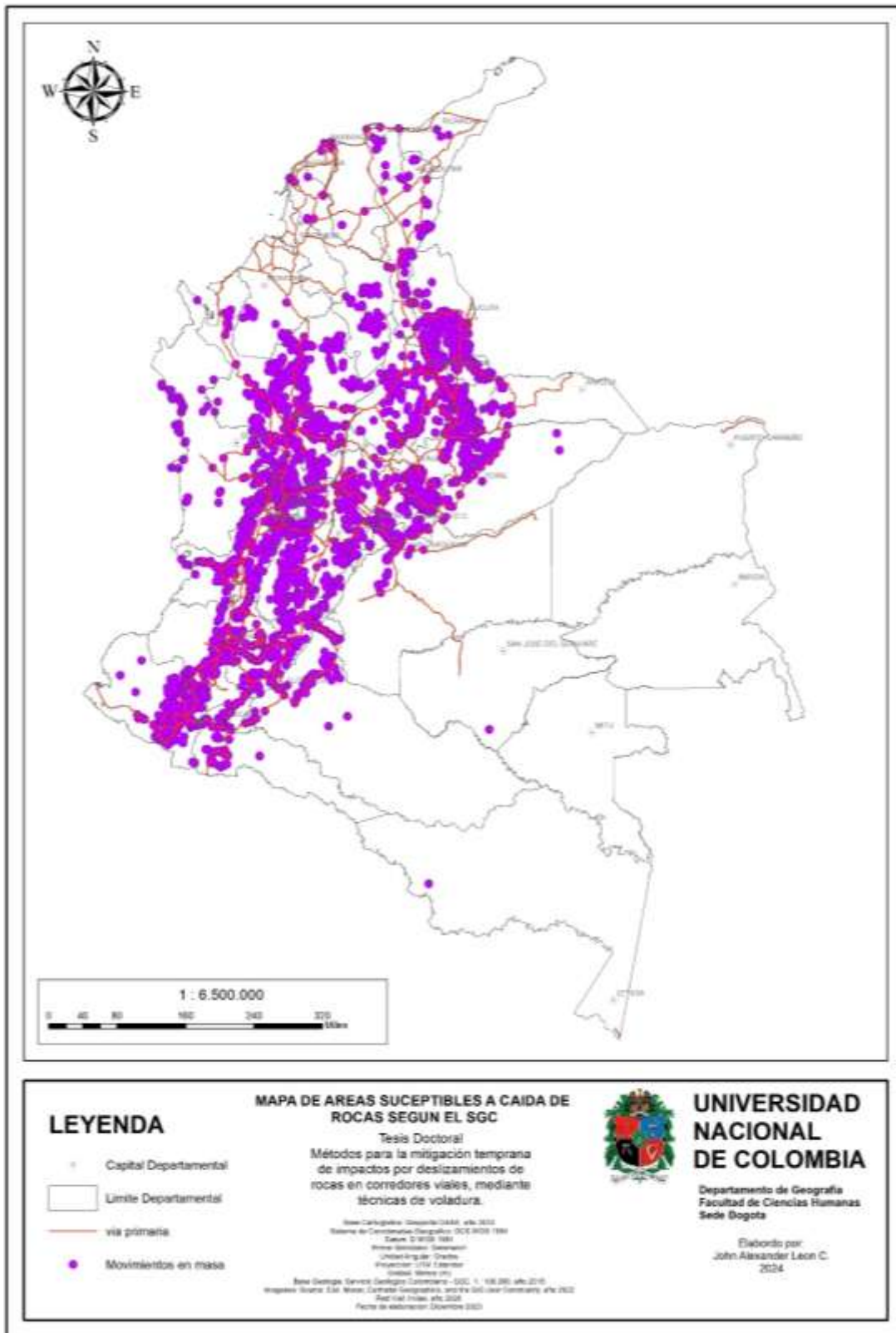


Imagen 2. Zonas identificadas con procesos de inestabilidad según el SGC a 2020.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

Una de las medidas más importantes para la prevención y reducción de pérdidas por movimientos en masa hace referencia a la zonificación de la susceptibilidad y amenazas del territorio. Estos mapas, para el caso de proyectos de infraestructura vial, permiten no solo un trazo y diseño que consideren las restricciones del territorio a intervenir, sino además identificar los sectores de mayor criticidad y que requieren atención especial durante la operación. (BM - Banco Mundial, 2012)

Estos métodos están generalmente agrupados en métodos estadísticos y métodos determinísticos o con base física. Los métodos con base física utilizan modelos matemáticos geotécnicos, y en algunas ocasiones se acoplan con modelos hidrológicos, para estimar el factor de seguridad de cada unidad de análisis. Generalmente, utilizan el criterio de falla de Mohr-Coulomb y análisis de equilibrio límite mediante la ecuación de talud infinito, la cual permite ser implementada para regiones específicas utilizando sistemas de información geográfica y mapas con grillas regulares tipo Ráster. A su vez, los métodos estadísticos establecen relaciones funcionales entre factores de inestabilidad y la distribución pasada y presente de los movimientos en masa. Estas relaciones generalmente corresponden a funciones de densidad de movimientos en masa que pueden ser establecidas para cada factor individual, denominados métodos estadísticos bivariados, o relaciones combinadas entre una variable dependiente (ocurrencia de movimientos en masa) y variables independientes (factores de causa), denominados métodos estadísticos multivariados. Aunque estos procedimientos han adquirido una aplicación extensa a nivel regional, requieren un inventario exhaustivo de movimientos en masa. Entre los métodos estadísticos bivariados se destacan Radio de Frecuencia, Índice Estadístico, Peso de la Evidencia, Funciones de favorabilidad. Los métodos multivariados de mayor uso son análisis discriminante. Regresión logística, y Análisis condicional. (BM - Banco Mundial, 2012)

### **1.2.3. Caída de rocas en corredores viales**

El desarrollo de mega proyectos viales en Colombia, así como el uso desmedido de grandes cortes en cajón, carentes de manejo técnico adecuado, han venido alterando las condiciones naturales de las montañas, liberándose de forma descontrolada y acelerada las tensiones In situ de los macizos rocosos, situación que desencadena en la aparición de zonas de alto riesgo de procesos de caída de rocas, los que amenazan no solo la infraestructura vial, sino también la vida de los que por el corredor transitan y los bienes de los usuarios de las vías. (Goldsmith & Edward, 2011)

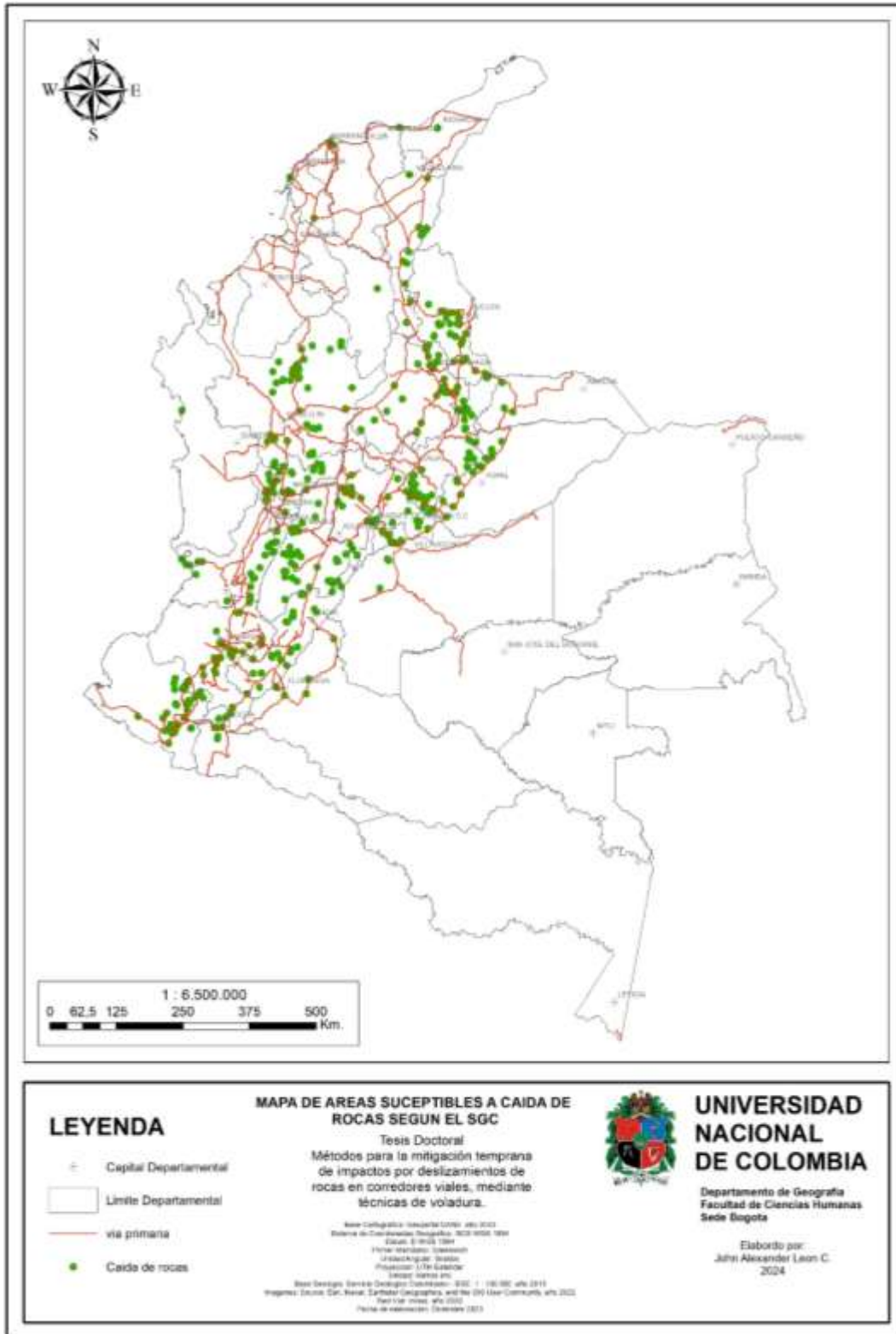


Imagen 3. Zonas identificadas con procesos de caída de rocas según el SGC.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

La Imagen 3. Zonas identificadas con procesos de caída de rocas según el SGC, el mapa muestra las 539 áreas identificadas para el año 2020 por el Servicio Geológico Colombiano - SGC, en él se muestra las zonas con procesos activos clasificadas como movimiento en masa tipo caída de rocas, procesos que afectan de manera primordial corredores viales pertenecientes a la red primaria y secundaria. Mapa realizado por el autor con información en formato Shapefile, registrada oficialmente a 31 de diciembre de 2022 por el Servicio Geológico Colombiano SGC, información que reposa en el Geoportal del SGC y el portal único del estado colombiano.

El análisis del proceso de caída de bloques de roca debe ser evaluado por medio de técnicas que permitan obtener una probable trayectoria del bloque, desde su desprendimiento hasta su ubicación final, dependiendo de la metodología de análisis, se consideran otras variables como la energía y la velocidad del impacto, las que pueden ser observadas y evaluadas en terreno, procesos de evaluación física fundamentada en las leyes de Newton y la teoría de colisiones o choques. (Goldsmith & Edward, 2011)

#### **1.2.4. Problemática de la infraestructura vial en Colombia**

De acuerdo a cifras del Ministerio de desarrollo y Logistics Cluster, la red vial colombiana se compone de una Red Primaria (Grandes Autopistas, a cargo de la nación), la Red Secundaria (a cargo de los departamentos) y la Red terciaria (compuesta por carreteras o caminos Inter veredales, a cargo de los municipios), contando para el año 2022 con una red de carreteras de 206.102 km, de las cuales el 6.9 %, es decir 16.983 km corresponden a la red primaria, el 21 % que corresponden a 44.400 km a la red secundaria y 142.284 km el 69.46 % a la red terciaria.(Ministerio de Desarrollo y Logistics Cluster, 2022)

En cuanto a la calidad de las vías, de acuerdo con cifras del Ministerio de Transporte del total de la red primaria (red nacional) vías pavimentadas, el 59 % se encontraba en buen estado, el 36 % en regular estado y el 5 % en mal estado. Por otro lado, Colombia es uno de los países con menor número de kilómetros de carreteras por cada mil habitantes, cerca de 3.5, por debajo de países como Brasil (10), Costa Rica (9), Argentina (5.5), Chile (5.2) y Venezuela (4.1), entre otros. (Cárdenas et al., 2004)

Si se hace el cálculo teniendo en cuenta únicamente las vías pavimentadas, Colombia no alcanza ni siquiera 1 kilómetro por cada mil habitantes (0.4). Esto deja ver claramente la necesidad de adoptar medidas que mejoren la cantidad y calidad de la actual red vial del país, así como medidas que garanticen la movilización por la red vial presente. (Pérez, 2005)

Lo que se puede observar es que, si bien la red vial primaria no alcanza un cubrimiento total del territorio nacional, no es posible afirmar que exista una clara concentración en las zonas de más desarrollo del país. (Pérez, 2005), en el mismo sentido, (Pachón & Ramírez, 2005), quienes afirman que: «La distribución espacial de la red pavimentada nacional también confirma que no hubo una concentración en las regiones más desarrolladas del país, pese a que en las regiones se contaba con una situación ventajosa gracias al desarrollo de los primeros planes para el desarrollo de la infraestructura vial en Colombia». (Pérez, 2005)

Claramente, se evidencia en la concentración de vías a lo largo de toda la cadena montañosa, que las poblaciones en muchos casos se encuentran localizadas a alturas considerables, así como a lo largo del recorrido del valle de los ríos Magdalena y Cauca, Además, otra gran parte de las vías se concentra en el pie de monte llanero y en algunas zonas de la Costa Caribe. Son precisamente estos recorridos viales los que conectan al mayor número de municipios del país. (Pérez, 2005)

La Imagen 4. Zonas identificadas con procesos de movimiento en masa durante el fenómeno de la niña según el INVIAS, se muestra los corredores viales del territorio nacional y zonas con procesos de movimiento en masa recurrentes durante la manifestación del fenómeno de la niña, se destacan el número de municipios, que en su gran mayoría, de menor superficie, se han venido creando a lo largo de las principales vías de comunicación, recordando que inicialmente la idea del primer plan vial nacional era consolidar las vías como una arteria de conexión de los principales centros de producción y consumo del país, y posteriormente se generó un efecto de localización de nuevas poblaciones alrededor de las ya existentes con el fin de aprovechar el mayor acceso a las principales vías de comunicación terrestre, como lo muestra el mapa, donde la distribución departamental de la longitud de las carreteras podría estar reflejando una concentración de la red vial a lo largo de las zonas de mayor desarrollo del país. Mapa realizado por el autor con información en formato Shapefile, registrada de forma oficial el 31 de diciembre de 2022 por el INVIAS.

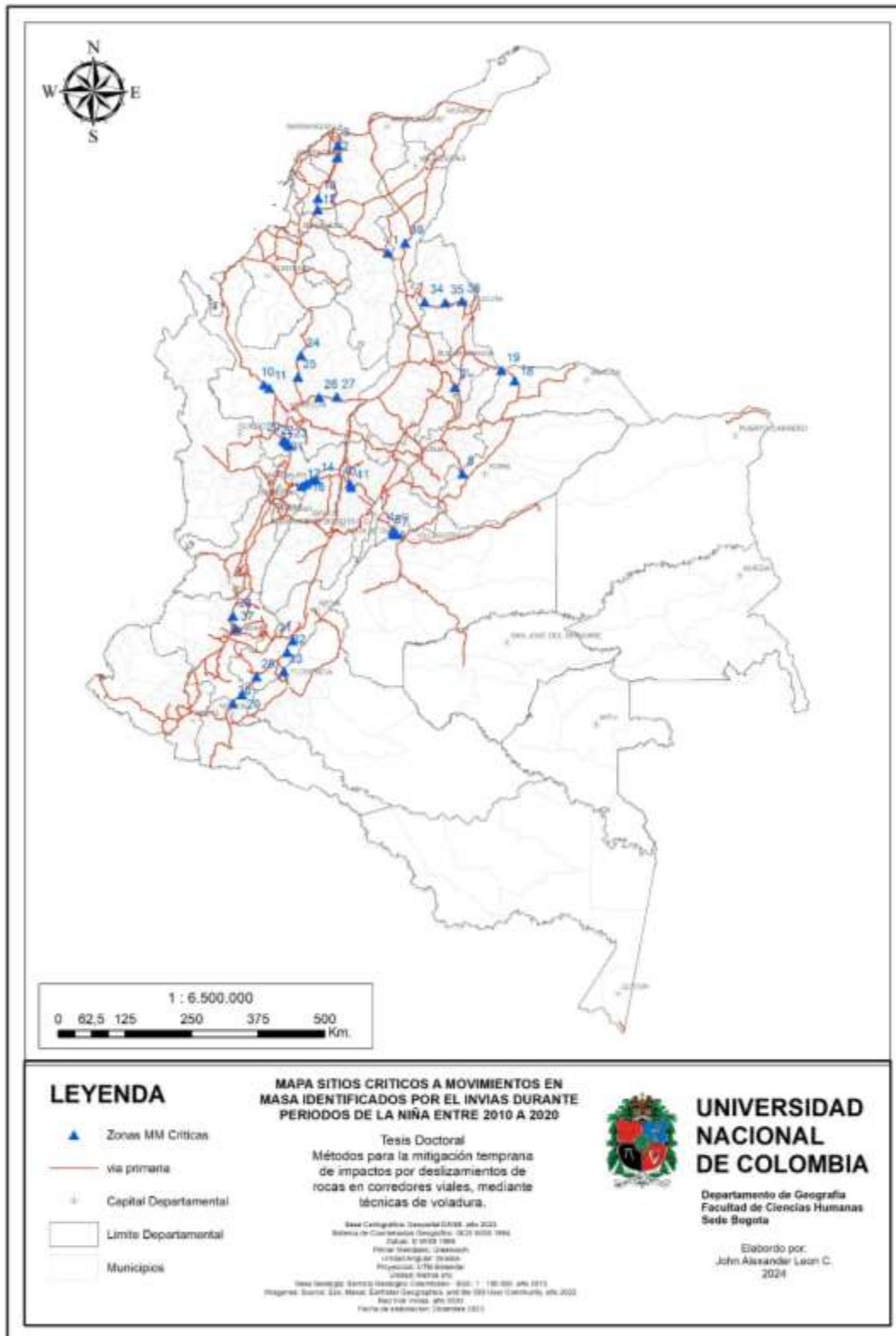


Imagen 4. Zonas identificadas con procesos de movimiento en masa durante el fenómeno de la niña según el INVIAS. Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

Para 2014, según FEDESARROLLO, Colombia es uno de los países en Latinoamérica con mayor rezago en infraestructura vial (Yepes et al., 2013); además estudios más recientes en donde según el Informe de Competitividad Global 2016 – 2017, en cuanto al Índice Global de Competitividad (IGC), Colombia ocupa el puesto 61 de 138 países con calificación de 4,3/7 (manteniendo su puesto del año anterior). Entre los lastres de competitividad de Colombia está el tema de la infraestructura, cuya calificación es de 3,7/7, llevando al país a ocupar el puesto 84 de entre 138 países evaluados (DNP, 2017). El problema radica en las condiciones de calidad y movilidad que presentan las vías, ya que para 2006 el 67,2 % de los países estaban en una mejor posición que Colombia, y para 2016, la cifra es alarmante, el porcentaje de los países que estaban en mejor posición correspondía al 81,9 %. (Consejo Privado de Competitividad y del Centro de Pensamiento en Estrategias Competitivas de la Universidad del Rosario, 2017).

Por otra parte, la inexistencia de programas de mantenimiento vial en el país, aumentan la problemática en todas las vías que hacen parte de la red nacional (Murillo, 2017), además desde los periodos del conflicto armado, existe una desatención por parte del Estado, así como la falta de presencia institucional tanto en las vías de orden nacional como regional y local, lo que impide la correcta articulación del territorio y la comunicación entre ejes de crecimiento estratégico. (Valderrama, 2017)

#### **1.2.5. Explosivos**

Los explosivos son compuestos químicos o mezclas susceptibles a un proceso de degradación extremadamente rápido, el cual genera de manera instantánea grandes volúmenes de gases a alta temperatura y presión, el cual provoca un efecto destructor. Según Ames (2012), «un explosivo es un compuesto químico o una mezcla de compuestos químicos a los cuales, al imprimirles un estímulo correcto o incorrecto, sufren una reacción química violenta de tipo exotérmica». Su utilización principal está esencialmente dada a las actividades de minería, para el arranque de rocas y remoción de materiales, lo que consiste en disponer de una energía concentrada químicamente, situada de modo adecuado en un lugar y en una cantidad específica, de tal forma que al ser liberada de manera controlada (tiempo y espacio) genere una fragmentación determinada y desplazamiento del material rocoso. (Lara & Ames, 2012)

Los explosivos convencionales y los agentes explosivos presentan propiedades que los diferencian y caracterizan, propiedad que se aprovecha para su adecuada selección, buscando responder al tipo de voladura que se pretende realizar y las condiciones específicas requeridas para la misma. (C. López Jimeno et al., 2003).

Los explosivos químicos industriales se clasifican en dos grandes grupos, según la velocidad de su onda de choque: explosivos rápidos detonantes con velocidades de entre 2000 m/s a 7000 m/s y explosivos lentos deflagrantes con menos de 2000 m/s. (E. López Jimeno et al., 2006)

El Diagrama 7. Composición de agentes explosivos, muestra aspectos básicos para poder diferenciar los distintos agentes explosivos y así como sus características de acuerdo a su composición química, permitiendo desde esta una diferencia fundamental.

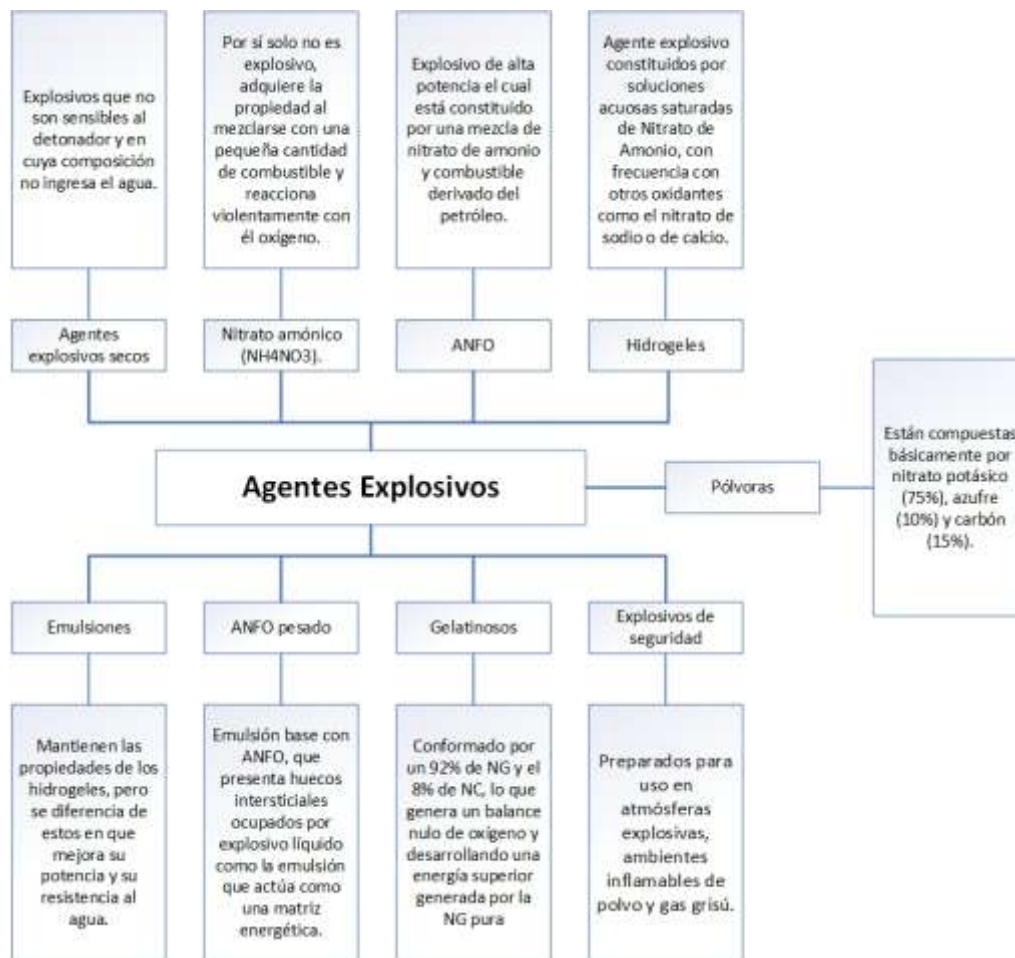


Diagrama 7. Composición de agentes explosivos.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

\* Ver **ANEXO 1**. Agentes explosivos y características de acuerdo con su composición.

Los explosivos industriales se dividen a su vez en dos grandes grupos: los agentes explosivos que corresponden a mezclas que intrínsecamente no contienen ingredientes explosivos, dentro de los que encontramos el ANFO, ALANFO, hidrogeles, emulsiones, ANFO pesado; y los explosivos convencionales, los que requieren para su fabricación sustancias intrínsecamente explosivas, las que actúan como sensibilizadores de las mezclas; dentro de las más comunes encontramos los gelatinosos, pulverulentos y de seguridad. (Marshall & Oxley, 2008)

La elección y el control estricto de las propiedades y características de los explosivos nos permite obtener una fragmentación específica, ya que desde el manejo del explosivo se puede manipular adecuadamente la reacción química desarrollada, llevando el explosivo a unas condiciones de interés particular, logrando que dicha reacción adquiera velocidades superiores a las del sonido, durante la reacción el explosivo y transformándolo a otras sustancias químicas. Estas reacciones producen gases a entre los 1500 y 4000 °C y presiones entre 2 y 10 Gpa, los cuales al expandirse rápidamente en condiciones de presión producen una onda de choque de tipo supersónico, con lo que se generan nuevas fracturas alrededor de la roca que lo rodea. (J. León & Giraldo, 2020)

La Tabla 1. Propiedades y características de los explosivos, nos muestra las características prácticas de mayor interés en el conocimiento de explosivos.

<b>Propiedades y características de los explosivos</b>	
<b>Potencia explosiva</b>	Capacidad que tiene el explosivo para fragmentar y proyectar la roca
<b>Poder de fragmentación</b>	Indica la capacidad de fracturar la roca adecuadamente y conforme a la onda de detonación y no al conjunto de la onda de detonación más la presión de los gases
<b>Velocidad de detonación</b>	La velocidad de detonación (producto de la reacción química) y de la onda de choque (producto de la transmisión física). La velocidad de detonación es una propiedad que se debe evaluar al hacer la elección del explosivo
<b>Densidad</b>	La densidad relativa del explosivo está comprendida normalmente entre los 0,8 y 1,5. Existen explosivos de menor densidad con aplicaciones determinadas, cuyo uso implica una baja energía por unidad de volumen con aplicación en voladuras de recorte o bien en aplicaciones en voladuras de escombreras
<b>Diámetro crítico</b>	Es el diámetro de una carga cilíndrica por debajo de la cual la onda de detonación no se propaga o lo hace a una velocidad muy inferior a la nominal
<b>Masa crítica</b>	Es la mínima cantidad de explosivo que se necesita para que se produzca la detonación
<b>Resistencia al agua</b>	Es la característica por la cual un explosivo, sin necesidad de cubrimiento especial, mantiene sus propiedades inalteradas durante un periodo de tiempo en contacto con el agua

<b>Calidad de los humos</b>	El humo residual es el conjunto de productos gaseosos producto de las reacciones de detonación del explosivo, los que indican la calidad de la detonación o que se produjo una reacción química completa o incompleta
<b>Toxicidad</b>	Los glicoles nitrados, como la nitroglicerina, son vasodilatadores y causan dolor de cabeza por inhalación o absorción cutánea
<b>Sensibilidad</b>	El mayor o menor grado de energía de iniciación que debe transmitir para que se produzca su iniciación y, a continuación, su debida detonación
<b>Ensayos específicos en explosivos de seguridad</b>	Los explosivos utilizados específicamente en labores de minería de carbón requieren estar catalogados como explosivo de seguridad. Esta catalogación y clasificación se realiza atendiendo a los resultados de pruebas y criterios concretos

*Tabla 1. Propiedades y características de los explosivos.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).*

En las labores de voladura para obras de ingeniería civil y minería, la selección adecuada del explosivo, para un determinado fin supone conocer en detalle las características y propiedades de cada explosivo disponible, y a partir de ellas hacer la elección del más adecuado acorde al tipo de labor a desarrollar dentro de la operación de voladura.

\* Ver **ANEXO 2**. Propiedades y características de los explosivos.

# CAPÍTULO 2

## VARIABLES

En este capítulo se realiza un recuento de los aspectos a tener en cuenta en la realización de un análisis adecuado de las variables controlables y no controlables en el desarrollo de potenciales operaciones con explosivo, en donde además de los parámetros básicos tenidos en cuenta en la voladura tradicional desarrollada en el sector minero, se incorpora y analiza variables a tener en cuenta al desarrollar una voladura en cercanía a centros poblados, en el desarrollo de voladuras para la mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, donde es fundamental dar solución oportuna a los impactos a la movilidad, a fin de producir planos de corte en el bloque de roca a lo largo de superficies específicas para lograr su fracturamiento, donde se debe prestar atención a una variable no contemplada en las voladuras tradicionales, la variable antrópica, definiéndose en este caso de estudio a las alteraciones que se pueden presentar por el comportamiento de las personas ajenas a la operación, en los alrededores a la zona a intervenir con explosivo.

El Diagrama 8. Aspectos generales y variables a evaluar en el uso de explosivos, resalta que, dentro de los diferentes aspectos a asociados a la evaluación de explosivos, se encuentra en cada uno de ellos variables controlables y no controlables, las que se deben tener en cuenta en el desarrollo de una voladora, variables asociadas al mismo explosivo, al entorno donde se desarrollara la voladura, correlacionado tanto la roca como las condiciones ambientales.



Diagrama 8. Aspectos generales y variables a evaluar en el uso de explosivos.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

## 2.1. Variables a considerar en el uso de explosivos

A fin de realizar un adecuado análisis y establecer la relación adecuada de las variables controlables y no controlables involucradas en el uso de explosivo, para fracturamiento de bloques de roca, se debe evaluar aspectos como el denominado daño en campo lejano y daño en campo cercano, por voladura, en donde se consideran las características del foco emisor de energía sísmica, el cual corresponde a las variables que es posible controlar. Teniendo el control y dominio sobre aspectos como la energía liberada, se controla la magnitud de la vibración a generar por este proceso, lo que resulta fundamental para controlar el daño en campo lejano y daño en campo cercano, de acuerdo con el enfoque de (Wong & Pang, 1992)

Los factores principales que condicionan el rendimiento en la operación de voladura son las características del macizo rocoso, del bloque de roca o los materiales a intervenir con explosivo. En ese sentido, lo relevante son los materiales del bloque de roca a intervenir, estos varían según las características geológicas y geotécnicas del macizo rocoso, esta variabilidad tiene un efecto significativo en el éxito o el fracaso de la operación de voladura, donde para lograr una voladura adecuada es decir, conseguir una fragmentación adecuada con daño mínimo a la infraestructura cercana o al macizo rocoso, es fundamental realizar una caracterización geológica y geotécnica del bloque de roca a volar, dado que este condiciona el diseño y la ejecución de los disparos, la voladura considera diversos parámetros dentro del diseño, donde los niveles de vibración generados por una malla de disparo y los resultados en la fragmentación, es importante considerar la cantidad de explosivo que se requiere para lograr una fragmentación adecuada, la cual está estrechamente relacionada con los resultados de la evaluación geológica y geotécnica, evaluaciones en donde se analizan los siguientes parámetros:

- **La litología y las alteraciones:** tipo de roca y grado de alteración se relaciona con la densidad del bloque de roca, donde la densidad puede ser usada como indicador de resistencia al fracturamiento, bajo este criterio mientras más densa sea la roca, más energía se requiere para fragmentarla. (González de Vallejo et al., 2002)
- **La resistencia de la roca intacta:** Un bloque de roca con alta resistencia al fracturamiento requiere mayor cantidad energía para fragmentarse, puesto que el mecanismo de fractura es por tracción. (Djordjevic, 1999). De forma práctica para ahorrar tiempo y por economía,

se estima de forma cualitativa como se muestra en la Tabla 2. Estimación cualitativa de la resistencia al fracturamiento de una roca., datos que se relacionan con los resultados tomados en campo por medio de penetrómetro (Marca: MATEST C194-01)

- **Las fracturas, discontinuidades y sus características:** es importante medir su apertura para el cálculo de caras, dado que a mayor presencia y/o abertura de estas, menor será la energía requerida para la fragmentación. (Moraga, 2018)
- **La presencia de agua:** los bloques de roca, que cuentan con altos niveles de humedad, afectan los tiempos de operación, dado que el ANFO se disuelve fácilmente en ella. (Moraga, 2018)

Descripción	Ponderación	Resistencia a la compresión simple (MPa)
<b>Dureza de la roca</b> Facilidad de la roca al fracturamiento	Se desgrana con un golpe de martillo	< 25
	Se fractura con un golpe de martillo	25 – 50
	Requiere más de un golpe para fracturar	50 – 100
	Muchos golpes de martillo para fracturar	100 – 250
	Sólo se astilla con los golpes de martillo	> 250

*Tabla 2. Estimación cualitativa de la resistencia al fracturamiento de una roca.*

*Fuente: Clasificación de la ISRM (1981)*

### 2.1.1. Características técnicas del explosivo

Dado que existe diferentes tipos de explosivo y que cada uno tiene características propias definidas por sus propiedades, incluso para el mismo tipo de explosivo las características pueden variar dependiendo del fabricante; por lo que se hace fundamental el conocimiento de sus propiedades, siendo la elección del explosivo un factor importante en el diseño de la voladura.

El explosivo es un compuesto químico o mezcla de componentes que, al ser calentado, impactado, sometido a fricción o al choque, produce una rápida reacción de tipo exotérmico, liberando una gran cantidad de gas y produciendo altas temperaturas y presiones en un corto periodo de tiempo.

El explosivo comercial, generalmente es: una base explosiva, transportadora de oxígeno, combustible, antiácido y absorbentes, algunos ingredientes realizan más de una función en el explosivo. Una base explosiva es un líquido o sólido que, al aplicarle suficiente calor, o al ser sometido a un choque fuerte, se descompone en gases con la liberación de una gran cantidad de

calor. Los combustibles combinados con exceso de oxígeno previenen la formación de óxidos de nitrógeno. Los transportadores de oxígeno aseguran la oxidación completa del carbón para prevenir la formación de monóxido de carbono. La formación de óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono no es deseable, ya que produce gran cantidad de humo y es indeseable porque resulta en un bajo calor de detonación y en consecuencia poca eficiencia en la voladura. Los antiácidos se utilizan como estabilizante en el almacenamiento. Los absorbentes absorben líquidos en bases explosivas.

En operaciones que involucran el uso de explosivo como la voladura de rocas, es fundamental que solo se empleen explosivos y accesorios que estén debidamente certificados, con esto se pueden minimizar los impactos y garantizar el control de las variables geomecánicas que intervienen en el proceso de voladura, es importante hacer énfasis en las variables que son susceptibles de control en todo trabajo de voladura, están clasificadas en tres grupos:

- Geométricas (diámetro, longitud de carga, espaciamiento, retiro, etc.)
- Químico - Físicas (Tipo de explosivo, potencia, energía, sistemas de carga, etc.)
- De Tiempo (Tiempo de retardo, secuencia de iniciación, tiempo de salida).

(SNGM - Servicio Nacional de Geología y Minería, 2014)

Según (Contreras, 2010), una vez establecidas las variables de diseño, se recomienda dar forma a los parámetros y nomenclatura que se utilizan en trabajos de voladura en bancos a cielo abierto.

\* Ver **ANEXO 3**. Esquema de los parámetros y nomenclaturas utilizados en trabajos de voladura de bancos a cielo abierto.

### **2.1.2. Características de la litología**

Los materiales o rocas que constituyen el bloque o material del depósito y/o deslizamiento pueden tener las mismas propiedades y características de los macizos rocosos, dado que es la fuente de origen del material caído o deslizado, el cual puede diferir al tener un grado de alteración diferente, donde podemos encontrar bloques monolíticos, más o menos continuos, o separados por accidentes originados por meteorización, la tectónica: fallas, discontinuidades, juntas, etc., dando

lugar a zonas concretas en los mismos, que se caracterizan por sus propiedades geomecánicas. Estas son función de su origen y del proceso geológico que han actuado posteriormente.

Las principales variables que influyen de forma directa en el esquema o diseño de la perforación y voladura son:

- El tipo de roca que conforma el bloque.
- Las estructuras geológicas.
- La resistencia mecánica de la roca.
- Las propiedades elásticas de las rocas.
- El espaciamiento y orientación de las discontinuidades.
- Las discontinuidades, la naturaleza de relleno o porosidad de las rocas a volar.
- Contenidos de agua.

La caracterización del bloque y/o del macizo rocoso requiere la realización de evaluaciones para el reconocimiento de materiales y el desarrollo de ensayos de laboratorio planificados, para conseguir la máxima información, para desarrollar los trabajos de investigación y posterior diseño de cargas.

Estas técnicas de caracterización geomecánica, en la actualidad, pueden resumirse en:

- Estudios geológicos de detalle de la zona.
- Realización de campañas de reconocimientos (sondeos, penetraciones,) con recuperación continua de testigo y obtención de muestras adecuadas para su ensayo en laboratorio.
- Estudios estructurales de las familias de discontinuidades
- Desarrollo de estudios «geofísicos».
- Realización de ensayos «In situ» en el bloque o macizo rocoso.

El Diagrama 9. Características y variables controlables y no controlables de los Explosivos, nos muestra las variables controlables y las variables no controlables a tener en cuenta cuando se realizan operaciones con explosivo.

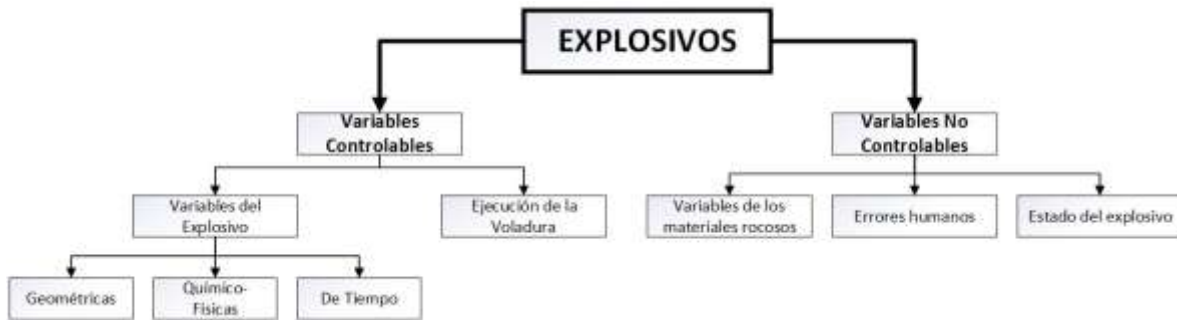


Diagrama 9. Características y variables controlables y no controlables de los Explosivos.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

El Diagrama 10. Variables controlables en el uso de explosivos, se muestran las variables controlables en el desarrollo de una operación de voladura, variables que permiten el realizar modificaciones a los resultados en la ejecución de la operación con explosivo, estas variables son de tipo geométrico, físicas, químicas y temporales.

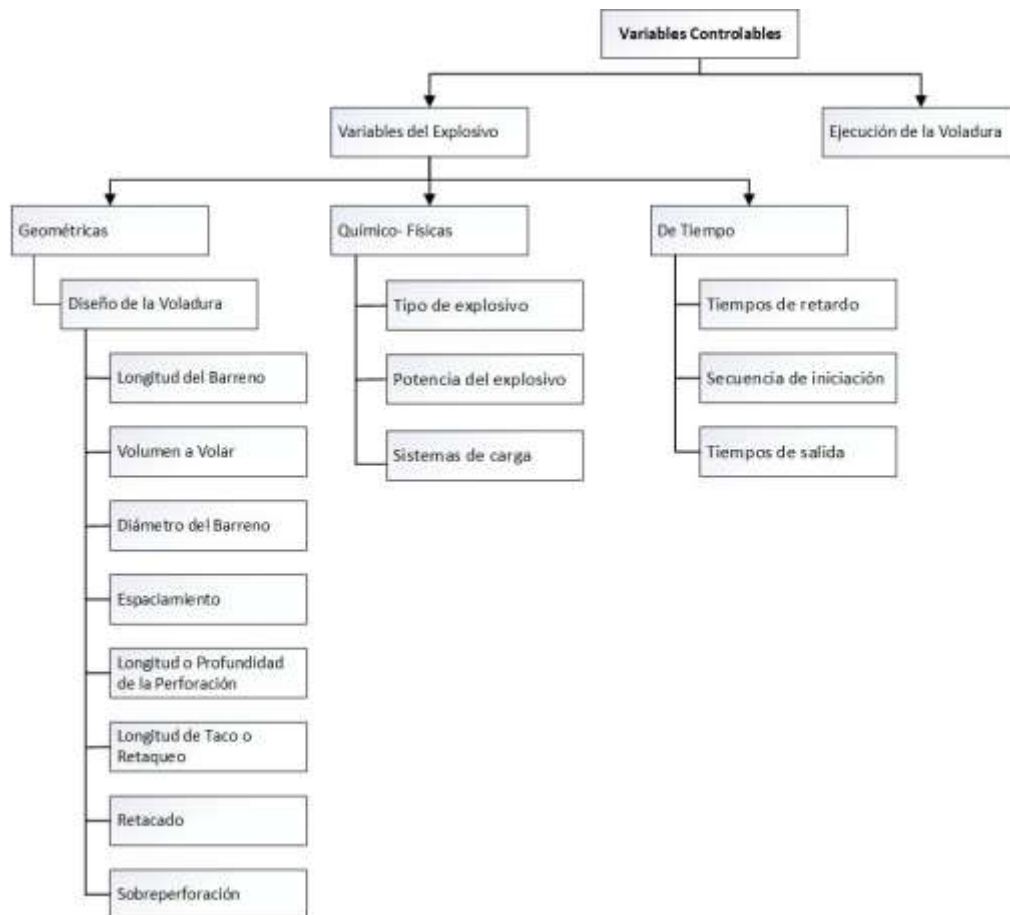


Diagrama 10. Variables controlables en el uso de explosivos.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

El Diagrama 11. Variables no controlables en el uso de explosivos, muestra las variables que no es posible controlar de ninguna forma en la ejecución de una voladura, variables que pueden afectar los resultados de la operación, dentro de estas variables encontramos los materiales rocosos, los errores humanos o el estado del explosivo.

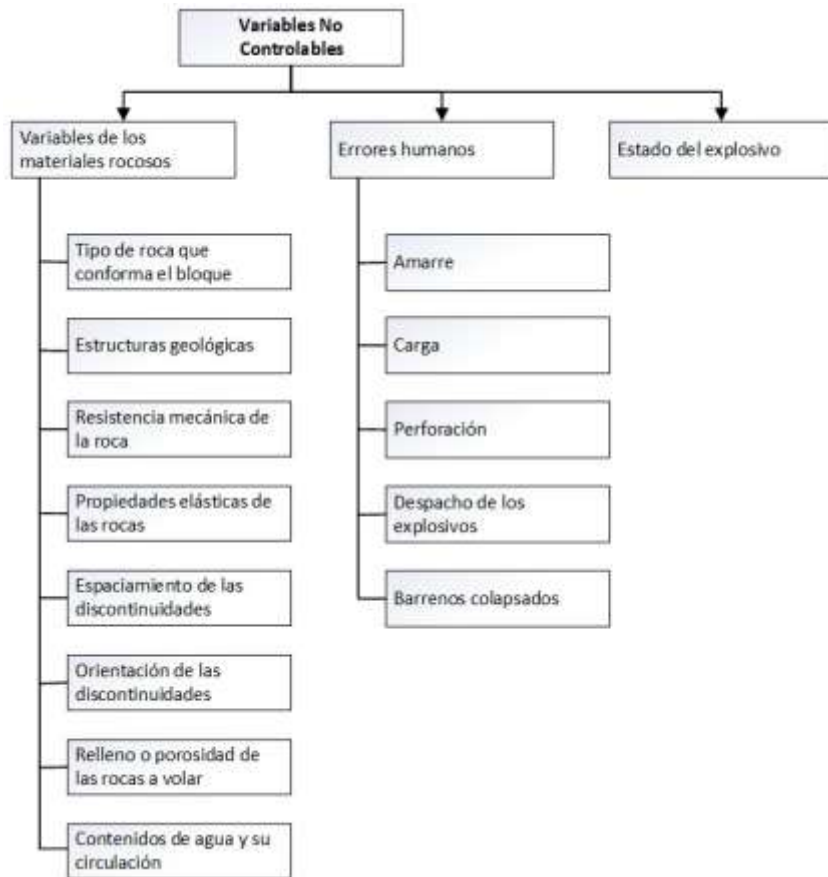


Diagrama 11. Variables no controlables en el uso de explosivos.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

## 2.2. Litología

Las condiciones estructurales y las características de alteración que presentan las rocas en el talud, tienen influencia en la ocurrencia de caídas de bloques, estas influyen de varias formas, algunos sectores del macizo rocoso pueden presentar zonas de debilidad, zonas de alteración, las que probablemente han de fallar más que las rocas no alteradas. En zonas de pendiente donde queda expuesta roca alterada, cubierta por roca estable, la diferencia de la resistencia también aumenta

el potencial de caída de la roca más estable fuerte, dado que la roca alterada tiende a erosionar y socavar la roca más estable, bajo estas condiciones, la resistencia de una masa rocosa depende del tipo de roca y de la presencia y naturaleza de discontinuidades tales como uniones u otras fracturas, lo que genera que a mayor número de discontinuidades se encuentren en la roca estable, mayor será la probabilidad de inestabilidad de la roca.

En los diseños y esquemas de voladura, en zonas donde se producen cambios litológicos o variación de las propiedades, estos deben tenerse en cuenta y evaluarse al valorar los rendimientos de la voladura y el objetivo a conseguir, los que al introducirse afectan directamente sobre:

- Las cargas unitarias, pero manteniendo los esquemas de voladura para los tipos de roca.
- Variando los esquemas de voladura y/o perforación, pero manteniendo las cargas unitarias en los barrenos.

Cuando se encuentran en contacto material con resistencia diferentes, como lo puede ser, una caliza no ripable (proceso mediante el cual una roca puede ser fragmentada en el terreno) y unas arcillas muy plásticas, si se opta por una excavación en la zona mediante un método de perforación y voladuras, puede tener lugar una gran pérdida de energía, al producirse deformaciones admisibles por los materiales más blandos, como consecuencia de esto se produce una mala fragmentación, con riesgo de no arrancar todos los barrenos, generando vibraciones, sobreexcavaciones y/o proyecciones no deseables.

### **2.2.1. Caracterización de los materiales macizos rocosos**

La caracterización de materiales que componen los bloques y el macizo rocoso constituye la fase inicial del estudio geológico - geotécnico, lo que implica una descripción de las características particulares que intervienen y que juegan un papel importante en el comportamiento geomecánico del bloque y su respuesta al explosivo, así como del macizo frente a procesos de desestabilización, como pueden ser la ejecución de excavaciones a cielo abierto y subterráneas, o cualquier otro mecanismo que altere el estado inicial del macizo rocoso como elementos de construcción. Es importante mencionar que la caracterización de macizos rocosos, se basaba en las observaciones y la descripción hecha a partir del afloramiento y sondeo de perforación. En este sentido, dicha

descripción no solo debe tener un contenido geológico, sino estar acompañada de medidas y ensayos adicionales.

El comportamiento geomecánico del material y del macizo rocoso está relacionado con las propiedades de la roca intacta, discontinuidades, condiciones hidrogeológicas, campo tensional, entre otras. Por otra parte, al hablar de rocas, se tiene una gran variedad de materiales y, por tanto, una variedad de comportamientos; de acuerdo con el tipo de material en el macizo, este puede comportarse de forma elástica, plástica o enasto-plástica, en función de la magnitud de las presiones actuantes.

### **2.2.2. Definición de roca y su clasificación**

El término roca, se define en geología como un agregado de uno o más minerales sólidos, con propiedades físicas y químicas definidas, agrupados de forma natural, este término aplica a todos los constituyentes de la corteza terrestre, en donde se diferencian entre materiales no consolidados (suelo) y consolidados. En ingeniería civil y geotecnia, este término aplica a materiales duros y resistentes que forman parte de la corteza terrestre, y se define el suelo como el producto derivado de la roca alterada como consecuencia del proceso de meteorización.

Dada la amplitud de conceptos geológicos, solo como referencia se presenta una descripción elemental de los tres grupos de rocas, clasificadas por su origen y características en: Rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Las rocas ígneas provienen del magma interior fundido, presentándose preferentemente como intrusiones y lavas. Las rocas ígneas, en general, son densas, duras y competentes, pero tienden a descomponerse por acción de intemperismo y otros procesos de alteración que paulatinamente las transforman en arcilla, caolín, sílice, y otros detritos.

Las rocas sedimentarias se han formado por la desintegración de rocas preexistentes, cuyos detritos se transportaron, acumularon y compactaron en extensas cuencas marinas durante muy largos períodos de tiempo. También por la descomposición y acumulación de vegetales y vida animal o por la precipitación química y decantación de soluciones minerales. Por tanto, aparte de los planos de

separación entre capas, muestran complejos sistemas de fisuras de tensión (diaclasas), que indudablemente también influyen en la mecánica de la voladura.

Las rocas metamórficas resultan de la transformación profunda de rocas ígneas o sedimentarias por calor, grandes presiones y cambios químicos debidos a fenómenos geológicos de gran magnitud, como los de granitización.

### **2.2.3. Selección de rocas para voladura**

Para propósitos de voladura, las rocas suelen ser clasificadas en dos grandes grupos, un primer grupo conformado por rocas ígneas y metamórficas y un segundo grupo conformado por rocas sedimentarias, de las cuales para fines prácticos se puede destacar:

**Rocas ígneas y metamórficas**, son usualmente las más duras de perforar y difíciles de volar. Por su origen plutónico o volcánico, están asociadas a disturbios tectónicos que las han contorsionado y fisurado, mostrando planos de clivaje no regulares y amplia variación de su estructura granular; pueden clasificarse en dos grupos:

- Grupo A. Cubre a las rocas de granulometría fina y aquellas cuyas propiedades elásticas tienden a absorber la onda de choque generada por la voladura antes que a quebrarse. Ejemplo: filitas, gneiss, micasquisos, hornfels o corneanas.
- Grupo B. Cubre a las rocas de granulometría gruesa como el granito, diorita y algunas cuarcitas silisificadas, algunas veces difíciles de perforar y muy abrasivas por su contenido de sílice, pero que usualmente se fragmentan con facilidad en la voladura.

**Rocas sedimentarias**, en estas rocas el espesor del bandeamiento varía de acuerdo al tiempo de acumulación y la naturaleza de origen, cuanto más masiva sea y más definido y amplio el bandeamiento, más difícil de volar eficientemente. La perforabilidad dependerá más de sus propiedades abrasivas que de la dureza. Algunas areniscas y calizas pueden presentar problemas de voladura. En particular, las rocas de grano grueso con una matriz débil requieren consideraciones especiales porque en la voladura tiende más a compactarse o abovedar antes que fragmentarse.

Por otra parte, se encuentra el problema de la excavación en roca, en donde los mecanismos y medios necesarios para realizar una excavación varían con la naturaleza del terreno, los que, desde este punto de vista, se pueden clasificar en:

- Terrenos: sueltos, flojos, duros, de tránsito.
- Roca blanda; Roca dura y Roca muy dura.

La Tabla 3. Clasificación y tipo de materiales para excavación en roca, nos muestra la descripción de los tipos de materiales y el tipo en el cual se han clasificado.

TIPO	MATERIAL	DESCRIPCION
I	Suelos sueltos a semi-compactos.	Arenas, gravas, limos, tierra vegetal, arcillas medias con humedad media, escombros de roca. Se usa maquinaria de media a baja potencia: topadores frontales, excavadora universal.
II	Suelos compactos a roca blanda.	Arcillas duras, arcilla esquistosa, marga (roca blanda, calizo arcillosa), masa de roca altamente fisurada o estratificada, roca blanda y roca fragmentada por el uso de explosivos. Terrenos que necesitan disgregación con un escarificador o arado. Se usa maquinaria de media a alta potencia (más de 80 hp)
III	Roca de dureza media.	Roca caliza, pizarra, conglomerados y rocas medianamente estratificadas, rocas muy alteradas y minerales blandos. Se usan máquinas de más de 140 hp, siempre se necesitará disgregación mediante explosivos de baja potencia o escarificadores pesados.
IV	Roca dura	Rocas calizas duras o silíceas, rocas ígneas y metamórficas y masas de rocas poco alteradas, cuarcita y minerales de baja densidad. Sólo pueden ser excavados por máquinas especiales para cada caso, se usan explosivos de media potencia.
V	Roca muy dura	Rocas ígneas no alteradas como granito, diorita, diabasa, rocas metamórficas duras, minerales densos. Se necesitan máquinas especialmente diseñadas y el uso de explosivos de alta potencia.

*Tabla 3. Clasificación y tipo de materiales para excavación en roca.  
Fuente: Contreras. (2010).*

### **2.1.3.1. Características y peligros de los distintos tipos de roca.**

Los distintos tipos de roca presentan características que benefician o generan amenaza en la actividad de voladura, entre estas se destacan las siguientes:

- **Caliza:** Fácil de excavar; consumo reducido de explosivos y barrenos. Pueden encontrarse cavernas, a veces de grandes dimensiones, y manantiales de agua importantes. No suelen hallarse gases peligrosos.

- **Arenisca:** Fácil de excavar; consumo de explosivos normalmente menor que en la caliza; mayor consumo de barrenos. No suele presentar discontinuidades ni se encuentran grandes manantiales de agua.
- **Pizarras:** De excavación fácil; según su naturaleza y de la inclinación de los estratos, suele encontrarse poca agua, aunque a veces se presentan manantiales importantes cuando la capa freática está sobre la excavación. Las pizarras pueden ir asociadas al yeso y al carbón; en el caso del segundo, puede existir el metano, gas explosivo muy peligroso; puede hallarse también el hidrógeno sulfurado, mortal, aunque en pequeñas cantidades.
- **Rocas graníticas:** Generalmente fáciles de excavar; no se necesita entibar y el revestimiento preciso es, normalmente, pequeño; el consumo medio de los explosivos es más del doble que en la arenisca normal; el de barrenos, depende de la naturaleza de la roca, que varía entre límites muy amplios; aunque, normalmente, las condiciones de esta roca son favorables, de vez en cuando pueden encontrarse manantiales de agua con grandes caudales.
- **Rocas volcánicas:** Las rocas volcánicas son costosas de barrenar y precisan un importante consumo de explosivos; suelen encontrarse estratos de tobas descompuestas que dan lugar a grandes manantiales, como también gases peligrosos, tóxicos o explosivos.

### 2.1.3.2. Litología y alteraciones

La influencia de la litología y la alteración de la roca con fines geotécnicos se considera uno de los principales parámetros en la matriz rocosa (González de Vallejo et al., 2002) y de las más importantes en diseño de voladura, razón por lo que una buena descripción en terreno resulta fundamental. En ese sentido, es muy diferente el volar bloques o un macizo rocoso compuesto por rocas sedimentarias, ígneas o metamórficas, ya que sus diferencias en composición y textura intervienen directamente en la energía necesaria para fragmentar y desplazar la pila de roca. (Moraga, 2018)

El tipo de roca, junto al tipo y grado de alteración, se relacionan directamente con la densidad de la matriz rocosa. En muchas ocasiones, la densidad de la roca se usa como indicador de la resistencia al fracturamiento (González de Vallejo et al., 2002); sin embargo, esta correlación no siempre es efectiva. Por otra parte, la densidad de la roca en voladura está directamente relacionada con la

energía necesaria para desplazar una pila de roca y sus fragmentos puedan ser abordados por la pala de la retroexcavadora. En ese sentido, mientras más densa sea la roca, más energía se necesitará para fragmentar y desplazar la masa rocosa. (Moraga, 2018)

La densidad de la roca depende principalmente de los minerales que la constituyen y de su textura. Por ejemplo, un granito con textura fanerítica tendrá mayor densidad que una arenisca con bajo grado de compactación, por lo que el granito necesitará mayor energía para ser fragmentado (suponiendo que ambas rocas no presentan alteración), se debe resaltar en el diseño de la Voladura la necesidad de indicar los distintos dominios litológicos en que se pretende realizar la voladura, en ese sentido, si la malla de disparo es litológicamente heterogénea es necesario indicarlo al diseñador para que pueda estimar la energía necesaria para fragmentar y desplazar adecuadamente los tipos de roca que presentan dos respuestas distintas frente a los esfuerzos dinámicos y gases generados por los disparos. (González de Vallejo et al., 2002)

La Tabla 4. Clasificación general de rocas, se presenta una clasificación generalizada de rocas, que correlaciona los diferentes dominios litológicos, en donde la malla de disparo o tiro, puede fundamentarse en esta clasificación sin ser necesario el considerar el tipo y grado de alteración, siempre que se tenga presente las variaciones de importancia como textura y composición en la roca intacta. Además, en la tabla se presentan ejemplos para cada subtipo de rocas y los distintos métodos de clasificación que tiene, por lo que, en la descripción de estas, se puede estar especificando de manera generalizada los porcentajes de minerales y la textura a nivel macroscópico de la roca.

Tipo de roca	Subtipo	Ejemplos
Sedimentarias	Siliciclásticas	Conglomerados, brechas, areniscas, lutitas
	Químicas	Calizas, dolomías, chert
	Biogénicas	Estromatolitos
Ígneas	Intrusivas	Gabros, dioritas, tonalitas, granodioritas, granitos
	Hipabisales	Diabasas, microdioritas, aplitas
	Extrusivas	Basaltos, andesitas, traquitas, dacitas, riolitas
	Piroclásticas	Tobas
	Hidrotermales	Brechas hidrotermales
Metamórficas	Cataclásticas	Milonitas
	No foliadas	Rocas córneas, skarns, cuarcitas, mármoles
	Foliadas	Pizarras, filitas, esquistos, anfibolitas

Tabla 4. Clasificación general de rocas.

Fuente: González De Vallejo (2002).

De manera similar a la litología, el tipo y grado de alteración se aborda desde una observación en la matriz rocosa. En ese sentido, la alteración de la roca producto de procesos geológicos (alteración hidrotermal, meteorización física, meteorización química, etc.) influirá evidentemente en la calidad de la roca, densidad, resistencia al fracturamiento, etc., en ejemplo, de ello una roca compacta y resistente como un granito, con un alto grado de meteorización, necesitará menos energía para ser fragmentada y desplazada comparándola con un granito no alterado. Sin embargo, bajo esta premisa hay que tener presente que no todos los procesos de alteración disminuyen la densidad y resistencia de la roca, en este caso se puede citar como ejemplo, un fluido silicificado, este puede aumentar la densidad de la roca porosa, cuyos cristales de sílice rellenarán los espacios vacíos, en especial cuando la porosidad de la roca se encuentra interconectada, en este caso las rocas muy porosas con intenso grado de meteorización, debido a su absorción de la energía de la onda de choque, se prefieren explosivos de baja densidad y baja velocidad de detonación (VOD), además de medidas de diseño, se puede usar cargas desacopladas o rellenos, lo que se traduce en bajos niveles de velocidad de partícula. (Moraga, 2018). De acuerdo con esto, además de considerarse la litología, es necesario especificar en terreno el tipo y grado de alteración y/o meteorización, como se observa de manera general en la Tabla 5. Descripción del grado de meteorización.

La Tabla 5. Descripción del grado de meteorización, se muestra una clasificación donde se describe el grado de meteorización, en la cual es importante caracterizar cada dominio geotécnico en cuanto a su litología, tipo y grado de alteración, factores que incidirán de manera directa en las características del diseño y ejecución de la voladura, a fin de lograr una fragmentación óptima y un desplazamiento eficaz de la pila de roca sometida a voladura.

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>
Fresca	No se observan signos de meteorización en la matriz rocosa.
Decolorada	Se observan cambios en el color original de la matriz rocosa. Es conveniente indicar el grado de cambio. Si se observa que el cambio de color se restringe a uno o a algunos minerales se debe mencionar.
Desintegrada	La roca se ha alterado al estado de suelo, manteniéndose la fábrica original. La roca es friable, pero los granos minerales no están descompuestos.
Transformada	La roca se ha alterado al estado de un suelo, alguno o otros lo minerales están descompuestos.

Tabla 5. Descripción del grado de meteorización.

Fuente: González De Vallejo (2002).

### 2.1.3.3. Propiedades geomecánicas de la matriz rocosa

La resistencia al fracturamiento es evidente, dado que una roca con alta resistencia al fracturamiento necesita una gran cantidad de energía para ser fragmentada. Debido a que el principal mecanismo de fractura en voladura es la tracción (Djordjevic, 1999) y la resistencia a la tracción de la roca intacta suele variar entre el 5 y 10 % del valor de su resistencia a la compresión simple (Duncan, 1999), un parámetro típico y fácil de medir como la UCS (Unconfined Compressive Strength), obtenida desde ensayos de compresión simple o carga puntual, estará en estrecha relación a la energía requerida para fragmentar la roca. A nivel práctico, se suele estimar este parámetro de manera cualitativa (por economía y tiempo de resultados), donde la resistencia de la roca se relaciona a la facilidad de fracturarla con el valor obtenido del martillo, como se muestra en la de Estimación cualitativa de la resistencia al fracturamiento de una roca, esta estimación se encuentra basada en clasificación de la ISRM (1981). (Moraga, 2018)

La Tabla 6. Estimación cualitativa de la resistencia al fracturamiento de una roca, muestra los valores de resistencia a la compresión simple (MPa), acorde a las propiedades geomecánicas de la matriz rocosa.

Descripción	Ponderación	Resistencia a la compresión simple (MPa)
<b>Dureza de la roca</b> Facilidad de la roca al fracturamiento	Se desgrana con un golpe de martillo	< 25
	Se fractura con un golpe de martillo	25 - 50
	Requiere más de un golpe para fracturar	50 - 100
	Muchos golpes de martillo para fracturar	100 - 250
	Sólo se astilla con los golpes de martillo	> 250

Tabla 6. Estimación cualitativa de la resistencia al fracturamiento de una roca.

Fuente: Moraga (2018).

Es evidente que la resistencia a la ruptura es un parámetro determinante en la fragmentación de la roca por voladura en donde su ruptura se puede estimar por medio de la ecuación de deformación, donde se deduce que mientras mayor sea la resistencia a la tracción, mayor será la energía necesaria para producir fracturamiento, entendido en términos de velocidad de partícula, en este caso para las rocas duras y quebradizas se recomienda el uso de emulsiones, donde el tipo dependerá de la orientación de los pozos, presencia de agua, diámetro de perforación, etc. (Moraga, 2018), esto lleva a entender por qué hay mayor liberación de energía hacia el macizo rocoso o los depósitos en una voladura con ANFO como el principal agente explosivo. (Moraga, 2018)

$$\varepsilon_c = \sigma_t / E$$

*Ecuación 1. Deformación.*

*Fuente: Moraga (2018).*

Donde:

$\sigma_t$  = resistencia a la tracción de la roca intacta (Pa)

E = módulo de elasticidad de Young (N/m<sup>2</sup>)

La resistencia a la ruptura de la roca intacta dependerá de la duración de la perturbación, ya que la deformación es dependiente del tiempo de exposición a un esfuerzo. En ese sentido, mientras más corta sea la duración de la onda, mayor será la resistencia a la fragmentación de un cuerpo. De acuerdo con este análisis, el identificar los distintos dominios de resistencia de la roca intacta, al igual que los dominios litológicos y de alteración de forma complementaria, resultarán fundamentales para una fragmentación exitosa. (Moraga, 2018)

#### **2.1.3.4. Discontinuidades**

Las estructuras que componen el macizo rocoso o los grandes bloques que componen los depósitos son consideradas por los especialistas en voladuras como la característica geotécnica que más influyente su diseño (Scott et al., 1996), las características que más inciden son: la orientación, espaciamiento, continuidad o largo, abertura, relleno, etc., en términos generales, a mayor grado de fracturamiento se requiere menos energía para fracturar adecuadamente el bloque rocoso, esto según lo establecido en la ISEE (Internacional Society of Explosives Engineers), en ese sentido, la ISEE sugiere que las alteraciones en el diseño de la voladura basadas en la estructura de la roca pueden ser ventajosas en el aumento de la producción, siempre que se preste atención en evitar efectos secundarios no deseados como daño en campo cercano y lejano, de acuerdo con esto es necesario definir cuáles son que las estructuras que son relevantes desde dos puntos de vista:

- Controlan la resistencia a la tracción del bloque rocoso.
- Controlan la penetración y canalización de los gases. (Moraga, 2018)

El análisis de la influencia de las discontinuidades, debe considerar el efecto de la escala, ya que es la consecuencia más importante del carácter heterogéneo y discontinuo de los bloques rocosos, por lo que se debe hacer una distinción entre:

- Discontinuidades menores.
- Discontinuidades mayores. (González de Vallejo et al., 2002)

### **2.1.3.5. Presencia de agua**

La presencia de agua incide directamente en las características geotécnicas de los materiales rocosos y el diseño de la voladura, en ese sentido, la incompatibilidad que genera el agua radica principalmente en:

- Disminución de los esfuerzos efectivos en el material rocoso.
- Interacción con los explosivos mayores. (González de Vallejo et al., 2002)

El agua genera una disminución del esfuerzo efectivo sobre el material rocoso, no solamente reduce la resistencia de la matriz rocosa para crear fracturas nuevas, sino también disminuye la resistencia de las discontinuidades, considerando que la permeabilidad de estas depende de la abertura y el tipo de relleno. Mayores, si el material rocoso está sometido continuamente a la exposición y la presencia de agua, por ejemplo, un nivel ubicado o proveniente del freático, a largo plazo puede producir la meteorización de la matriz rocosa generando una pérdida de las propiedades de resistencia incidiendo directamente en la fragmentación por voladura. (González de Vallejo et al., 2002) En donde dependiendo del tipo de relleno, el agua puede generar pérdida de la cohesión de las discontinuidades, por lo que disminuiría aún más la resistencia a la tracción y propiciará la apertura y extensión de las fracturas existentes durante la voladura, en este sentido las fracturas con rellenos arcillosos por ejemplo con montmorillonita, serán más sensibles a la presencia de agua comparada con rellenos de cuarzo.

La incompatibilidad del agua con algunos explosivos son un factor determinante para su elección, si el material rocoso presenta agua, el explosivo es fácilmente disuelto por esta, en estos casos se requiere volar con un explosivo resistente al agua, lo que implicará un cambio en las características del explosivo, generando condiciones diferentes en velocidad de detonación y volumen de gases, lo que incidirá directamente en el diseño de la voladura y la energía efectiva para la fragmentación. (Moraga, 2018)

#### **2.2.4. Clasificación de materiales rocosos para voladura**

Para poder integrar aspectos como la geología y la geotecnia en el diseño de la una voladura, se ha venido usando una variedad de métodos que relacionan las características geotécnicas del macizo rocoso, expresando en un índice de volabilidad o índice de tronabilidad con un factor de carga necesario para fragmentar la roca adecuadamente. (Moraga, 2018)

Dey y Sen (2003), realizan un resumen de los criterios de estimación de factor de carga considerando parámetros de diseño, macizo rocoso y propiedades de explosivos. Dentro de los criterios más importantes que consideran características del bloque o macizo rocoso, acá se encuentra el criterio de Ashby (1977) y el de Lilly (1986).

Según Ashby 1977, señalado en (Dey & Sen, 2003), en donde desarrollaron las primera relaciones empíricas para describir el factor de carga requerido para una voladura adecuada en términos de fragmentación, a partir del registro de datos tomados en la mina Boungainville (Papúa Nueva Guinea), fundamentando el registro en la frecuencia de fracturas y el ángulo de fricción de estas, con lo que se representó la resistencia de las estructuras del macizo rocoso, de esta forma se determinó un factor de carga, con respecto al ANFO.

Posteriormente en Ashby 1977, se desarrollaron criterios más complejos en función de características más detalladas de macizo rocoso, uno de los más importantes, que fue el criterio de Lilly (1986), quien desarrolló un método de clasificación de macizo rocoso para considerarlo dentro del diseño de la voladura que fue inicialmente implementado sobre los macizos rocosos de las minas de hierro de Pilbara (Australia). En este método se entrega un índice de volabilidad, basado en la medición de cuatro parámetros del macizo rocoso, los cuales son:

- Las características estructurales del macizo rocoso, por ejemplo, si es poco consolidado, fracturado o masivo.
- El espaciamiento y orientación de planos de debilidad, tales como, estratificación, esquistosidad, foliación, fracturamiento, etc.
- La densidad de la roca.
- La dureza a partir de la resistencia a la compresión simple de la roca. (Lilly, 1956)

El índice de volabilidad de Lilly ha resultado ser un indicador que en muchas minas se está usando con buenos resultados, por lo que es una estimación muy aproximada a los parámetros geológicos y geotécnicos que inciden en el cálculo de factor de carga, como se muestra en la Tabla 7. Criterio de clasificación de macizo rocoso para Voladura. Modificado de Lilly (1986). No obstante, a lo mencionado anteriormente, es recomendable ajustar esta clasificación a las características que afloran en cada macizo rocoso o características del bloque.

La Tabla 7. Criterio de clasificación de macizo rocoso para Voladura. Modificado de Lilly (1986), muestra los métodos más comunes, evalúa los parámetros más comunes para la predicción de la fragmentación, muestra la descripción de aspectos relevantes de cada método, los aspectos a ponderar y los rangos de valores estándar para cada condición, aspectos que determinan la calidad de la fragmentación o características del corte de la roca o bloque intervenido con explosivos.

Es importante resaltar que Lilly señala que el índice de volabilidad es la resultante de la tabla en la que se puede asociar a un factor de carga bajo ciertos parámetros de diseño, que según Lilly (1986) depende de la altura y el diámetro del pozo de voladura, estos parámetros que se mantienen normalmente de manera constante en el diseño. Por otro lado, el factor de carga obtenido es equivalente a la cantidad de explosivo que se debe utilizar para voladura de una tonelada de roca (g/Ton) y, por lo tanto, es proporcional a la energía liberada la cual, combinada con el diseño y ejecución de la voladura, generará niveles de velocidad de partícula y frecuencia que afectan de formas distintas el bloque rocoso.

Parámetro	Descripción	Ponderación	Valor
RMD	<b>Descripción del macizo rocoso</b> Aspecto del talud del disparo, tomando en cuenta los principales sistemas de fracturas.	Poco consolidado	10
		Diaclasado en bloques de 0,5 m	20
		Diaclasado en bloques de 1 m	30
		Diaclasado en bloques mayores a 1 m	40
		Masivo	50
JPS	<b>Espaciamiento entre fracturas</b> Estimar un valor promedio para todo el talud.	Pequeño (< 0,1 m)	10
		Intermedio (0,1 – 1 m)	20
		Grande (>1 m)	50
JPO	<b>Orientación de los planos de fractura</b> Observar los principales sistemas de fractura.	Horizontal	10
		Manteo hacia la cara	20
		Rumbo normal a la cara	30

		Manteo contra la cara	40
SGI	<b>Densidad de la roca</b> De cada tipo de roca.	SGI = 16 SG – 25 SG = Densidad de la roca (Ton/m <sup>3</sup> )	
HD	<b>Dureza de la roca</b> Facilidad de la roca al fracturamiento.	Se desgrana con un golpe de martillo	1
		Se fractura con un golpe de martillo	1 – 3
		Requiere más de un golpe para fracturar	3 – 6
		Sólo se astilla con los golpes de martillo	>11
FC	<b>Factor de carga (g/Ton)</b>	<b>2* (RMD+JPS+JPO+SGI+HD)</b>	

Tabla 7. Criterio de clasificación de macizo rocoso para Voladura. Modificado de Lilly (1986).  
Fuente: Moraga (2018).

### 2.2.5. Frecuencia de las caídas y su distribución

A fin de poder evaluar e interpretar la probabilidad de futuros procesos de desprendimiento y caída de rocas, se requiere comprender las condiciones y procesos que lo controlan lo que es particular para cada área de interés, bajo este principio se puede examinar y cartografiar los reportes históricos, realizar un análisis de las características y circunstancias geológicas, topográficas, e hidrológicas asociadas y reportadas con anteriores eventos, estableciendo cuáles de estos se dieron bajo circunstancias naturales, o artificialmente creadas antrópicamente, siendo estas las más probables a producir este tipo de eventos a futuro.

Una consideración a evaluar es el efecto del uso actual del suelo, en las áreas con caída de bloques frecuente, dado que pueden estar asociadas a ciertos procesos de intervención como lo son los cortes de carreteras o excavaciones, en donde se puede presentar una relación crítica de altura con inclinación de taludes, esta evaluación da una directriz de los diferentes factores que han contribuido al desprendimiento del bloque. Siendo la observación de campo la que mayor información suministra sobre las condiciones del fenómeno desarrollado y este proceso a que está relacionado en cada inventario. (Pomeroy, 1978)

### 2.2.6. Inclinación de la pendiente

La influencia del grado de pendiente sobre el cual se dan las caídas es una de las variables más fáciles de comprender. Generalmente, las pendientes más pronunciadas tienen mayor probabilidad de caídas. Esto no impide que también ocurra en pendientes suaves. Otros factores pueden contribuir a que una pendiente suave sea especialmente propensa a fallar y bajo este criterio tiene un

potencial relativamente alto de amenaza, es bajo condiciones de aguas subterráneas cercanas a la superficie y materiales como suelos arenosos, se podría presentar licuefacción durante un terremoto o el desplazamiento del bloque, esto puede causar caídas en pendientes tan pequeñas como del 5 % a 10 %, en sentido inverso, las pendientes más pronunciadas pueden no ser siempre las más peligrosas. Las pendientes pronunciadas son menos proclives a estas condiciones, de manera general en condiciones naturales que corresponden a materiales duros con alto nivel de estabilidad. (OEA, 1993)

### **2.2.7. Hidrología**

El agua se reconoce como una variable no controlable y factor condicional en las condiciones de estabilidad de las pendientes, casi tan importante como la gravedad. La información sobre nivel freático y sus fluctuaciones, raramente se encuentra disponible, lo que genera condiciones de amenaza por caídas y otro tipo de deslizamientos, se pueden usar medidas indirectas que pueden mostrar la influencia de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas del área, tal como la vegetación, la orientación de las pendientes (aspecto), o zonas de precipitación.

El tipo y densidad de vegetación frecuentemente reflejarán las variaciones en las aguas subterráneas de un área determinada; ciertas especies buscan el agua (freatófilas). La presencia de estas especies sugiere un nivel freático cerca de la superficie y presencia de manantiales. En las regiones montañosas, los diferentes microclimas producen diversas condiciones hidrológicas que, a su vez, producen comunidades de plantas que varían de acuerdo con la cantidad de humedad disponible a la pendiente y su distribución durante el año.

La orientación de las pendientes (aspecto) se refiere a la dirección hacia la cual da cara a la pendiente. Puede ser una medida indirecta de la influencia climática sobre las características hidrológicas del paisaje. Algunas características importantes asociadas con las caídas de rocas y otros deslizamientos están relacionadas con factores tales como la recarga de aguas subterráneas resultante de los vientos dominantes y su influencia sobre las tormentas locales frontales o de la nieve acumulada en zonas con influencia de esta. En otros casos, una pendiente puede experimentar un mayor número de ciclos, hielo/deshielo o húmedo/seco, lo cual puede reducir la resistencia del suelo y hacer más susceptible a caídas y deslizamientos en el área. De forma general,

debido a la complejidad de estos factores y las actividades de desarrollo existentes, usualmente no hay una correlación directamente observable entre la orientación de la pendiente y esta amenaza.

### **2.2.8. Factores antrópicos**

Además de los fenómenos naturales, las actividades desarrolladas por los humanos pueden aumentar la tendencia natural para que ocurra estos procesos, que pueden ser la resultante de las denominadas actividades de desarrollo, las que usualmente se relacionan al aumento de humedad o pérdida completa de esta, cambio de forma de la pendiente, cortes y taludes artificiales con condiciones de diseño no adecuadas, cortes y rellenos a lo largo de los caminos y la supresión de toda vegetación, pueden alterar enormemente la forma de la pendiente y las condiciones de las aguas subterráneas. (Swanson & Dyrness, 1975), Así estas condiciones de alteración, están relacionadas con el aumento significativo de los actuales niveles de deslizamientos. ((Varnes, 1978)

### **2.3. Mecanismo de fragmentación de la roca**

Castilla, J. (2013), indica que en la detonación de un explosivo se pueden diferenciar dos fases: Una primera fase, representada por la presencia de una onda de detonación de mayor o menor velocidad, la que se caracteriza por el poder de fragmentación o de rotura del explosivo, y la segunda fase, representada por la formación de un gran volumen de gases a elevada temperatura y velocidad. Cuando el explosivo se encuentra confinado dentro de un barreno y se detona, se genera la onda de detonación que se propaga a través de la roca circundante. En un punto próximo al barreno, esa onda de detonación produce un efecto de compresión al llegar al mismo, pero al sobrepasarlo, ese esfuerzo se convierte en un esfuerzo de tracción. Esta primera onda de choque recorre la roca circundante a velocidades entre 3.000 y 5.000 m/s, con esta consideración puede decirse que la fragmentación de la roca se debe a estos dos fenómenos:

- Reflexión de las ondas de compresión.
- Expansión de los gases.

Cuando una onda de compresión llega desde un medio de mayor impedancia característica a otro de menor impedancia, parte de ella se transmite a este como onda de compresión, pero otra parte

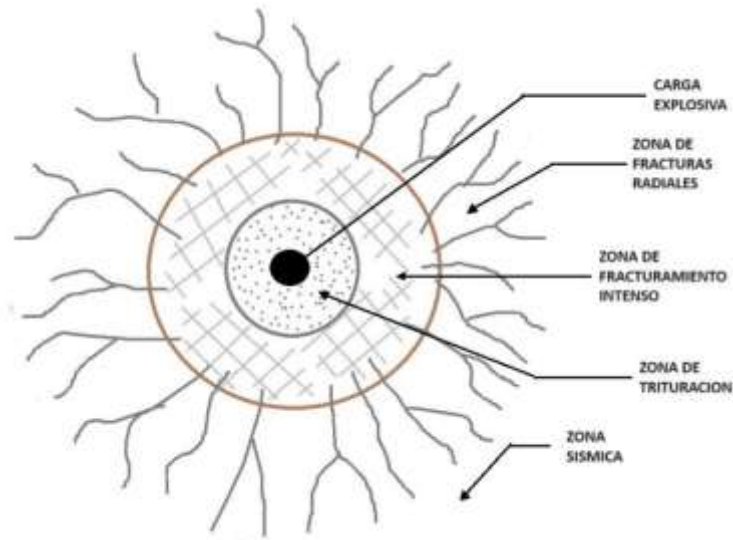
se refleja hacia atrás como onda de tracción, entendiéndose por impedancia característica, el producto de la densidad del medio por la velocidad de propagación de la onda en el mismo. Así, se puede diferenciar entre la impedancia característica de la roca y del explosivo. De este principio se establece de manera genérica que, cuanto más blanda es la roca, la velocidad de propagación de las ondas es menor, donde la impedancia característica hace referencia a la oposición que el bloque de roca presenta ante el avance de una onda de presión (la onda generada por la detonación del explosivo).

Para observar el mecanismo de fracturación de la roca, se puede realizar un ensayo consistente en la detonación de un único barreno, sin ningún tipo de cara libre, de modo que se concluye que en la zona anexa al barreno se han producido los siguientes fenómenos:

- Ensanchamiento del barreno por rotura plástica de la roca, motivado por el efecto de compresión de la onda de detonación.
- Creación de fisuras (a veces microfisuras) generadas por ese efecto de tracción de la onda de detonación. Estas fisuras son de tipo radial y a veces muy difíciles de observar.

En el caso de los bloques en los que hay caras libres en los alrededores del barreno, la onda de choque será reflejada a esa superficie, produciendo sobre ella un esfuerzo de tracción, encontrando la roca una libertad de desplazamiento que permite la ampliación del radio de fisurado y fracturamiento de la roca en sus caras libres (en tanta mayor profundidad cuanto mayor es la carga y su grado de confinamiento, mayor potencia y poder rompedor del explosivo y menor es la distancia a la cara libre).

La Imagen 5. Tipos de fisuras en las proximidades del barreno. Muestra las zonas de fracturamiento que se generan en el bloque, en las proximidades del barreno.



*Imagen 5. Tipos de fisuras en las proximidades del barreno.  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).*

A esta primera fase de formación de grietas y desconchamiento le sigue una segunda fase, más lenta, en la cual los gases del explosivo a elevada presión y temperatura penetran por estas fisuras originalmente creadas por la onda de detonación, abriéndolas totalmente y lanzando la roca hacia adelante en su frente libre.

### **2.3.1. Factores que influyen en el mecanismo de rotura de la roca**

Dentro del mecanismo de rotura de roca son diversos los factores que tienen influencia directa en la fractura del macizo rocoso o bloques de roca, donde se pueden distinguir efectos diferentes, en que los factores pueden diferenciarse entre factores intrínsecos a la roca, o bien, factores propios de los explosivos a utilizar.

En el desarrollo de una voladura no es posible actuar sobre el primer factor (el macizo rocoso o el bloque de roca), el éxito de los resultados de una voladura está en escoger el mejor explosivo para cada tipo de roca, de donde surge la inquietud en determinar cuál es el mejor tipo de explosivo, existiendo diversidad de explosivos y opiniones, la dificultad no viene en escoger el mejor explosivo, sino en escoger el explosivo más adecuado para el macizo rocoso o el bloque a volar o fracturar. (Krynine et al., 1972).

### 2.3.2. Influencia de las características de la roca

Las rocas responden de forma muy diferente a la onda de detonación generada por el explosivo en lo que respecta a la primera etapa de formación de fisuras, primordial y origen del fenómeno de rotura y fragmentación. Generalmente, se relaciona la volabilidad de una roca con su dureza. Una roca más dura exige una mayor cantidad de explosivo para ser volada. Esto no es exacto, ya que además del término dureza, se debe incluir el aspecto fragilidad, siendo esta la tendencia de la roca a romperse con poca o ninguna deformación antes de la fractura, una roca frágil es menos resistente a la tensión y se rompe fácilmente cuando se somete a una fuerza o explosivo.

En el extremo opuesto, una roca blanda elástica absorbe la onda de detonación deformándose sin fisurarse y, en consecuencia, la actuación de los gases del explosivo en la segunda etapa queda disminuida. Un ejemplo muy ilustrativo de estos extremos se presenta en el uso de cargas de explosivo adosadas a rocas para su taqueo. En el contexto de voladura, el taqueo o taco, describe el material colocado en la parte superior del barreno, lo que confina la explosión y mejora la fragmentación. Este material puede ser tierra, arena, arcilla, siendo este último el más adecuado para esta actividad.

La Fotografía 1. Taqueo o taco ubicado en bloque, muestra un barreno en la roca, además de las tendencias de fragilidad, la tendencia a romperse y deformación de esta.



*Fotografía 1. Taqueo o taco ubicado en bloque*

*Fuente: <https://www.jjminero.com/servicio/reduccion-secundaria-de-bolones>. (2022)*

La Fotografía 2. Taqueo o taco ubicado en bloque, junto con línea de tiro, muestra un bloque de roca barrenado (perforado hasta la mitad del bloque, el cual se encuentra cargado, taponado y preparado para voladura), en el cual se encuentra en la parte superior el barreno, en el cual se ubica el taqueo o taco, el cual cumple la función de mantener la presión y la confinación de los gases, además se observa la línea de tiro, la cual corresponde al cable que se observa, el cual cumple con la función de controlar los tiempos de la detonación.



*Fotografía 2. Taqueo o taco ubicado en bloque, junto con línea de tiro*  
Fuente: <https://www.jjminero.com/servicio/reduccion-secundaria-de-bolones>. (2022)

En este caso, el trabajo de los gases es nulo, dado que la carga no se encuentra confinada. Su rotura se debe tan solo a la energía cedida a la roca por efecto de la onda de choque. Las rocas extremadamente duras, pero frágiles rompen bien, mientras que las rocas blandas y elásticas apenas se fragmentan.

#### **2.4. Factores que afectan el diseño de la voladura**

Previamente, al desarrollo y cálculo de una voladura, es necesario diferenciar aquellos aspectos sobre los que es posible actuar y orientar acorde a los condicionantes de aquellos aspectos que no

pueden ser modificados, de esta manera es posible distinguir diferentes factores que deben ser considerados y asumidos, aplicando conceptos generales, o fórmulas más o menos desarrolladas para el cálculo de voladuras, las que se derivan de modelos y generalizaciones de pruebas en medios heterogéneos, actuando con cautela en la aplicación de las mismas, así como hacer todas las pruebas necesarias para comprobar que dichas condiciones son aplicables al macizo rocoso o el bloque que se va a intervenir.

El Diagrama 12. Factores que afectan el diseño de la voladura. Muestra los diferentes factores que afectan el desarrollo de una voladura y cuya aproximación se realiza a partir de modelos y algoritmos físicos y matemáticos.



Diagrama 12. Factores que afectan el diseño de la voladura  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

**Factores de rendimiento de la voladura:** El diseño de voladuras es una técnica basada en la aplicación de técnicas de cálculo en un medio heterogéneo, cuyos resultados influyen en el desarrollo del método de voladura. Así, es importante resaltar que para evaluar los resultados de una voladura es necesario saber qué es lo que se requiere del diseño, se puede decir que la voladura es exitosa si el resultado coincide con los objetivos de fragmentación y desplazamiento planteados,

además, de no afectar los elementos que circundan la voladura. Para lograr el objetivo y evaluar el rendimiento de la voladura, se deben tener en cuenta los siguientes tres factores:

- **Cantidad de energía:** Los resultados deseados dependen de la cantidad de explosivo adecuada en cada caso.
- **Distribución de energía:** El explosivo es un producto que implica la transformación de energía química en energía mecánica, de modo que una mala distribución puede dar lugar a una fragmentación no deseada o bien a concentraciones de energía que afecten a elementos ajenos a la voladura.
- **Confinamiento de energía.** Para un adecuado trabajo del explosivo es necesario que el gas generado esté confinado en el barreno, de modo que la pérdida de energía por este hecho sea mínima. Obteniendo tres conceptos íntimamente relacionados entre sí, de forma tal que el desequilibrio o la falta de uno de ellos, hace que el rendimiento no sea el deseado.

**Factores geométricos:** Dentro de los factores controlables de la voladura pueden considerarse los que están directamente relacionados con el método, de modo que se pueden definir a medida de los resultados buscados. Estos son: el diámetro del barreno o de la carga, la longitud de barreno, la inclinación de barreno, el número de barrenos y la distribución de los barrenos.

**Factores inherentes a la Roca:** A diferencia de los factores anteriores, el bloque rocoso es un medio heterogéneo por definición. Desde esta perspectiva, existen parámetros que no se pueden controlar, pero es fundamental tener en cuenta para un rendimiento óptimo. Entre los factores se encuentran: la densidad de la roca, la resistencia o dureza de la roca y la velocidad sísmica del macizo rocoso.

**Factores inherentes al explosivo:** Existe otro grupo de variables sobre los que es necesario actuar para el diseño de una voladura. Estos son los factores inherentes al explosivo son los siguientes: la densidad del explosivo, la velocidad de detonación, la presión de detonación, la potencia del explosivo, la carga del explosivo, la secuenciación de la voladura

## 2.5. Criterios de selección del explosivo

La elección del tipo de explosivo es parte importante del diseño de la voladura y en consecuencia, el tipo de explosivo determina los resultados a obtener en la operación de fragmentación o voladura, dentro de estos criterios encontramos: el precio del explosivo, el diámetro de carga, las características de la roca, el volumen de la roca a volar y las condiciones atmosféricas

- **Precio del explosivo:** Elegir el explosivo adecuado a cada criterio con el que se pueda realizar la voladura, no hay que olvidar que el objetivo de la voladura es realizar la fragmentación, arranque o corte a costo mínimo, se destaca que la perforación en rocas duras es una operación muy costosa y se compensa con el uso de explosivos de costo mínimo, con más potencia o cargas formadas por explosivo denso de alta energía en el fondo y uno menos denso de energía media en la columna.
- **Diámetro de carga:** Al usar explosivos con velocidad de detonación que varíen con el diámetro, como el ANFO, hay que tener en cuenta que si se usan barrenos con diámetro menor a 50 mm, es preferible el uso de hidrogeles a pesar del mayor precio.
- **Características de la roca:** Las propiedades geomecánicas del bloque rocoso son las variables más importantes, por su influencia directa en el resultado de la voladura y su interrelación con las otras variables.
- **Volumen de la roca a volar:** La resistencia y el volumen de la roca a volar define el consumo de explosivo, dentro de la operación de voladura.
- **Condiciones atmosféricas:** Las bajas temperaturas pueden influir en los explosivos. Aquellos que tienen nitroglicerina, en temperaturas inferiores a 8 °C, tienden a congelarse. Por otra parte, las altas temperaturas generan la exudación del explosivo. En el caso del ANFO, este no es afectado por bajas temperaturas y en un ambiente caluroso se debe controlar la evaporación del combustible.

## 2.6. Parámetros de voladura

El cálculo correcto del patrón de voladura con el objeto de fragmentar rocas ha evolucionado, con el paso del tiempo se han destacado distintas teorías y ecuaciones, en donde es posible aplicar diferentes métodos de cálculo con el objeto de analizar y escoger el que mejor se adapte

a los requerimientos del evento. A continuación, se describen los distintos métodos de cálculo y ecuaciones que intervienen para el cálculo de voladura.

### **2.6.1. Análisis de voladura**

Para el diseño de la voladura de bloques de roca, se necesitan datos como la dureza de la roca, para la elección adecuada del diámetro del barreno a emplear en la perforación. Partiendo de la elección del diámetro del barreno, se elige el tipo explosivo a usar en función de los parámetros de la roca. La sustancia explosiva más empleada es el ANFO.

Después de obtener los parámetros de la roca se aplica alguno de los métodos propuestos para el diseño de voladura, entre los que se destaca el método de proporcionalidad, de López-Jimeno, Langefors, el método sueco y el método de Konya, se resalta que al calcular mediante varios métodos de diseño se obtienen varios espectros de análisis y de comparación entre ellos permitiendo tener más de un criterio a utilizar.

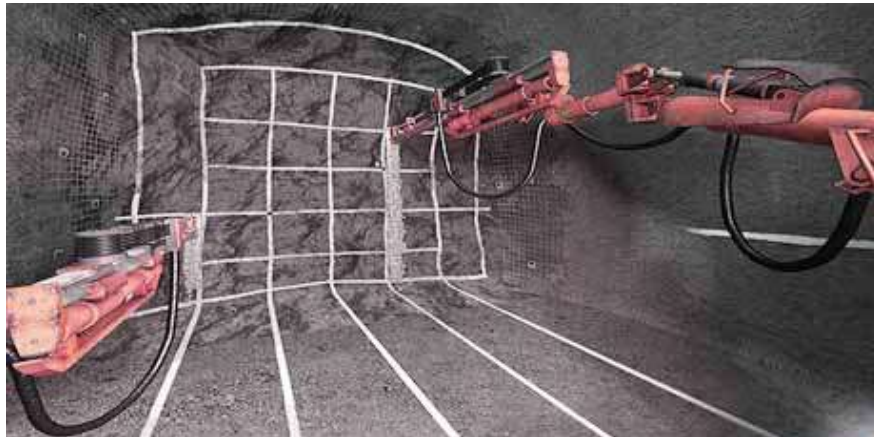
En el análisis de voladura se destacan tres aspectos fundamentales para su óptimo desarrollo, destacándose el diámetro del barreno de perforación, la elección de la sustancia explosiva a utilizar y las cargas en barrenos:

- **Diámetro del barreno de perforación:** El primer paso para el diseño de la voladura es la evaluación de parámetro: coeficiente de resistencia o fortaleza de la roca, posteriormente se calcula el diámetro del barreno, con el que se calculan los parámetros de la voladura a partir de diferentes métodos, los cuales parten principalmente de la elección de la sustancia explosiva, volumen de roca a fragmentar y los parámetros geo mecánicos del bloque rocoso.
- **Elección de la sustancia explosiva a utilizar:** Acorde a la diversidad de sustancias explosivas, encontramos diferentes criterios y análisis que pueden validar la utilización de una u otra sustancia, aunque se resalta que en la mayoría de los casos el principal criterio en el que se basan los profesionales al hacer la elección de la sustancia explosiva es el precio, sin decir con ello que hay que quitar importancia a otros criterios que son de análisis fundamental. En nuestro caso particular la sustancia a usar es el ANFO, en vista de que el

precio es una variable indirecta que influyen en la elección de la sustancia explosiva, en donde se recomienda el uso de ANFO, por diferentes razones como lo son: bajo costo, fácil adquisición en el mercado, condiciones de seguridad, facilidad de almacenamiento y manipulación, características de la voladura dado que el bloque de roca no contiene agua.

- **Cargas en barrenos:** Las cargas en barrenos en el arranque en voladuras a cielo abierto se pueden aplicar cuando la altura de la terraza no excede de los cinco (5) metros y cuando es necesario proteger y conservar la estructura como el talud. En este caso se puede perforar barrenos con diámetros hasta 75 mm, siendo recurrentes las perforaciones entre 30 y 50 mm, dependiendo de la dureza de la roca, y se pueden ubicar en una o varias filas.

Fotografía 3. Disposición típica de una malla de perforación: muestra la perforación de barrenos en una malla de perforación típica para el desarrollo de voladuras subterráneas o en un talud, además se muestra el brazo del equipo de perforación usado, los cuales típicamente son neumáticos o hidráulicos.



*Fotografía 3. Disposición típica de una malla de perforación*

*Fuente: <https://nubeminera.cl/curso/diseño-de-diagrama-de-disparo-ug-ddug/>. (2017).*

La Fotografía 4. Disposición típica de un barreno en un bloque de roca: muestra un barreno perforado para el desarrollo de una voladura a cielo abierto en un bloque de roca.



*Fotografía 4. Disposición típica de un barreno en un bloque de roca*

*Fuente: <https://www.canarias7.es/canarias/gran-canaria/las-palmas-de-gran-canaria/hallan-barreno-olvidado-detonador-explotar-frente-maritimo-20231006170737-nt.html>. (2023)*

## **2.6.2. Cálculos usados en voladura**

Para el cálculo de los parámetros de carga en fractura de bloques, se pueden utilizar diferentes métodos, los cuales se fundamentan en diferentes principios matemáticos, en donde los métodos de cálculo más frecuentes, sus resultados pueden dar una aproximación a los impactos como el nivel de vibraciones, la longitud de afectación de la onda producto de la voladura y la predicción del tamaño medio de fragmentación, esto según lo establecido en el modelo Kuz-Ram. (Caguana & Tupacyupanqui, 2013)

Dentro de los métodos de cálculos más frecuentes para la aproximación del comportamiento de la voladura encontramos: el método del principio de proporcionalidad, el método de López y Jimeno, el método de Langefors, el método sueco y el método Konya. (Caguana & Tupacyupanqui, 2013)

- **El principio de proporcionalidad:** Según el principio de proporcionalidad, para calcular las cargas del barreno, cada uno de los parámetros debe ser verificado con relación a la línea de menor resistencia. (Caguana & Tupacyupanqui, 2013), en donde la línea de menor resistencia o piedra, se entiende como la distancia existente entre el barreno hasta la cara libre del frente, la cual es medida normalmente a esta. La línea de menor resistencia de acuerdo al principio de proporcionalidad se obtiene mediante la ecuación de Langefors & Kihlstrom desarrollada en 1963. (Langefors & Kihlstrom, 1976), en este

método el gasto específico de explosivo se puede tomar de la tabla de Gasto Específico en dependencia del coeficiente de fortaleza de la roca, la cual se obtiene de los resultados de pruebas para cargas de fragmentación.

La Tabla 8. Gasto Específico en dependencia del coeficiente de fortaleza de la roca, nos muestra la relación que hay entre la altura de la capa y el gasto específico de explosivo, valor que se toma a partir de los resultados obtenidos con una serie de explosiones experimentales realizadas con Amonita 6JV, para luego ajustar a las condiciones reales. Este cálculo de parámetros de carga, se estableció para fracturamiento o arranque a cielo abierto, donde además se determinaron las vibraciones y longitud de afectación de la onda producto de la voladura y la predicción del tamaño medio de fragmentación según el modelo Kuz-Ram.

Altura de la capa o cara del bloque (m)	Gasto específico kg / m <sup>3</sup>						
	2 - 3	4	5 - 6	8	10	15	20
0.5	0.72	0.72	0.82	0.82	1	1.15	1.15
1	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.60	0.65
2	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.55	0.60
3	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.55	0.60

Tabla 8. Gasto Específico en dependencia del coeficiente de fortaleza de la roca  
Fuente: Otaño. C. (2013).

- **Método de López-Jimeno:** Este método fue propuesto en 1994, el cual se basa en diseñar el patrón de voladura en función del diámetro seleccionado para la perforación de los barrenos y en la resistencia a compresión simple expresada en MPa.

La Tabla 9. Patrones de voladura, expresados en función del diámetro de los barrenos, muestra los valores rápidos para los parámetros necesarios en el desarrollo de la voladura.

Variable de diseño	Resistencia a la compresión simple (MPa)			
	Blanda	Media	Dura	Muy Dura
	< 70	70 - 120	120 - 180	> 180
Línea de menor resistencia – W	39D	37D	35D	33D
Espaciamiento – a	51D	47D	43D	38D
Longitud de relleno - L <sub>r</sub>	35D	34D	32D	30D
Longitud de sobreperforación - L <sub>s</sub>	10D	11D	12D	12D

Tabla 9. Patrones de voladura, expresados en función del diámetro de los barrenos  
Fuente: Otaño. C. (2013).

- **Método de Langefors:** Langefors y Kihlstrom proponen una ecuación para calcular el valor de la piedra máxima «B max» o también llamada línea de menor resistencia W y el grado de fijación de los tiros, donde, el valor del grado de fijación de los tiros depende de la inclinación de los tiros. Estos son: F = 1 cuando el tiro es vertical, F = 0.9 para tiros de 70 grados y F = 0.85 para tiros de 63 grados.

$$B \text{ max} = (D/ 35.6) * ( ( P * S) / ( C * F * EV) )^{1/2}$$

*Ecuación 2. Ecuación de Langefors y Kihlstrom*

*Fuente: Otaño. C. (2013).*

*Donde :*

*D: diámetro de perforación en mm*

*P: grado de retardo, que es la cantidad de carga en Kg/dm<sup>3</sup> del volumen nominal del tiro.*

*S: Potencia relativa en Peso del explosivo y está entre 1 – 1.4*

*F: grado de fijación de los tiros. Depende de la inclinación de los tiros.*

*C : constante específica de la roca. C = 0.4 para voladura a cielo abierto y rocas duras.*

- **Método Sueco:** Propuesto por Gustafson en 1973, y modificado posteriormente, para la perforación de barrenos, propone que la línea de menor resistencia se puede calcular mediante ecuaciones y a partir del cálculo de la línea de menor resistencia, se calculan los parámetros de cualquier diseño de la voladura, a cielo abierto y sobretamaños (bloques).

$$B = (0.041 \cdot De) - (0.05 + (0.03 \cdot (H/\text{Cos}\beta)))$$

*Ecuación 3. Ecuación de Gustafson*

*Fuente: Otaño. C. (2013).*

*Donde:*

*B : línea de menor resistencia (m)*

*De : Diámetro del cartucho (mm)*

*H : Altura del banco a explotar*

*B : Inclinación de los barrenos con respecto a la horizontal*

- **Método Konya:** Este método es propuesto por Konya y Walter en 1990, ellos proponen una ecuación para hallar la línea de menor resistencia que da valores bastante similares al valor calculado por el método Sueco, esta ecuación no contiene potencias y es el más usado en campo, se diferencia de los anteriores métodos al tomar en consideración los parámetros estructurales y de depósito de la roca.

$$Bc = 1,5 + \left[ \frac{2Pe}{Pr} \right] * De$$

$$B = Bc * Kd * Ks$$

*Ecuación 4. por Konya y Walte*

*Fuente: Otaño. C. (2013).*

Dónde:

$B_c$  : línea de menor resistencia calculado (m)

$P_e$  : densidad del explosivo (Kg/cm<sup>3</sup>)

$P_r$  : densidad de la roca (Kg/cm<sup>3</sup>)

$D_e$  : diámetro del cartucho

$B$  : línea de menor resistencia corregida (m)

$K_d$  : parámetro de depositación de la roca en el macizo

$K_s$  : parámetro estructural del macizo

La Tabla 10. Valores de  $k_d$  - parámetro de depositación de la roca, muestra los valores de  $k_d$ , para diferentes depósitos.

Depositación de la roca	$K_d$
Roca depositada en bancos	1.18
Roca depositada en cara del banco	0.95
Otros casos de depositación	1

Tabla 10. Valores de  $k_d$  - parámetro de depositación de la roca

Fuente: Otaño. C. (2013).

La Tabla 11. Valores de  $K_s$  – parámetros estructurales de la roca, muestra los valores de  $K_s$ , para diferentes tipos de estructuras.

Estructura de la roca	$K_s$
Altamente fracturado, con juntas débiles y capas pobremente cementadas	1.3
Capas bien cementadas con juntas fuertes	1.1
Roca masiva intacta	0.95

Tabla 11. Valores de  $K_s$  – parámetros estructurales de la roca.

Fuente: Otaño. C. (2013).

- **Modelo Kuz Ram:** Uno de los parámetros más importantes de conocer y quizás el más cuestionado en lo referente a las variables para obtener una buena estimación de la fragmentación, es el tamaño medio de fragmentación X50 (tamaño de partícula que se representa con el promedio del tamaño de los fragmentos resultantes de una operación de voladura), en donde la ecuación propuesta por Kuznetsov, es la más conocida por pertenecer al denominado modelo predictivo en donde el modelo más utilizado es el de Kuz–Ram. Este modelo contempla valores de resistencia (A) en función de calidad de la roca

La Tabla 12. Valores de A en función de calidad de la roca, muestra los valores de resistencia establecidos por el modelo bajo diferentes condiciones.

<b>Propiedad de la roca</b>	<b>Valor A</b>
Roca dura con poco fisuramiento	13
Roca dura con alto fisuramiento	10
Roca con dureza alta a media	7
Roca con dureza baja a media	3
Roca muy débil	1

*Tabla 12. Valores de A en función de calidad de la roca  
Fuente: Otaño. C. (2013).*

## **2.7. Voladura secundaria**

La voladura secundaria se usa frecuentemente cuando se presentan bloques muy grandes de roca producto de la voladura principal, por procesos de caídas naturales, correcciones de irregularidades en el frente de voladura o correcciones al talud u otras fisuras naturales de las rocas, las cuales por su tamaño se considera un problema su manejo. Dentro de las técnicas de manejo común encontramos la denominada voladora de plasteo y la voladura de cachorro.

### **2.7.1. Voladura de plasteo**

En el plasteo se usa una carga externa, la cual se ubica sobre el bloque de roca a fragmentar y se cubre con una capa protectora de grava, arena o lodo. Cuando se usa plasteo normalmente el uso de las cargas se encuentra entre los 0.3 a 0.6 Kg de explosivo por metro cúbico de roca, la función de la capa protectora es que la carga de explosivo, quede bajo condiciones de confinamiento, esto a fin de que los gases mejoren el proceso de fragmentación, ejerciendo una mayor fuerza sobre el bloque de roca.

La Imagen 6. Esquema de Voladura de Plasteo, se muestra que este tipo de voladura puede ser implementa para la fragmentación de grandes bloques de roca donde la perforación no es factible y consiste en colocar cargas explosivas cebadas, las que se ubican directamente en contacto con la superficie del bloque a fragmentar y posteriormente se cubren con una gruesa capa de grava. Arena, lodo, arcilla o barro, presionándola a mano, para generar condiciones de confinamiento, luego estas cargas se disparan con cualquiera de los sistemas de iniciación conocidos.

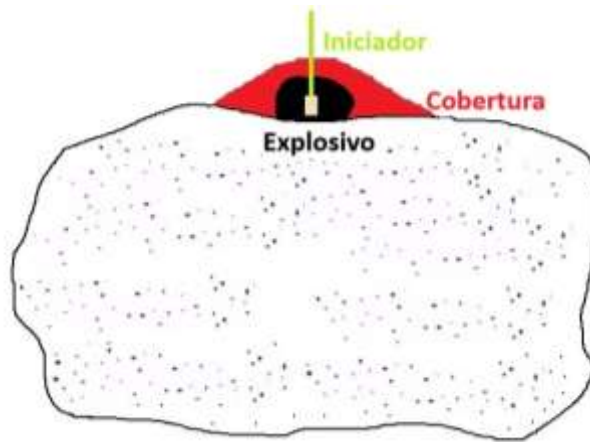


Imagen 6. Esquema de Voladura de Plasteo  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

### 2.7.2. Voladura de cachorro

El cachorro también se denomina taqueo o Pop shots, consiste en realizar perforaciones de pequeño diámetro, usualmente de 20 mm a 50 mm (7/8" a 2" de diámetro), en el centro de gravedad de los bloques de roca, los que se perforan a una profundidad de 1/2 a 2/3 de su espesor, que posteriormente se cargan y disparan con cargas pequeñas de explosivo. Esta carga dependerá del tamaño y dureza del bloque de roca, de su tenacidad y la presencia de planos de fractura.

La Imagen 7. Esquema de voladura de Cachorro, muestra que la perforación se realiza hacia el centro de gravedad del bloque, en donde se ubica la carga para la detonación y fracturación del mismo, en este tipo de voladura secundaria es muy importante la experiencia previa para determinar la carga cuando no se conoce bien el comportamiento mecánico del bloque.

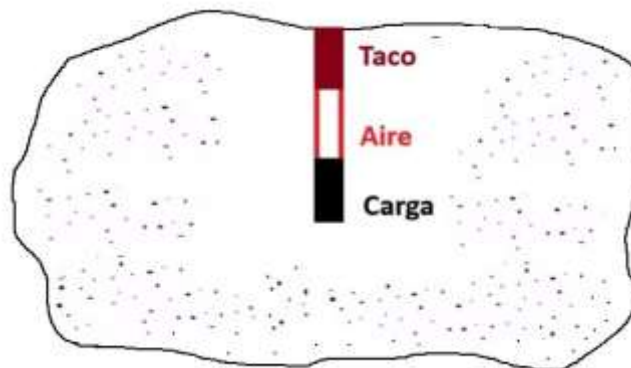


Imagen 7. Esquema de voladura de Cachorro  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

### 2.7.3. Valoración de las vibraciones y longitud de afectación por onda.

Con el objetivo de conocer el alcance de las vibraciones, se aplica la norma internacional UNE22-381-93, aplicada para determinar la distancia a la cual las construcciones cercanas al área de voladura se pueden ver afectadas. Los cálculos se realizan a partir del cálculo de la carga máxima operante.

### 2.7.4. Relación Emulsión – ANFO

La Tabla 13. Relación Emulsión-ANFO, muestra la relación de la cantidad de sustancia explosiva en la emulsión y el ANFO, se resalta que la emulsión cumple una carga de fondo y el ANFO como carga de columna, además la tabla nos muestra los usos más adecuados, como los usos inadecuados de esta relación, acorde a las características estructurales y granulométricas del material.

EXPLOSIVO	MEJOR USO	PEOR USO
Emisión pura	Masivo o sin fisura, duro y formaciones húmedas	Granos sueltos, blanda y formaciones secas
Mezcla 60 / 40 a 70 / 30	Algo fisuradas, medianamente duras y formaciones húmedas	Granos sueltos, blanda y formaciones secas
Mezcla 35 / 65 a 45 / 55	Algo fisuradas, de mediana a dura, formaciones que se pueden desaguar	Extremadamente húmedas (no puede ser bombeada)
ANFO mezcla 20 / 80	Bastante fisuradas, de suave a media, formaciones secas	Masiva o no fisurada, dura y formaciones húmedas
Mezcla 70 / 30	Algo fisuradas, Medianamente duras y formaciones húmedas	Granos finos sueltos, blanda y formaciones secas
Mezcla 20 / 80	Granos finos sueltos, bandas y formaciones secas donde el lanzamiento de la roca es esencial	Masiva o fisurada, dura y formaciones húmedas

Tabla 13. Relación Emulsión-ANFO.

Fuente: Guía de buenas prácticas en el diseño y ejecución de voladuras en banco. (2020)

# CAPITULO 3

## IMPACTOS

En este capítulo se hace una descripción de las características y condiciones de la infraestructura vial colombiana según las evaluaciones y análisis realizados por organismos como el Foro Económico Mundial – FEM, el Índice Global de Competitividad – IGC y FEDESARROLLO, además se hace un recuento histórico de los eventos más importantes destacando las pérdidas y afectaciones que han dejado estos cierres viales, posteriormente se hace una reconstrucción histórica de los casos ocurridos en la vía al llano, finalizando con un análisis de las encuestas realizadas sobre las apreciaciones y percepción de los pobladores sobre las afectaciones generadas por los eventos ocurridos en este corredor vial, encuesta desarrollada a pobladores de los municipios de: Cáqueza, Quetame, Monterredondo y Guayabetal.

### **3.1. Vías en Colombia**

Las vías son las arterias de circulación y movilidad del transporte de insumos, mercancías y pasajeros en el país, pero dadas las características geográficas, de Colombia y las necesidades de comunicación entre los distintos entes territoriales, centros de producción, manufactura y consumo, se requiere un flujo dinámico y permanente que interconecte los diferentes entes territoriales, por otra parte, el Gobierno Nacional, en compañía del sector privado, ha venido implementando estrategias que buscan promover la inversión en el territorio nacional, con el fin de articular operaciones de comercio exterior, y así vender al país como centro de desarrollo y crecimiento; esta necesidad de competitividad ha traído consigo un inminente crecimiento los flujos vehiculares sobre la antigua y deteriorada infraestructura vial del país, pese a estas perspectivas no se evidencia un crecimiento adecuado de la infraestructura vial, siendo bajo a inexistente, se han venido desarrollando diseños de diversos proyectos viales, viaductos y túneles los cuales no se han materializado o dependen estrechamente de la infraestructura actual.

Desde esta perspectiva y en un proceso de comercio globalizado nuestra infraestructura vial no es competitiva, generando altos costos de transporte en una inestable red vial, causando grados de incertidumbre en los tiempos de transporte de insumos industriales y materiales, casados por

cierres debidos a procesos de movimientos en masa, lo que lleva en muchos casos al deterioro de las mercancías o penalidades y sanciones económicas por incumplimientos en los tiempos de entrega.

De acuerdo con los estudios y pese a los avances de los últimos años, en términos de infraestructura vial, Colombia se reconoce a nivel internacional como uno de los países más atrasados en esta temática, estos estudios abarcan y engloban de manera general las carreteras, vías férreas, puertos y aeropuertos. En lo referente al aspecto vial, a lo largo de la historia, se han construido kilómetros de vías en la red vial nacional, pero aun así persisten los problemas de desarrollo, posicionando a Colombia, en esta temática con uno de los peores indicadores.

Según el Foro Económico Mundial (FEM) en el 2011, Colombia a nivel general ocupaba el puesto 101 entre 139 países evaluados, en cuanto a la calidad de infraestructura vial, siendo de las inferiores entre los países de Latinoamérica. (Zamora & Barrera, 2012) Haciendo un análisis más detallado de esta evaluación Colombia ocupa el puesto 97 en la relación a los km/Habitante, con una densidad de carreteras pavimentadas de 0.013 km/km<sup>2</sup>, siendo de las menores de América; en calidad de infraestructura ocupa el puesto 101, estando por debajo de países como Chile (37), México (57), Brasil (67), Uruguay (75), Argentina (89) y Ecuador (99) y solo con una calificación superior a países de la región como Bolivia (122), Venezuela (123) y Paraguay (138). (Indicadores calculados por el Foro Económico Mundial FEM). (García, 2011) en (Del Corral et al., 2014)

Para el año, 2017 el Índice Global de Competitividad (IGC) expone que Colombia ocupa el puesto 61 de 138 países, asegurando que una de sus mayores falencias es el tema de la infraestructura, pues, a pesar de las inversiones que se le ha realizado a este sector, la calidad es deficiente, lo que hace que en el aspecto de infraestructura vial ocupen el puesto 84. (ANIF - Asociación Nacional de Instituciones Financieras, 2017).

Por otra parte, una investigación publicada por FEDESARROLLO en el año 2013 demuestra que Colombia presentó un déficit de 45 mil kilómetros de vías, los que corresponden al 26 % del total, lo que supone que alcanzar esas cifras llevaría a un desarrollo vial adecuado acorde a las características del país. (Yepes et al., 2013). Actualmente, no existe un consenso sobre los datos de kilómetros pertenecientes a la red vial terciaria, dado que no existe un inventario completo de esta,

sin embargo, entidades como el INVIAS, DNP y la ANI han establecido un valor de 142.284 km de los cuales 27.000 km están a cargo del INVIAS, 13.959 km están a cargo de los departamentos y 100.748 km están a cargo de los municipios. (Yepes et al., 2013)

También se carece de un inventario de los km que hacen parte de la red terciaria, además de ser desconocido el estado real de estas vías, que en términos generales se establece es de baja calidad, en un documento del DNP de 2016 se expresa que Colombia solo tiene el 20 % de vías pavimentadas que frente a países como Francia, Singapur e Italia (que poseen el 100 %) demuestra el nivel de atraso y anima a la realización de metas para que Colombia logre niveles similares a los países desarrollados (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. 2016) en (Acosta & Alarcón, 2017).

Se ha teorizado que el rezago de infraestructura vial que tiene Colombia puede estar dado por: la inversión que se le ha entregado tanto en lo privado como en lo público, siendo esta última muy baja a lo largo de la historia; la calidad de la información que existe respecto al sistema de red vial, puesto que entidades como el Ministerio de transporte y el DNP arrojan datos sin soporte alguno de su cálculo y con diferencias entre entidades, sin trazabilidad de su generación (enfaticando las redes secundarias y terciarias), además que aquellas redes viales que han sido actualizadas son únicamente las que están a cargo del INVIAS dejando el restante sin ninguna información concreta; evidenciando la distribución centralizada que existía en las vías en el país. (Yepes et al., 2013).

Por otra parte, FEDESARROLLO en el marco de la novena versión del Congreso Nacional de Infraestructura, ha puesto en manifiesto que el actual atraso en infraestructura vial, se ha convertido en una de las limitantes para el crecimiento en diversas actividades económicas, según el informe presentado en el año 2016, Colombia es uno de los países en Latinoamérica más atrasados en materia de infraestructura de transporte, superando tan solo a Haití y Nicaragua, esta evaluación se realiza tomando el ranquin de indicadores de Competitividad Global del Foro Económico Mundial, en el que se expone que la infraestructura vial colombiana ha perdido competitividad y se ha quedado rezagada en la región. . (Yepes et al., 2013).

Según el INCO (ahora ANI) y el INVÍAS, entre los años 2006 y 2010 se aumentó en 4.724 km la red vial nacional, entre los años 2002 y 2009, de acuerdo con la Cámara Colombia de la Infraestructura, la extensión de las dobles calzadas pasó de 52 km a 726 km, pero el país aún cuenta con una red

precaria, insuficiente y con bajos niveles de modernización de infraestructura vial, presentando baja o limitada movilidad y altamente afectada por los movimientos en masa. (García, 2011)

Según datos del reporte de Emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y como se dijo anteriormente, la región Andina es donde mayor riesgo por deslizamiento existe, debido a que existen dos temporadas invernales cada año, con un total de 4.943 de vías afectadas. Los datos por desastre confirman lo anterior. (Baena et al., 2019). Algunos casos presentados en la región Andina se muestran a continuación:

### **3.2. Eventos Históricos**

Exceptuando los cierres y bloqueos viales de índole social, la historia de los cierres viales del territorio nacional ha estado estrechamente relacionada con los eventos y dinámicas naturales que tuvieron como consecuencia la generación de grandes pérdidas económicas tanto a nivel local como regional. Entre los eventos que pueden causar cierres parciales, temporales o totales a un corredor vial se destacan los sismos, maremotos, huracanes, inundaciones, crecientes de ríos, reactivaciones y erupciones volcánicas, emergencias invernales y deslizamientos, siendo este último el evento más recurrente y de mayor incidencia en el país.

Tabla 14. Comparativo de daños y pérdidas por desastres de alta y baja magnitud ocurridos en Colombia entre los años 1970 y 2012, en donde se pueden observar que los eventos de altas y bajas magnitudes, en donde se destaca que los eventos más frecuentes y de bajas magnitudes son los que ocasionaron las mayores pérdidas.

Clasificación / Intensidad	Desastre	Año	Muertes	Viviendas destruidas (D) o afectadas (A)	Personas afectadas	Daños estimados en millones USD	Daños estimados como proporción del PIB
Eventos de gran intensidad	Tsunami en la Costa Nariñense	1979	672	3081 (D) 2119 (A)	No disponible	\$ 1.011	0.06 %
	Sismo de Popayán	1983	300	2470 (D) 11722 (A)	20000	\$ 410	0.98 %
	Erupción volcán del Ruiz y avalancha de Armero	1985	Entre 23500 y 28000	4700 (D) 5150 (A)	200000	\$ 1 Billón	0.70 %
	Sismo y avalancha en Cauca Río Páez	1994	1100	No disponible	8000	\$ 150.2	0.18 %
	Terremoto en el Eje cafetero	1999	1186	359490 (D) 43422 (A)	166336	\$ 1,8 billones	1.84 %
	Inundación (La Niña) / (Salgar, Gramalote)	2010 / 2011	1374	No disponible	3500000	\$ 6.3 Billones	2,11 %
Eventos de baja y media intensidad	Acumulación de deslizamientos, inundaciones y otros fenómenos de baja y media intensidad		9954	89337 (D) 185364 (A)	14800000	\$ 2226.7	2.73 %

Tabla 14. Comparativo de daños y pérdidas por desastres de alta y baja magnitud ocurridos en Colombia entre los años 1970 y 2012.

Fuente: EM-DAT, 2017; Aon Benfield, 2017.en (Organisation for Economic Cooperation and Development - OECD, 2019)

La Tabla 15. Afectaciones de la primera temporada invernal 2010, la Tabla 16. Afectaciones de la primera temporada invernal 2011 y la Tabla 17. Afectaciones de la primera temporada invernal 2012, nos muestran un consolidado del desastre de forma generalizada haciendo un consolidado por departamento, en donde se resalta las pérdidas de carácter social, estableciendo para cada departamento el número de muertos, personas afectadas, viviendas destruidas, viviendas con algún grado de afectación y total de hectáreas con cultivos perdidos, este nivel de afectación por departamento se analiza para los años 2010, 2011 y 2012, considerado como uno de los periodos en los que la temporada invernal ha presentado los picos más críticos para el país, en el registro de desastres durante las últimas dos décadas (2000 – 2020).

Año 2010					
DEPARTAMENTO	MUERTOS	PERSONAS	DESTRUIDAS	VIVIENDAS AVERIADAS	No HECTAREAS
Amazonas					
Antioquia	20	52814	35	9989	26
Arauca	1	4676	6	971	
Atlántico	5	38756	177	7872	0
Bogotá	3	7108	2	765	
Bolívar	4	244386	36	49854	3650
Boyacá	6	9246	15	1562	1265
Caldas	5	4425	4	1008	
Caquetá	1	14630	84	3688	123
Casanare		3954		883	
Cauca		16077	27	2396	690
Cesar	5	45902		8775	
Choco	1	43833	38	2168	40
Córdoba		151066	22	25888	
Cundinamarca	4	5200	9	1298	
Guajira	6	32513	105	743	
Guaviare		35		7	
Huila	3	597	1	65	
Magdalena	3	154301	24	24681	1125
Meta	3	13109	18	2422	595
Nariño		24108	26	4930	506
Norte de Santander	6	7771	79	994	

Año 2011					
DEPARTAMENTO	MUERTOS	HERIDOS	PERSONAS	DESTRUIDAS	VIVIENDAS AVERIADAS
Amazonas			2780		557
Antioquia	22	15	39350	401	4471
Arauca	1	2	18527	20	2999
Atlántico			5977	3	1113
Bogotá-		6	6283	1	1204
Bolívar	5		53823	7	8706
Boyacá	8	3	71405	734	8493
Caldas	25	2	24121	365	4427
Caquetá			5410	4	1043
Casanare	3		15845	1	3122
Cauca	2	6	118735	70	4299
Cesar	1		46690	7	9326
Choco		3	63339	52	10501
Córdoba			16216	6	2430
Cundinamarca	14	32	130744	260	21417
Guajira			4970	35	959
Guaviare			6349	1	642
Huila	1	5	21178	34	2497
Magdalena	1		40158		1615
Meta	1	3	22245	11	4377
Nariño	14	17	88166	1738	16941
Norte de Santander	4	4	47631	370	8542

Año 2012			
DEPARTAMENTO	MUERTOS	HERIDOS	PERSONAS
Amazonas			15750
Antioquia	28	31	44923
Arauca			7776
Atlántico	3	131	28296
Bogotá	5	29	1662
Bolívar	3		7544
Boyacá	10	4	26013
Caldas	5	7	919
Caquetá	6	1	15376
Casanare	2	1	33235
Cauca	14	36	92240
Cesar	5	7	7151
Choco	3	12	62438
Córdoba	1	32	42056
Cundinamarca	24	22	11438
Guajira	3		2533
Guaviare		4	2730
Huila	14	2	13428
Magdalena		5	12750
Meta	1	1	839
Nariño	5	7	61131
Norte de Santander	6	14	5205

Putumayo		329		61	
Quindío	2	498	1	98	
Risaralda		6936	11	378	
Santander	7	19522	246	1522	1151
Sucre		104385	12	6550	20725
Tolima	7	14272	93	2061	75
Valle del cauca	6	29026	10	6014	
TOTAL	98	1049475	1081	167643	

*Tabla 15. Afectaciones de la primera temporada invernal 2010  
Fuente: EM-DAT, 2017; Aon Benfield, 2017. en (Organisation for Economic Cooperation and Development - OECD, 2019)*

Putumayo			1051		80
Quindío	5	4	3949		363
Risaralda	6	4	24850	38	5162
Santander	39	48	80050	153	15474
Sucre			3589	3	285
Tolima	3		37655	147	4433
Valle del cauca	4	4	47267	51	9683
TOTAL	159	158	1048352	4512	155161

*Tabla 16. Afectaciones de la primera temporada invernal 2011  
Fuente: EM-DAT, 2017; Aon Benfield, 2017. en (Organisation for Economic Cooperation and Development - OECD, 2019)*

Putumayo	2	1	123687
Quindío	4	12	3036
Risaralda	4	10	10381
Santander	17	24	9360
Sucre	6	13	72513
Tolima	7	14	12257
Valle del cauca	8	22	52244
TOTAL	219	276	1399005

*Tabla 17. Afectaciones de la primera temporada invernal 2012  
Fuente: EM-DAT, 2017; Aon Benfield, 2017. en (Organisation for Economic Cooperation and Development - OECD, 2019)*

Se destaca que durante el año 2010 en el territorio colombiano se registraron un promedio de 86 cierres totales o parciales de vías por mes; en donde el 20,45 % es decir 17 corredores viales, reportaron cierres totales y el 79,55 %, es decir 68 corredores viales, registraron pasos restringidos en algunos de sus tramos, por otra parte, durante el año 2011 en el país se registró un promedio mensual de 170 cierres totales o parciales de vía por mes; en donde el 32,94 %, correspondiente a 56 corredores viales que reportaron cierres totales y el 67,06 % correspondiente a 114 corredores viales, los que presentaron pasos restringidos en algunos de sus tramos, además los registros del año 2012 registraron un promedió 195 cierres totales o parciales de vía por mes; donde el 23,07 %, lo que corresponden a 45 corredores viales reportaron cierres totales y el 76,92 %, correspondiente a 150 corredores viales mostraron pasos restringidos en algunos de sus tramos.

Tabla 18. Total, de daños por departamento (millones de pesos), muestra que los departamentos más afectados en daños de hábitat, infraestructura, servicios sociales y administración pública y productos fueron los departamentos de Bolívar, Valle del Cauca, Atlántico, Magdalena, Antioquia y Norte de Santander. Y el porcentaje de pérdida de PIB departamental fueron los departamentos de Sucre, Magdalena, Choco, La Guajira, Norte de Santander, Cauca y Córdoba.

Departamento	Hábitat	Infraestructura	Servicios sociales y administración pública	Productivos	Total	Participación	Porcentaje de PIB departamental
Bolívar	\$ 631.088	\$ 120.287	\$ 223.399	\$ 203.530	\$ 1.178.304	10,5	5,4
Valle de Cauca	\$ 149.860	\$ 704.440	\$ 77.915	\$ 31.532	\$ 963.747	8,6	1,8
Atlántico	\$ 650.769	\$ 141.565	\$ 98.802	\$ 15.945	\$ 907.081	8,1	4
Magdalena	\$ 392.176	\$ 152.479	\$ 128.424	\$ 110.612	\$ 783.691	7	10,6
Antioquia	\$ 227.491	\$ 329.634	\$ 100.970	\$ 41.301	\$ 699.396	6,2	1
Norte de Santander	\$ 200.860	\$ 422.991	\$ 40.816	\$ 5.934	\$ 670.601	6	7,3
Santander	\$ 218.513	\$ 321.662	\$ 41.531	\$ 61.305	\$ 643.011	5,7	1,6
Sucre	\$ 232.117	\$ 129.011	\$ 137.155	\$ 113.655	\$ 611.938	5,4	15,2
Cundinamarca	\$ 89.443	\$ 379.216	\$ 25.261	\$ 32.610	\$ 526.530	4,7	1,9
Córdoba	\$ 256.234	\$ 94.512	\$ 71.376	\$ 82.891	\$ 505.013	4,5	5,1
La Guajira	\$ 377.759	\$ 75.592	\$ 3.770	\$ 19.611	\$ 476.732	4,2	7,4
Cauca	\$ 256.244	\$ 167.492	\$ 21.400	\$ 3.731	\$ 448.867	4	5,7
Nariño	\$ 231.993	\$ 119.919	\$ 39.498	\$ 825	\$ 392.235	3,5	4,8
Cesar	\$ 197.108	\$ 135.051	\$ 6.279	\$ 43.333	\$ 381.771	3,4	3,7
Tolima	\$ 187.877	\$ 115.159	\$ 29.594	\$ 6.097	\$ 338.727	3	2,8
Boyacá	\$ 93.978	\$ 208.208	\$ 11.592	\$ 4.240	\$ 318.018	2,8	2,2
Caldas	\$ 145.782	\$ 104.845	\$ 19.198	\$ 4.393	\$ 274.218	2,4	3,2
Chocó	\$ 131.855	\$ 28.005	\$ 82.592	\$ 0	\$ 242.452	2,2	8,2
Risaralda	\$ 58.253	\$ 88.378	\$ 41.643	\$ 8.226	\$ 196.500	1,7	2,4
Huila	\$ 39.177	\$ 71.533	\$ 16.011	\$ 9.965	\$ 136.686	1,2	1,5

Quindío	\$ 20.802	\$ 32.166	\$ 14.793	\$ 2.903	\$ 70.664	0,6	1,6
Caquetá	\$ 32.854	\$ 27.596	\$ 0	\$ 1.135	\$ 61.585	0,5	2,5
Casanare	\$ 30.306	\$ 24.418	\$ 0	\$ 0	\$ 54.724	0,5	0,6
Meta	\$ 15.141	\$ 31.271	\$ 148	\$ 139	\$ 46.699	0,4	0,2
Arauca	\$ 4.871	\$ 28.498	\$ 16	\$ 2	\$ 33.387	0,3	0,7
Putumayo	\$ 13.904	\$ 17.000	\$ 0	\$ 0	\$ 30.904	0,3	1,2
Bogotá D.C.	\$ 16.455	\$ 79	\$ 0	\$ 20	\$ 16.554	0,1	0
Amazonas	\$ 2.083	\$ 3.249	\$ 2.301	\$ 0	\$ 7.633	0,1	2,2
Guaviare	\$ 363	\$ 5.547	\$ 0	\$ 0	\$ 5.910	0,1	1,2
Vichada	\$ 0	\$ 4.317	\$ 0	\$ 0	\$ 4.317	0	0,8
San Andrés	\$ 3	\$ 2.550	\$ 0	\$ 0	\$ 2.553	0	0,3
Vaupés	\$ 61	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 61	0	0
Guainía	\$ 40	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 40	0	0
Nacional	\$ 2.070	\$ 181.133	\$ 16.619	\$ 2.760	\$ 202.582	1,8	0,04
<b>Total</b>	\$ 4.907.530	\$ 4.267.803	\$ 1.251.103	\$ 806.695	\$ 11.233.131	100	2

Tabla 18. Total, de daños por departamento (millones de pesos)

Fuente: EM-DAT, 2017; Aon Benfield, 2017. en (Organisation for Economic Cooperation and Development - OECD, 2019)

En el año de 1974, en la vía Bogotá-Villavicencio ocurrió un deslizamiento de lodo y piedras donde murieron alrededor de 300 personas (El Espectador, 2014). Según relatos registrados por el periódico El Tiempo, antes de ocurrir este evento, se estaban realizando obras de estabilización en varios puntos de la vía, debido a que ya habían ocurrido dos casos de desastre. Los métodos de estabilización empleados fueron muros anclados y obras de drenaje; aun así, en ese mismo año la montaña falló. (Baena et al., 2019)

A la fecha, no se ha concluido satisfactoriamente las obras de restauración que se han venido realizando y no se ha podido dar apertura a la vía, debido a la inestabilidad de la zona. Las obras de prevención y estabilización en la zona son varias, entre la que se encuentran grandes viaductos y túneles, sistemas de drenaje. La fecha de inauguración, según la Agencia Nacional de Infraestructura - ANI está prevista para el 2023. La reconstrucción de este tramo de vía le ha costado al país 8 billones de pesos, según El Colombiano. (Baena et al., 2019)

La Fotografía 5. Bloque sobre la vía Bogotá - Villavicencio. muestra un bloque de gran tamaño, sobre la vía que conduce de la ciudad de Bogotá a la ciudad de Villavicencio. Evento ocurrido en agosto de 2021. Es de resaltar que este deslizamiento ocurrió en agosto 27 de 2021. En donde el INVÍAS reportó un cierre total de tipo preventivo y de carácter indefinido, sobre los 2 carriles de la vía que comunican la ciudad de Bogotá con Villavicencio, en el kilómetro 58, es un tramo en el que de manera constante se presentan fenómenos de remoción en masa, destacando las caídas de bloques, derrumbes y deslizamientos de tierra causados por las lluvias. (Revista Semana, 2021)



*Fotografía 5. Bloque sobre la vía Bogotá - Villavicencio.*

*Fuente: Revista Semana. (2021).*

*Consultado en: <https://www.semana.com/nacion/articulo/video-capta-impresionante-caida-de-una-roca-gigante-sobre-la-via-al-llano/202157/>*

Durante el año de 1999, comenzó un deslizamiento en la vía Bogotá-Medellín, en la variante de Villeta, la desestabilización de la zona ocurrió durante la construcción de la carretera en 1985 a cargo del consorcio Mario Huertas, donde se removieron 2 millones de metros cúbicos de tierra y gran parte se depositó en la parte alta de la ladera. (El Tiempo, 2003). El peso del material depositado sobre la ladera hizo que la ladera fallara y presentara deformaciones, lo cual generó grandes movimientos de tierra. Los métodos de estabilización del terreno resultaron casi imposibles durante 5 años, aproximadamente, donde no fue posible parar los movimientos de tierra. Las dos alternativas que pusieron fin a esta situación, que duró 10 años, fue la construcción de un túnel falso y un muro de carga; este túnel fue un reto para la ingeniería colombiana debido a las condiciones geológicas desfavorables de la zona, además de grandes cantidades de aguas subterráneas. El túnel falso ganó el Premio Nacional de Ingeniería 2012 por la SCI. (Editorial La República, 2012). En el año 2016, en la autopista que comunica Medellín-Bogotá, se presentó un deslizamiento de tierra donde quedaron atrapadas 16 personas. La causa de esta tragedia fue por inestabilidad en la ladera debido a una explotación minera de una cantera. (Noticias Caracol, 2016). Las pérdidas, según la Asociación de transportadores de carga, superan los 3.700 millones de pesos, lo cual significa pérdidas millonarias para el sector y el país. Por otro lado, hay que sumar el costo de las obras de restauración de la zona, y los gastos debido a la reparación de víctimas. Las obras de estabilización empleadas fueron el escalonamiento del talud, en los cuales se instalaron sistemas de drenaje. (Baena et al., 2019)

La Fotografía 6. Bloque vía Medellín - Bogotá: muestra un bloque de gran tamaño, sobre la vía que conduce de la ciudad de Bogotá a la ciudad de Medellín. El deslizamiento ocurrido el 28 de diciembre de 2016 ocasiono el cierre de la vía hasta finales de enero de 2017.

La caída de rocas de entre tres y cuatro metros de diámetro y el doble de altura de una persona promedio impidió la apertura de la autopista Medellín-Bogotá, que está cerrada desde el 28 de diciembre por un derrumbe ocurrido en el kilómetro 14 + 350, en la jurisdicción de Copacabana. Según informado por DEVIMED, el concesionario de la autopista, el radar instalado en el lugar del derrumbe mostró alertas rojas durante las evaluaciones realizadas el mes de enero, «lo que significa una amenaza de deslizamiento y se recomendó a consecuencia del evento continuar con la vía cerrada». A pesar de que a consecuencia de este se removieron alrededor de 64 mil metros cúbicos de tierra, las fotografías aéreas del derrumbe muestran cómo las grandes rocas obstaculizaron las dos calzadas de la autopista, generando cierres parciales y totales en esta vía durante los meses de diciembre de 2016, enero y febrero de 2017. (Carvajal, 2017)



*Fotografía 6. Bloque vía Medellín - Bogotá. 2017*

*Fuente: El Colombiano. (2017).*

*Consultado en: <https://www.elcolombiano.com/antioquia/movilidad/alerta-roja-en-derrumbe-de-autopista-medellin-bogota-MX5752806>*

Para el año 2018, en la vía Bucaramanga - Barrancabermeja, se presentó una falla geológica, lo cual provocó un gran deslizamiento de tierra. Este caso, a diferencia de los otros, ocurrió por malos procedimientos en diseño y construcción por parte de la generadora de energía ISAGEN. La empresa generadora de energía tenía conocimiento de la inestabilidad de la zona y se comprometió a mantener la movilidad del corredor. (El Tiempo, 2018). ISAGEN construyó 11.5 kilómetros de vía

sustitutiva, tramo el que tuvo 4 puntos críticos debido a la inestabilidad. Lo que se puede ver en las fotos de las obras que ha realizado ISAGEN son una serie de escalonamiento en el talud, buscando una mayor estabilidad, como también la aplicación de concreto lanzado, revistiendo la superficie del talud y sistemas de drenaje. (Baena et al., 2019)

La Fotografía 7. Bloque sobre la vía Barichara - Guane: muestra un bloque sobre la vía que generó la incomunicación entre los municipios de Barichara - Guane, Girón - Zapatoca, y Galán, en el departamento de Santander.



*Fotografía 7. Bloque sobre la vía Barichara - Guane*

*Fuente: RCN. (2018).*

*Consultado en: <https://www.rcnradio.com/colombia/santanderes/vias-cerradas-en-santander-por-deslizamientos-y-caida-de-rocas>*

Los grandes deslizamientos de tierra y caída de rocas han ocasionado cierres en las vías que comunican a los municipios Barichara- Guane, Girón - Zapatoca, y en el municipio de Galán es persistente la alerta por el aumento del nivel de la quebrada la Honda durante las temporadas invernales, este hecho se atribuye el desprendimiento de gran parte de la batea del puente de acceso que comunica a la población con el casco urbano. El coronel Jaime Escobar comandante de la Policía en Santander señaló «que en estos lugares se trabajó para recuperar la malla vial afectada con la caída de rocas y los deslizamientos, pero que hay una advertencia especial para los conductores para que no transiten por estos corredores viales y que invitan a todos los usuarios que conduzcan con precaución en razón a que por cambios climáticos que se han presentado en el departamento hay desprendimientos de tierra y roca que caen sobre la vía o sobre los vehículos en

movimiento, razón por la que deben informarse del estado de las carreteras antes de movilizarse manifiesta el oficial»

En la vía al municipio Galán, el marzo 28 de 2017, se presentó una grave emergencia sobre la quebrada la Honda en el municipio de Galán que aumentó su caudal por cuenta de las lluvias que se registraron en la zona, según las autoridades el municipio de se encuentra en alerta por riesgo de avalancha, sin embargo, el represamiento de rocas, lodo y tierra en la quebrada ocasionaron el desprendimiento de una batea que sostenía el puente de acceso al casco urbano. Según lo declarado por el director de gestión de riesgo de Santander, para este momento, Ramón Ramírez, «en el municipio de Galán se presentó una creciente súbita que dejó rocas y material de lodo sobre la batea que comunica al casco urbano con el municipio con tres veredas, impidiendo la comunicación con otros municipios vecinos». Donde solo en el municipio de Galán habitan cinco mil habitantes, los que quedaron incomunicados con el resto del departamento de Santander y del país a consecuencia de las lluvias. (Noticias RCN, 2018).

Es importante mencionar cuánto le cuesta al país la rehabilitación y reconstrucción de una vía y ponerla a servicio de toda la comunidad. El Instituto Nacional de Vías INVÍAS con recursos de la cuenta «Construcción de obras de emergencia para la red vial nacional», invierte anualmente aproximadamente \$50 mil millones, valor que se puede incrementar dependiendo la complejidad del diseño y reconstrucción del proyecto. (BM - Banco Mundial, 2012). Según el informe de INVÍAS el 91 % de la inversión anual se destina a la rehabilitación y reconstrucción y el 9 % se destina a estudios y estrategias de prevención de riesgos. Lo cual demuestra la importancia de hacer reestructuraciones en los procesos de planeación y ordenamiento urbano, como verificar normativas ambientales y de diseño. (Baena et al., 2019)

En complemento de lo anterior, la Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático ha establecido una relación entre la ocurrencia mensual del número de procesos de remoción en masa y la distribución mensual de la precipitación. De igual forma, este documento señala que existe una relación entre el número de eventos de deslizamientos reportados y los fenómenos El Niño y La Niña, con ocasión del fenómeno de la Niña 2010 - 2011, el Ministerio de Transporte a través del INVIAS realizó una primera identificación de los sitios de mayor vulnerabilidad, donde la afectación por deslizamientos y derrumbes se consideró

frecuente y el transporte de carga se vio afectado de forma significativa. Los cierres y desvíos causaron pérdidas de alrededor de US\$ 222 millones, siendo los departamentos de Cundinamarca, Santander, Norte de Santander, Antioquia, Atlántico y Cauca, los que sufrieron las mayores pérdidas en el transporte de carga, concentrando pérdidas superiores al 56 %. (Ministerio de Transporte et al., 2014)

La Tabla 19. Corredores viales con puntos críticos de recurrencia de movimientos en masa identificados por el INVIAS, durante el fenómeno de la Niña 2010 – 2020, se muestra los departamentos donde se presentó el fenómeno, así como el corredor vial asociado, en donde de manera recurrente se presentan afectaciones por movimientos en masa, corredor que se encuentra correlacionándolo numéricamente con la Imagen 8. Sitios críticos recurrentes identificados por el INVIAS, durante el fenómeno de la Niña 2010 – 2020

Departamento	Corredor vial	Numero
Bolívar - Magdalena	Banco – Tamalaquete	1
Bolívar	Barranquilla - Camesero	2, 3
Cundinamarca	Bogotá – Villavicencio	4, 5, 6, 7
Casanare	Crucero – Aguazul	8
Santander	Curos – Málaga	9
Antioquia	Dabeiba - Santafé de Antioquia	10
Antioquia	Bolombolo - Santafé de Antioquia	11
Bolívar	El Carmen - Barranquilla	12, 13
Tolima - Caldas	Fresno - Manizales	14, 15, 16, 17
Arauca - Santander	La Lejía - Saravena	18, 19
Antioquia	La Pintada - Cauya	20, 21, 22, 23
Antioquia	Medellín - Caucasia	24, 25
Antioquia	Medellín - Puerto Berrio	26, 27
Putumayo	Mocoa - Pitalito	28, 29, 30
Huila - Caquetá	Neiva - Florencia	31, 32, 33
Norte de Santander	Ocaña - Cúcuta	34, 35, 36
Cauca	Popayán - Guadualejo	37, 38
Cesar	Tamalaquete - El Burro	39
Cundinamarca	Villeta - Honda	40, 41

Tabla 19. Corredores viales con puntos críticos de recurrencia de movimientos en masa identificados por el INVIAS, durante el fenómeno de la Niña 2010 – 2020  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

La Imagen 8. Sitios críticos recurrentes identificados por el INVIAS, durante el fenómeno de la Niña 2010 – 2020, muestra las zonas del país donde se presentaron derrumbes asociados al fenómeno y se presentan con frecuencia asociados a los periodos de alta precipitación o picos de las mismas, lo

que desencadena procesos de obstrucción vial a causa de depósitos, estos pueden generar cierres parciales o totales de la vía y ser procesos de carácter intermitente o permanente.

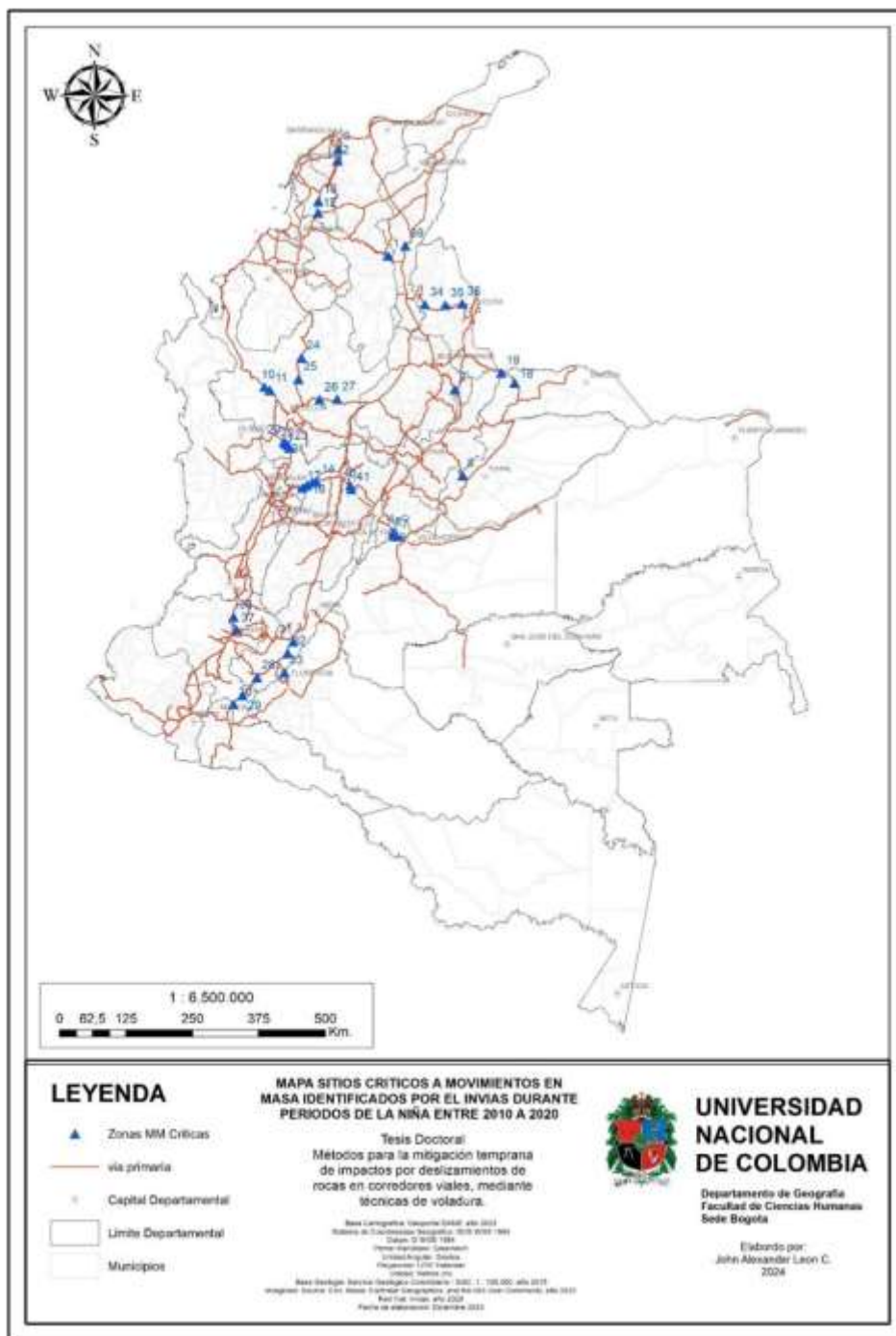


Imagen 8. Sitios críticos recurrentes identificados por el INVIAS, durante el fenómeno de la Niña 2010 – 2020  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

Un caso de interés reciente, a resaltar en cuanto a la proyección de las pérdidas económicas del cierre de la vía al Llano se establece la Federación Nacional de Comerciantes (FENALCO) Seccional Meta y Llanos Orientales tasó en 43.000 millones de pesos los ingresos diarios que deja de recibir el departamento por el cierre de la autopista que lo comunica con Bogotá y otras regiones del país. (El Tiempo, 2019)

«La producción diaria del departamento es de 83.900 millones de pesos de acuerdo al DANE, y se estima que por cada día de cierre de la vía dejan de ingresar al Meta 43.000 millones de pesos, donde aproximadamente 18.000 millones se traducen en pérdidas para sectores muy afectados como el agropecuario, turismo, y transporte, entre otros» (El Tiempo, 2019)

De ese modo, se calcula que han dejado de ingresar al Meta 800.000 millones de pesos, y se han perdido en bienes perecederos y cancelación de servicios 360.000 millones de pesos; además la organización también dijo que por cada día de cierre de la Vía al Llano se pierden del 90 al 95 por ciento de las reservas hoteleras, que representan alrededor de 2.340 millones de pesos. (El Tiempo, 2019)

La Federación de Empresarios del Transporte de Carga (FEDETRANSCARGA), manifiesta que 2.000 vehículos de carga por día se movilizan por la vía al Llano, que por el deslizamiento tienen que dar una vuelta de 523 kilómetros, por Sogamoso, para llegar o salir de Bogotá, cuando lo normal son 80 kilómetros, lo que significa que dejan de facturar 7.000 millones de pesos diarios. (El Tiempo, 2019). El comercio de la carne en Bogotá, subió el flete hasta en 40 por ciento, debido a que el recorrido por la otra vía desde la capital del Meta es mayor, los consumidores de bebidas refrescantes y cervezas, también ven mayores precios en Villavicencio o los Llanos porque las plantas están en el centro del país. (El Tiempo, 2019)

El transporte de petróleo también se afectó porque el flete por galón de un carrotanque costaba traerlo desde los Llanos hasta una estación en Lérída (Tolima) 450 pesos, y ahora vale 680 pesos, debido también al mayor recorrido. (El Tiempo, 2019)

Menor producción en el sector ganadero, la Federación Nacional de Ganaderos (FEDEGAN), manifiesta que por la situación en la vía al Llano se dejaron de sacrificar para consumo humano 1.800 reses cada 15 días. (El Tiempo, 2019)

Los precios de los fletes se han duplicado y hay muchos tiempos muertos en la producción por la demora en la recepción de los insumos. (El Tiempo, 2019)

Partiendo de esta premisa los métodos desarrollados en el proyecto de investigación, busca dar una respuesta y solución rápida a los problemas de movilidad generados por obstrucción vial a causa de depósitos a fin de generar respuestas integrales y articuladas a las políticas encaminadas a garantizar la movilidad en los procesos de desarrollo vial.

Los departamentos más propensos al fenómeno de movimientos en masa son Antioquia, Tolima, Valle del Cauca, Caldas, Boyacá y Nariño. De acuerdo con datos de la Corporación OSSO y EAFIT (2011) y del Banco Mundial (2012), en el periodo 1970-2011, los porcentajes de pérdidas de vidas y de viviendas destruidas por movimientos en masa son significativos: 10 % de viviendas destruidas y 36 % de vidas perdidas. (UNGRD - Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2018).

Por otro lado, de acuerdo con los registros del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del SGC, desde 1900 hasta 2017, en el país se reportaron 16.969 movimientos en masa, siendo el departamento de Antioquia el que mayores eventos presentó, seguido por Cundinamarca y Cauca. Los departamentos con mayor número de personas y familias afectadas han sido Caldas, Caquetá, Tolima, Antioquia, Bolívar, Boyacá, Cauca, Cesar, Cundinamarca, Huila, Meta, Nariño, Norte de Santander, Putumayo, Quindío y Santander (SGC, 2017). Los movimientos en masa han sido de especial atención a nivel nacional en cuanto a los efectos que estos tienen sobre las ciudades y sobre la infraestructura vial. (UNGRD - Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2018).

Entre los años 2011 y 2016 en el marco del Decreto Nacional 1807 de 2014 del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, el SGC realizó un estudio donde identificó que del total del área del país cerca del 50 % se encuentra categorizada en amenaza baja por movimientos en masa, 22 % amenaza media, 20 % amenaza alta y 4 % en amenaza muy alta. Así mismo, a partir de la expedición

de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012) donde se establece la necesidad de hacer estudios de riesgo a nivel municipal, el SGC y la Universidad Nacional han desarrollado guías metodológicas que definen los lineamientos para realizar estudios de riesgo por movimientos en masa a escala detallada o local para aplicar en cabeceras municipales, poblados pequeños y medianos, y en áreas rurales (SGC, 2015; 2017). (UNGRD - Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2018).

### **3.3. Caso vía al Llano (Bogotá - Villavicencio)**

La vía a Villavicencio es el primer proyecto vial que intento unir la Orinoquia con el interior del país, este proyecto que se inició en 1759 y duró solo dos años, el general Santos Gutiérrez en 1869 propuso unas obras entre Quetame y Villavicencio, que se suspendieron debido a falta de presupuesto en las partidas nacionales, datos más recientes dan cuenta que la primera etapa de la vía al llano tramo Bogotá-Chipaque, se terminó en el año 1928, la segunda etapa de la vía el tramo Chipaque - Cáqueza se terminó en el año 1932; y finalmente el tramo de la vía que conecto con la población de Villavicencio se terminó en 1936, es de destacar que tanto en las crónicas como en los reportes presentes, se reportan problemas en la plaza de Quetame, el alto de la Huesada, la quebrada de Trapichito, las quebradas del Naranjal y Marcelita y diferentes zonas de la cordillera a la altura del río Negro que es la (única parte del camino actual racionalmente trazado), hasta el pie de Monterredondo. (El Tiempo, 1997a).

#### **3.3.1. Construcción de la vía**

El recuento de histórico de los cierres que ha sufrido la vía al llano no es reciente, desde el año 1759 cuando el Virrey José Solís Fochs de Cardona firmó el edicto por el cual se ordenaba la construcción de una vía que comunicara a Santa Fe con San Martín y San Juan, en los Llanos del Orinoco, como en aquella época se le conocía a la región. El interés de conectar ese territorio rico en recursos con lo alto de la cordillera y, desde allí, con el río Magdalena, principal arteria del Virreinato con la Costa Caribe, en donde la travesía podía durar meses, y donde la vida de muchos hombres, mujeres y niños eran cobradas por lo agreste del camino y en muchas ocasiones la carga no llegaba a su destino, convirtiendo el tránsito por esta vía en una epopeya. (El cuarto mosquetero, 2023)

Hoy, 200 años después, los Llanos Orientales, en el territorio colombiano, parecieran estar igual de lejos, en donde el sueño de millones de personas es tener una carretera moderna, con un tránsito seguro y rápido que borre de sus mentes las pesadillas que a lo largo de la historia ha dado esta vía. (El cuarto mosquetero, 2023)

Esta nueva vía que prometió ser una de las más modernas del país y de la región, ha sido una tarea pendiente para los gobiernos de turno y para la ingeniería que ha visto año tras año, como a diario la concesión vial se ve obligada a generar cierres parciales o totales de algún tramo de la vía, donde la inclemencia de la naturaleza no da tregua, en este tramo vial de escasos 90 kilómetros, en donde se destaca la influencia constante de derrumbes, avalanchas, deslizamientos, hundimientos de banca, influencia de fallas geológicas, nivel hidrogeológico alto, cuerpos de agua superficiales que cambian su curso, múltiples errores de diseño, la negligencia de los gobiernos y de una concesión, que son los protagonistas año tras año de una incalculable lista de muertos y de pérdidas materiales y económicas, no solo para la región sino para el país en general.

### **3.3.2. Año 1927. Avalancha, vereda Naranjal, municipio de Quetame**

Para el 27 de junio de 1924, el gobierno nacional en cabeza de Pedro Nel Ospina, anuncia la construcción de una doble calzada del 100 %, entre Bogotá y Villavicencio, en donde aproximadamente 16 horas después del anuncio la vía vuelve a ser noticia, pero esta vez al estar inmersa en una nueva tragedia, la avalancha en la vereda Naranjal en el municipio de Quetame, tramo de la vía al Llano, que por décadas se ha visto amenazada por la naturaleza. (Periódico del Meta, 2023)

### **3.3.3. Año 1974. Derrumbe, Quebrada Blanca, municipio de Quetame**

El 28 de junio de 1974, un derrumbe marcó el sector de Quebrada Blanca. Esta zona para la fecha era uno de los puntos identificados como más críticos, el kilómetro 54, en donde se generaban deslizamientos de manera permanente y este día se generó uno de aproximadamente 760.000 m<sup>3</sup>, de material, en donde Ingenieros del Distrito 13 de Carreteras descubrieron una grieta y desde el Ministerio de Obras Públicas y Transporte se previó el derrumbe e intentaron acelerarlo para que ocurriera de manera controlada, se destaca que desde tres días antes de la tragedia, el paso

vehicular se encontraba restringido por lo que se concentraba gran cantidad de vehículos en la vía, la cual a las 3:55 de la tarde, momento en el que se desarrolla el deslizamiento, según narran testigos «el camino se tornó oscuro y la montaña se vino abajo» entre lodo y piedras más de 500 personas perdieron la vida y cientos de cuerpos no fueron encontrados. La zona fue declarada Campo Santo y tomó un total de 6 meses para restablecer el paso, según lo relatado por el periodista Rubén Darío Romero, quien cubrió la noticia y relató los sucesos. (Periódico del Meta, 2023)

Fotografía 8. Sector Quebrada Blanca – Quetame – Cundinamarca, después del deslizamiento, muestra la magnitud de la tragedia, en donde se evidencia que el evento afectó gravemente la infraestructura de las viviendas y en el área de los hechos no quedó ninguna vivienda en pie.



*Fotografía 8. Sector Quebrada Blanca – Quetame – Cundinamarca, después del deslizamiento  
Fuente: Noticiero CM& - Nota del 28 de junio de 2020.*

La Fotografía 9. Búsqueda de cuerpos en el lecho de la quebrada: se muestra cómo los pobladores buscan los restos de los desaparecidos al momento del evento.

La Fotografía 10. Movilización de pobladores por la zona de deslizamiento donde muestran otra perspectiva de la tragedia, en donde los pobladores buscan huir de la zona del deslizamiento, dado que las fuertes lluvias persistían y temían una nueva tragedia.



*Fotografía 9. Búsqueda de cuerpos en el lecho de la quebrada*

*Fuente: Noticiero CM& - Nota del 28 de junio de 2020.*



*Fotografía 10. Movilización de pobladores por la zona de deslizamiento*

*Fuente: Noticiero CM& - Nota del 28 de junio de 2020.*

La Fotografía 11. Cruz Roja Colombiana, realizando el rescate de cadáveres en zona de deslizamiento y la Fotografía 12. Policía Nacional de Colombia, realizando operativos de rescate de cadáveres en la zona de deslizamiento: nos muestran diferentes entidades nacionales realizando operaciones de salvamento y rescate de cadáveres en la zona del deslizamiento



*Fotografía 11. Cruz Roja Colombiana, realizando el rescate de cadáveres en zona de deslizamiento*

*Fuente: Noticiero CM& - Nota del 28 de junio de 2020.*



*Fotografía 12. Policía Nacional de Colombia, realizando operativos de rescate de cadáveres en la zona de deslizamiento*

*Fuente: Noticiero CM& - Nota del 28 de junio de 2020.*

La Imagen 9. Reporte del diario El espectador de los hechos ocurridos en Quebrada Blanca - Cundinamarca, la Imagen 10. Reporte del diario El Tiempo de los hechos ocurridos en Quebrada Blanca - Cundinamarca: muestran los reportes de prensa asociados al evento.



Imagen 9. Reporte del diario El espectador de los hechos ocurridos en Quebrada Blanca - Cundinamarca  
 Fuente: Noticiero CM& - Nota del 28 de junio de 2020.



Imagen 10. Reporte del diario El Tiempo de los hechos ocurridos en Quebrada Blanca - Cundinamarca  
 Fuente: Noticiero CM& - Nota del 28 de junio de 2020.

La Imagen 11. Ampliación de la noticia realizada por el diario el Tiempo: muestran diferentes reportajes realizados por los periodistas y comentarios de los pobladores y transeúntes que se encontraron en la zona afectada por el desastre, proceso de ampliación de noticia de prioridad nacional sobre los hechos ocurridos en la vía al Llano, el 28 de junio de 1974, sobre la zona denominada Quebrada Blanca. Es de resaltar que en esta misma zona y el área circunvecina en la actualidad se siguen presentando problemas de inestabilidad del terreno asociados a fenómenos de remoción en masa.



Imagen 11. Ampliación de la noticia realizada por el diario el Tiempo  
 Fuente: Noticiero CM& - Nota del 28 de junio de 2020.

La Imagen 12. Nota del diario el Espectador de Declaratoria de Campo Santo del Kilómetro 54 del Sector de Quebrada blanca, muestra la nota del diario el espectador intenta mostrar la magnitud de la tragedia, en la nota del periódico se hace énfasis en el número de víctimas, así como la decisión del gobierno nacional y la iglesia de dar una declaratoria para el lugar de la tragedia y declararlo como campo santo.



Imagen 12. Nota del diario el Espectador de Declaratoria de Campo Santo del Kilómetro 54 del Sector de Quebrada blanca

Fuente: Noticiero CM& - Nota del 28 de junio de 2020

La Fotografía 13. Vía al Llano Bogotá - Villavicencio año 1980: nos muestra escenas sobre la vía que para la época hasta la actualidad hacen parte de la cotidianidad de este importante corredor, destacando un tramo con talud con altas pendientes, zonas de hundimientos y daños a la banca, transito lento por condiciones de la vía, se evidencian zonas de encharcamiento debido a los niveles freáticos y los procesos de drenaje subsuperficial que se desarrollan en la ladera



Fotografía 13. Vía al Llano Bogotá - Villavicencio año 1980

Fuente: COVIANDINA. Las soluciones que el CONPES de 1993 propuso para el corredor vial Bogotá-Villavicencio. (1994).

### **3.3.4. Año 1991. Caída de rocas entre Puentequetame y Cáqueza**

La noche del 2 de agosto de 1991, entre Puentequetame y Cáqueza, Omar Enrique Vacca, alcalde de ese entonces, perdió la vida al ser impactado por rocas que se desprendieron de una montaña. Vacca se encontraba haciendo inspección del sector por derrumbes. (Periódico del Meta, 2023)

Para 1994, se planeó cierre para ampliación de algunos sectores de la vía y el desarrollo de obras de estabilización, planeado desde el 1 de noviembre y por un periodo de 8 meses, donde dichas obras no tardaron 8 meses, sino 23 meses, en donde se presentaron periodos de cierre total y periodos de paso restringido la vía en el sector de la carretera entre Puente Quetame y Caño Seco, para este momento los sectores que más se vieron afectados fueron el turismo, el transporte de pasajeros y carga, el comercio, el agricultor - especialmente de productos perecederos-, los estudiantes y los viajeros comunes y corrientes. En donde según reportes del periódico El Tiempo, las consecuencias diarias que deja el cierre de la vía al Llano, genera afectación a unos 5.480 vehículos que circulan diariamente por la vía, el transporte de más de 58.000 toneladas de productos agropecuarios, víveres e insumos, en donde según Rafael Romero Morales, director Ejecutivo de FEDEARROZ en Granada - Meta, dijo que este cierre generó un incremento del 20 por ciento en los fletes de transporte a la ciudad de Bogotá, lo que se traduce en un incremento del 10 al 15 % en los precios del producto. Según la Unidad Regional de Planificación Agropecuaria (URPA), este cierre afectó el ingreso de más de 49.000 toneladas de víveres a la región de la Orinoquia, entre los cuales se destacan la papa, con un 42.7 por ciento, y la panela con el 15 por ciento, provenientes del interior del país. Así mismo, se vio afectado el transporte hacia la capital colombiana de aproximadamente 180.000 cabezas de ganado bovino. Por otra parte, el sector de transporte de pasajeros, donde los cierres afectaron un aproximado de 36.000 personas que se movilizan semanalmente por esta vía, siendo entre viernes y domingo el pico más alto, con un promedio de 15.000 por fin de semana. Además, el sector hotelero también mostró una baja de más del 60 % en su ocupación, según señaló Jairo Lozano Lozano, presidente de COTELCO en Villavicencio. (El Tiempo, 1994)

La Fotografía 14. Vía al Llano Bogotá - Villavicencio año 1994: la imagen muestra las obras de ampliación de algunos sectores de la vía y el desarrollo de las obras de estabilización que generaron

el cierre total y periodos de paso restringido la vía por un periodo de 23 meses en el sector de Puente Quetame y Caño Seco.



Fotografía 14. Vía al Llano Bogotá - Villavicencio año 1994

Fuente: COVIANDINA. Las soluciones que el CONPES de 1993 propuso para el corredor vial Bogotá-Villavicencio. (1994)

### 3.3.5. Año 1997. Avalancha en la quebrada La Quina

Para el 14 de julio de 1997, se presenta una avalancha en la quebrada La Quina que ocasionó un daño en el gasoducto que conduce el gas domiciliario a Bogotá, Soacha, Fosca, Cáqueza y Quetame, razón por la que fábricas de Bogotá y Soacha, así como un aproximado de 1.800.000 personas quedaron sin el suministro de combustible, este daño a la red de gas se reparó en un periodo de 6 días, por otra parte los daños ocasionados a la carretera por los derrumbes, según el reportes posteriores de Carlos Alberto Villegas Lopera, director de la regional del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), dada la imposibilidad de llegar al lugar de la avalancha, por la creciente de la quebrada Las Lajas y del río Negro, así como la imposibilidad de evaluación de los daños ocasionados en la bancada de la carretera durante los primeros días, mantuvieron la vía cerrada o con paso restringido, por un periodos de 9 días. (El Tiempo, 1997b)

### 3.3.6. Año 1998. Caída de rocas, kilómetro 80, municipio de Guayabetal

El 20 de septiembre de 1998, según los reportes del director regional del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), Carlos Alberto Villegas Lopera, hacia las seis de la tarde de este domingo un derrumbe de piedra (caída de rocas), obstaculizó completamente el tránsito vehicular por la carretera, en el sitio

denominado kilómetro 80, localizado a cinco kilómetros adelante de Guayabetal, en sentido Bogotá Villavicencio, y a 22 de la capital del Meta, de acuerdo con el reporte el sitio cayeron aproximadamente 15.000 m<sup>3</sup> de material que se desprendieron de la montaña, los cuales quedaron esparcidos a lo largo de unos 60 metros de la banca y que alcanza unos 40 metros de altura, destacando que en este sector la vía va paralela al río Negro y pegada a la montaña, razón por la que se debió realizar un cierre total de la vía, se destaca que para este momento por la vía al Llano diariamente se movilizaban unos 5 mil viajeros en ambos sentidos, al igual unos 3.500 vehículos de carga y pasajeros, este hecho imposibilitó el transporte desde el Llano hacia el centro del país productos como cítricos, patilla, papaya, mango, aguacate, yuca, arroz, plátano, ganado y petróleo, entre otros. (El Tiempo, 1998)

### **3.3.7. Año 2004. Avalancha, kilómetro 46+200, municipio de Quetame (Cundinamarca)**

El 21 de junio del 2004, una avalancha en el kilómetro 46+200 en Quetame (Cundinamarca) provocó el cierre de la vía al Llano. La quebrada Estaquecá arrastró hacia la carretera una gran cantidad de piedra y lodo, aproximadamente 2.000 metros cúbicos de este material, en donde dos jóvenes de aproximadamente 22 años fueron las víctimas fatales de este suceso. *«En la Estaquecá, Naranjal y Limoncitos, en esos tres sectores son muy vulnerables porque llueve mucho. Hay mucha inestabilidad (...) Toda esa cantidad de piedra y lodo afecta la vía y va destruyendo lo que encuentre en su camino»*, narra el periodista Romero, también añade que después de que la Quebrada Blanca dejara de ser el punto crítico en la vía, la amenaza se trasladó para el sector de la Estaquecá. (Periódico del Meta, 2023)

### **3.3.8. Año 2019. Derrumbe, kilómetros 57 y 58 + 500 m, municipio de Guayabetal**

En el año 2019, por un periodo de más de tres meses, desde el 15 de junio hasta el 16 de septiembre se dio un cierre total de la vía, por varios derrumbes entre los kilómetros 57 y 58 + 500 metros antes de llegar a Guayabetal a causa de la caída de más de 250 mil metros cúbicos de tierra, dejando grandes pérdidas económicas. (Periódico del Meta, 2023)

La intensidad del invierno dos días después aceleró y suma el desprendimiento de más de 120.000 m<sup>3</sup> que bloquearon la vía, aumentando así la amenaza de un desprendimiento mayor, donde se

hablan de al menos 4 millones de m<sup>3</sup>, los que no solo enterrarían la vía, sino que formarían una especie de presa sobre el río Negro y pondrían en peligro a la población de Guayabetal. (Revista Semana, 2019)

El impacto económico de este cierre, afecto principalmente a los productores de alimentos, sector de combustibles, turismo y materias primas, para lo que los transportadores tuvieron que transitar por las dos carreteras alternas, las que los dos casos, representan viajes entre 8 y 18 horas, con un aumento no solo de tiempo, sino del valor de los fletes, el paso de vehículos livianos se restableció a los 93 días, por otra parte el transporte de carga pesada se restableció después de 122 días, según los reportes del INVIAS. El impacto calculado por la Cámara de Comercio de Villavicencio (CCV), es de 2 billones de pesos, por los efectos de este cierre durante el primer mes. (Revista Semana, 2019)

La Imagen 13. Reporte de pérdidas por el cierre de la vía Ministerio de transporte Gobernación del Meta. Septiembre 2019, muestra el estado de la vía, inversiones realizadas de manera provisional, déficit presupuestal y pérdidas ocasionadas por el evento, después de 3 meses de cierre.



Imagen 13. Reporte de pérdidas por el cierre de la vía Ministerio de transporte Gobernación del Meta. Septiembre 2019 Fuente: Republica. (2019).

La Fotografía 15. Zona de avalancha, kilómetro 46+200, municipio de Quetame (Cundinamarca): se muestra la magnitud del deslizamiento, en donde el material obstruye por completo la vía.



Fotografía 15. Zona de avalancha, kilómetro 46+200, municipio de Quetame (Cundinamarca)  
Fuente: Revista Semana. (2019).

(  
El impacto económico no afecta solamente a Bogotá y Villavicencio o al Meta, también tiene graves repercusiones en la entrada y salida de suministros en los departamentos de Vichada, Guainía, Vaupés y Guaviare, incluso se ven afectados al Casanare y Arauca, aunque en menor medida, ya que cuentan con carreteras alternas. (Revista Semana, 2019)

Fotografía 16. Panorámica del sector de la avalancha, kilómetro 46+200, municipio de Quetame (Cundinamarca): en la parte inferior de la fotografía se muestran las dos zonas de avalancha que afectaron la vía



Fotografía 16. Panorámica del sector de la avalancha, kilómetro 46+200, municipio de Quetame (Cundinamarca)  
Fuente: Revista Semana. (2019).

Según las declaraciones del presidente de la CCV, Leonardo Baquero, las pérdidas diarias llegaron a los 50.000 millones de pesos, representados en bienes y mercancías que se dejan de transportar entre Bogotá y Villavicencio. En el sector del turismo, la región llanera, dejó de recibir 2.000 millones de pesos diarios, por concepto de cancelación de habitaciones en hoteles y centros de recreo, los que se aproximaron al 100 por ciento. (La República, 2019)

Los mayores efectos del cierre se vieron reflejados en el precio de los alimentos en la ciudad de Bogotá, puesto que desde esa parte de Colombia ingresan a esta ciudad cada día 1.850 cabezas de ganado, 600 cerdos que vienen de Puerto Gaitán y 1.500 toneladas de aceite de palma. Generando en total un aproximado de 12.000 toneladas diarias de alimentos por el orden de 25.000 millones de pesos. Según la CCV, de los cuales el 40 por ciento de los productos es dirigido a la ciudad de Bogotá, algunas de estas provisiones se movilizaron por las vías alternas habilitadas, lo que irremediablemente se tradujo en mayores costos de los productos. La crisis también se vivió en la ciudad de Villavicencio con el desabastecimiento de insumos agrícolas, maquinaria, vehículos y otros productos industriales que se fabrican en el centro del país. (Revista Semana, 2019) El presidente de la SAC, Jorge Enrique Bedoya, declaró que las afectaciones se dieron en cuatro sectores: frutas, arroz, avicultura y porcicultura. En el caso de la avicultura, son 1.200 toneladas de carne de pollo semanales las que se movían desde Villavicencio a Bogotá y 2.300 toneladas de alimento concentrado para más de 5 millones de aves, junto con 700.000 pollos para restaurante y asadero diariamente. En cuanto a la porcicultura, fueron más de 120 toneladas semanales de productos derivados de ese sector; pero tal vez la mayor preocupación se concentró en el sector arrocero, por donde se movilizan 250.000 toneladas, del producto, de las cuales el 95 por ciento se dirige al centro del país, incrementándose los costos de los fletes de transporte del producto en un 40 %, costos trasladados al consumidor. (Revista Semana, 2019)

### **3.3.9. Año 2023. Avalancha, sector Naranjal, municipio de Quetame**

El 17 de julio de 2023, se cierra la vía Bogotá-Villavicencio, a causa de una avalancha que se presentó en la vereda El Naranjal, municipio de Quetame, en el oriente del departamento de Cundinamarca, y que causó la muerte de 15 personas, el cierre se generara por un periodo de 3 semanas y ocasiono pérdidas de aproximadamente \$50 000 millones al día. (El Nuevo Siglo, 2023)

Por otra parte, el presidente de la Sociedad de Agricultores de Colombia (SAC), Jorge Enrique Bedoya, y los gobernadores de Cundinamarca, Nicolás García, y del Meta, Juan Guillermo Zuluaga, alertaron sobre las afectaciones al turismo y «los precios de algunos alimentos se vieron gravemente afectados dado que se represaron a causa del evento un millón de toneladas de la cosecha de arroz de los Llanos Orientales, más de 1.300 toneladas semanales de carne de cerdo, 1.200 toneladas de carne de pollo, gran parte de la producción de piña y guayaba del departamento del Meta», dijo Bedoya. Añadió que «los productores del departamento vivirán los mayores mayores costo y pérdidas, dado que el evento coincidió con varias cosechas que no podrán salir, la cantidad de alimentos perecederos en la vía es alarmante, además de que la vía alterna, que está en muy malas condiciones y que no acepta tractocamiones». Por otra parte, el gobernador de Cundinamarca, informó que se calcularon las pérdidas por el orden de \$50.000 millones al día, cifra en la que coincidió su colega del Meta. De acuerdo con FENALCO Meta, tan solo el sector comercio sufrió pérdidas por el orden de los \$8 000 millones diarios. Jorge Arango, presidente de FENALCO Meta, informó que los productos en el departamento del Meta sufrieron alzas en los precios ente un 35 % a 40 %. Jorge Andrés Duarte, presidente de COTELCO, informó que, tras la tragedia y el cierre de la vía, generó una caída en el sector hotelero superior al 80 %. (El Nuevo Siglo, 2023) Entre tanto, CONFECAR, informo que las vías alternas elevan considerablemente los costos de transporte, agregó que «los vehículos de carga pesada deben recorrer aproximada de 353 kilómetros y requieren un tiempo estimado de quince horas debido al estado de la vía, además antes de la emergencia el flete para una tractomula en la ruta Bogotá - Villavicencio era aproximadamente de \$3 millones, ahora por la vía alterna los fletes son de \$5,5 millones, lo que implica un incremento del 83 % por cuenta de un mayor gasto en combustibles, peajes, llantas, repuestos, y otros insumos debido a que la distancia incrementa de 126 kilómetros a 353 kilómetros, generando pérdidas al sector transportador de más de 2.700 millones de pesos al día». El gremio reportó que los principales alimentos transportados son pollo, cerdo, arroz, plátano y frutas. (El Nuevo Siglo, 2023)

### **3.4. Análisis y percepción social del impacto**

El levantamiento de la información de campo necesaria para el desarrollo de este ítem, se realizó por medio de encuestas, las que se implementaron en los municipios de Chipaque, Cáqueza, Quetame y Guayabetal, en el departamento de Cundinamarca, con el fin de recolectar información, así como establecer datos y parámetros esenciales, dirigidos a los propósitos de la investigación,

para este propósito se desarrolló un formulario con preguntas cerradas, con el fin de facilitar la respuesta del encuestado y su posterior análisis estadístico, además de preguntas abiertas destinadas a establecer la percepción de los encuestados a los eventos en los municipios en mención, estas entrevistas fueron realizadas a 60 personas, entre los 28 a 68 años, tanto del área urbana como rural, destacando que todos los encuestados hacían parte proceso económico de la zona objeto de estudio y que estos se desempeñan en actividades económicas como: la agricultura, la ganadería, sector comercio, sector transporte, jornaleros, empleados e independientes, dando como resultado un total de 60 encuestas distribuidas de la siguiente manera: municipio de Cáqueza con 16 registros, municipio de Chipaque con 14 registros, municipio de Guayabetal con 15 registros y municipio de Quetame con 15 registros

La Tabla 20. Características generales de las encuestas realizadas, muestra un resumen del número de personas encuestadas en cada municipio, su género, así como el porcentaje correspondiente con respecto al total del de encuestas.

Municipio	Registro	Hombres	Mujeres	% Hombres	% Mujeres	% Total
Cáqueza	16	10	6	16,67 %	10 %	26,67 %
Chipaque	14	9	5	15 %	8,33 %	23,33 %
Guayabetal	15	8	7	13,33 %	11,67 %	25 %
Quetame	15	9	6	15 %	10 %	25 %

Tabla 20. Características generales de las encuestas realizadas  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

A continuación, se muestra la Tabla 21. Resultados del análisis estadístico de las encuestas, en donde se presentan los resultados del análisis estadístico de las encuestas e interpretación asociadas a los comentarios sobre los impactos realizados por los pobladores encuestados, además de su percepción general sobre dichos eventos presentados en la vía.

	Cáqueza		Chipaque		Guayabetal		Quetame		% Gremio		% Total
	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	
<b>Agricultura</b>	1,67	11,67	0	6,67	0	8,33	1,67	11,67	3,33	38,33	41,67
<b>Ganadería</b>	0	3,33	1,67	3,33	3,33	0	5	1,67	10	8,33	18,33
<b>Conductor</b>	0	3,33	0	3,33	0	5	0	1,67	0	13,33	13,33
<b>Comerciante</b>	0	1,67	0	3,33	0	3,33	0	0	0	8,33	8,33
<b>Independiente</b>	0	1,67	0	1,67	0	1,67	0	1,67	0	6,67	6,67
<b>Jornalero</b>	0	1,67	0	3,33	0	0	0	1,67	0	6,67	6,67
<b>Empleado</b>	0	1,67	0	0	0	1,67	0	0	0	3,33	5

Tabla 21. Resultados del análisis estadístico de las encuestas  
Fuente: El autor (2025). (Elaboración propia).

Del análisis de la información registrada, se establece que a nivel de percepción de los habitantes se encuentra dividida su interpretación y análisis frente a las consecuencias del cierre vial, en donde se describe desde su perspectiva impactos positivos a los pequeños transportadores y negativos en sectores como el agrícola.

Se describen impactos negativos en el sector agrícola, en donde por parte de la población se destacó la represión de productos de tipo perecedero, de manera principal las frutas, plátano y yuca, al inicio de los eventos y posteriormente los sobrecostos en el transporte de estos, al intentar sacar los productos por vías alternas, además del alto costo y escasez de los insumos para la producción agrícola, por otra parte, se menciona que el sector arrocero no presentó mayores alteraciones salvo el incumplimiento en sus entregas, dado que el producto se podía almacenar por largos periodos de tiempo y/o se podía transportar por otras vías sin riesgos de que se viera afectada esta producción por el deterioro del producto.

Dentro del sector agrícola, se destaca la descripción de impactos negativos destacando en el sector piscícola y ganadero, en donde este último describe afectaciones negativas de manera reiterativa al subsector porcicultor, manifestando que la escasez de insumos y sobrecostos por el incremento del transporte, afectaron gravemente el sector, problemas que no manifestaron los comerciantes de ganado bovino, dado que se expresó que este salía por la vía que comunica el departamento de Norte de Santander con el departamento de Arauca o por la vía que comunica el departamento de Boyacá con el departamento de Casanare, se menciona que el principal mercado porcino es la ciudad de Bogotá y los municipios cercanos a esta, por lo que los incrementos en el transporte generan altas pérdidas al sector, haciéndolo una actividad no rentable, por el contrario el ganado bovino al ser en su mayoría un producto para la exportación podía ser transportado por otras vías alternas sin que afectara de manera sustancial las utilidades de los productores incluso se menciona que este producto se podía ingresar a Venezuela y desde este país se envía a Egipto y otros países, por otra parte se menciona que el sector piscícola se vio seriamente afectado y debió replantearse su producción, al tener que destinarse su producto a un consumo interno y en donde este sector disminuyó de manera sustancial sus utilidades al ser el principal centro de consumo la ciudad de Bogotá y no poder sacar el producto dados los altos los costos de transporte.

Dentro de los impactos positivos resalta en la población encuestada, los descritos por los pequeños transportadores, quienes manifestaron que este evento los beneficio de manera temporal, dado que hubo aumento en el número de viajes que debían realizar por vías terciarias, a fin de transportar las personas y mercancías, provenientes desde el interior del país, y que se dirigían hacia la ciudad de Villavicencio u otras regiones de la Orinoquia, donde se destaca de los comentarios, que las personas y productos llegaban a los municipios de Cáqueza y/o Guayabetal (Cundinamarca) desde donde se realizaba el transbordo de mercancías y/o personas, los que se movilizaban en camperos hacia la ciudad de Villavicencio y desde la ciudad de Villavicencio a estos mismos municipios y se realizaba desde estos el traslado a la ciudad de Bogotá.

Respecto al sector comercio, los encuestados no manifestaron el haber presentado mayores alteraciones en su dinámica, salvo las demoras en el abastecimiento de productos y el incremento de los precios de los productos provenientes del interior del país, dados los incrementos en el costo y tiempos del transporte.

Por otra parte, los empleados independientes, manifestaron no haber presentado mayores alteraciones en sus actividades económicas, salvo las demoras en el abastecimiento de insumos y sobre costo en estos.

Las personas dedicadas a actividades de jornal en las fincas, manifiestan que durante los eventos algunos se vieron perjudicados dada la baja en las actividades agrícolas, pero rápidamente encontraron trabajo como coteros en el cargue y descargue de mercancías, donde fueron contratados para hacer el cargue y descargue de los grandes camiones a pequeños vehículos que se dirigían hacia la ciudad de Bogotá o Villavicencio.

Los encuestados que manifestaron ser empleados manifestaron no haber presentado ninguna alteración en sus actividades económicas, salvo el haber notado el incremento de costos en los productos de la canasta familiar

De manera general se puede establecer que algunas personas que se desempeñan dentro del sector informal de la economía, se vieron tanto beneficiados como perjudicados, resaltando que fueron más los beneficios descritos por esta población, se resalta que esta encuesta contrasta con los datos

que reportan los gremios económicos, quienes reportan pérdidas que contrastan respecto a los datos reportados por la población, se resalta de las respuestas de la población que en un alto porcentaje ellos manifiestan «aquí hemos aprendido a convivir con este fenómeno y hemos adoptado medidas de contingencia ante los frecuentes cierres viales», en donde se reconoce por parte de los encuestados que la principal afectación está dirigida a la movilidad, en especial de turistas, destacando el aumento de los fletes de transporte, el aumento en los tiempos de movilización de personas y mercancía y el aumento del costo de vida el cual se ve reflejado en los costos de la canasta familiar, por otra parte los pobladores manifiestan que estos eventos se presentan a causa de la corrupción y abandono de la región por parte de los organismos del estado y la corrupción en los administradores de la concesión vial, quienes solo están dirigiendo sus esfuerzos al mantenimiento de un peaje y no han generado medidas adecuadas para dar solución al problema que afecta la vía y la región desde que se construyó la vía.

\* Ver **ANEXO 4**. FORMULARIO DE ENTREVISTA

\* Ver **ANEXO 5**. TABLA DE RESULTADOS ENTREVISTA DESARROLLADAS EN CAMPO

\* Ver **ANEXO 6** ENTREVISTA DESARROLLADAS EN CAMPO

### **3.5. Impactos generados por los cierres en la vía al Llano**

Este corredor vial es uno de los más transitados a nivel nacional y es el más afectado por los periodos de alta precipitación en el país, generando cierres parciales y/o definitivos, en la vía que conecta los Llanos Orientales con el centro del país, a lo largo de la historia estos eventos generan efectos a la población y el transporte terrestre desde y hacia la región, por lo tanto, ante el inicio de cada periodo de lluvias se espera se presenten impactos en las actividades económicas de los Llanos orientales hacia el centro del país y un incremento de los precios de los productos movilizados hacia otros municipios.

La vía a Villavicencio, denominada la puerta al Llano, influye de manera directa en las economías de los departamentos de Arauca, Casanare, Meta y Vichada, en el periodo comprendido entre el año 2018 a 2023, estos departamentos representaron cerca del 5,7 % del valor agregado del país, esta zona es considerada una de las regiones más importantes para el crecimiento del sector minero-energético, dados sus yacimientos de petróleo y gas natural, llegando incluso a contribuir con el 50

% de la producción real del sector. Las actividades agropecuarias también constituyen un pilar clave en su economía, permitiendo el abastecimiento de diferentes zonas del país con productos como el arroz, el aceite de palma, el maíz y la carne de res, además del alto flujo de turismo actividad con alto crecimiento en la región, dada la variedad de fauna y flora. Sin embargo, la región se ubica en una zona geográfica con dificultades topográficas e inestabilidad en sus laderas, lo que la hace sensible a las condiciones climáticas adversas, tal como el exceso de lluvias, estos factores han afectado las condiciones físicas de su red vial, generando cierres temporales y/o definitivos en la vía. (Carmona et al., 2023)

**Movimiento de mercancías:** El Registro Nacional de Despacho de Carga (RNDC) del Ministerio de Transporte, consolida los manifiestos de carga por carretera de las empresas logísticas registradas en el país y caracteriza el movimiento interno de mercancías a nivel regional. En donde los Llanos Orientales contribuyen con solo el 4,0 % de la carga sólida total, aunque esta es la región con mayor participación en el transporte de carga líquida (40,6 %), confirmada por la producción de aceites crudos de petróleo, gases y otros líquidos inflamables. Dentro de los principales destinos de los bienes producidos en la Orinoquia, se destaca la demanda proveniente de los departamentos de la misma región (con una participación promedio del 41,3 %); de la región Central (37,7 %) y dados los canales de abasto de productos agropecuarios en la ciudad de Bogotá y ciertos municipios de Cundinamarca, y de la región Caribe (10,2 %). Acorde con las series datos del RNDC, desde los eventos en la vía, el movimiento de mercancías por carretera desde los Llanos Orientales hacia el resto del país registró una contracción mensual entre él (-0,7 % y -2,6 %), principalmente por el bajo flujo de mercancías hacia la región Central, el Pacífico y el Eje Cafetero (que incluye a Antioquia). Cabe señalar que este comportamiento habría sido parcialmente compensado por el dinamismo que mantuvo el flujo entre los departamentos de la región, también se redujo la carga sólida movilizada del resto del país hacia la región, menos toneladas desde el Centro del país, el Caribe y los Santanderes. En donde el sector agropecuario fue el que mayor reducción presentó en el movimiento de carga proveniente de los Llanos Orientales (-13,3 % anual), a raíz de las menores toneladas transportadas de productos como arroz, semillas y frutos oleaginosos, semillas de girasol, paja y cascabillo de cereales, y animales vivos de la especie porcina, los cuales presentaron una reducción entre el 18 % y el 21,8 %, además los productos manufacturados transportados desde los Llanos Orientales registraron un crecimiento anual del 4,1 %, por un mayor movimiento de carga en las toneladas de mercancías como el aceite de palma, las manufacturas de piedra, grasas y aceites

animales, tortas, madera en bruto y cementos hidráulicos, que contribuyeron en conjunto con 15,5 % anual, además los flujos movilizados desde el resto del país hacia la región cayeron en un 6,2 % anual, representado por productos como agua, productos para la construcción y alimento para animales. (Carmona et al., 2023)

**Transporte de pasajeros intermunicipales:** Según la información registrada por la Superintendencia de Transporte sobre el movimiento intermunicipal de pasajeros obtenida a través de los reportes de las terminales de transporte, los pasajeros movilizados por carretera desde y hacia los Llanos Orientales representaron el 4,9 % del flujo total del país, en donde se registró una caída anual del 15,6 %, tanto por la disminución del transporte de pasajeros provenientes del Llano con una reducción entre el 15,1 % y el 27,6 %, como el flujo de pasajeros entrantes a la región, con una reducción del 7,6 %, en donde la reducción as marcada se concentra en el flujo hacia los departamentos de la región Central, con una reducción del 18,5 %. (Carmona et al., 2023)

**Turismo:** Según lo sugieren diversos indicadores, los sectores relacionados con el turismo presentaron afectaciones importantes, de acuerdo con los resultados de la Encuesta mensual de alojamiento (EMA) del DANE, la cual brinda información sobre el comportamiento de los establecimientos que prestan servicios de alojamiento, el porcentaje de ocupación hotelera en la región disminuyó alrededor del 36,0 %, registrando que este comportamiento estuvo concentrado en las personas que viajaron por vacaciones, ocio y recreo, en donde la dinámica en los ingresos de los hoteles según la EMA, presentaron retrocesos entre el 17,7 % y el 25,5 %, además recayó en el personal ocupado en la rama. De manera general, según los datos registrados por el DANE, durante los cierres en la vía al Llano, el tráfico de vehículos que pasaron por los peajes no se habría visto afectado de manera considerable por los cierres, registrando una variación anual del 14,4 %. De acuerdo con la información de la ANI, el flujo de vehículos que transitan por los peajes del Llano representa cerca del 9,0 % del tránsito total por peajes en el país. (Carmona et al., 2023)

### **3.6. Análisis del impacto económico y ambiental por derrumbes en la vía Bogotá Villavicencio**

Actualmente, Colombia es un país donde la carga se moviliza principalmente por carretera. Durante el año 2022 se movilizaron por el país un total de 301 millones de toneladas, de las cuales 263 millones se movilizaron por carretera, lo que representa el 87% (Ministerio de Transporte, 2022).

Este modelo de transporte ha ganado importancia con el paso de los años, en donde para el año 2005 el porcentaje de carga que se movilizaba por carreteras era del 80% (Pérez – Valbuena, 2005). Lo anterior es consistente con lo que se observa en el contexto Latinoamericano, donde países como Argentina, México y Uruguay registran que más del 70% de la carga se moviliza por carreteras, al igual que sucede en países como España y Francia (Barbero y Guerrero, 2017). Por lo tanto, resulta primordial el garantizar la conexión vial con aquellas regiones con gran relevancia en distintos sectores productivos y mejorar los tiempos de desplazamiento. (Ayala & Pérez, 2024)

Los costos de transporte representan uno de los principales determinantes del comercio subnacional. Los desastres naturales como los deslizamientos, pueden afectar vías principales y reducir el movimiento de carga entre ciudades. La vía Bogotá – Villavicencio en Colombia, conocida como la Vía al Llano, la cual es fundamental para el transporte de productos desde y hacia la región de los llanos orientales, enfrenta desafíos debido a su ubicación geográfica, donde los desastres naturales afectan el movimiento de carga por este corredor vial, generando afectaciones económicas como el incremento de los costos de fletes para los transportadores. Con datos del Registro Nacional de Despacho de Carga (RNDC) del Ministerio de Transporte y los reportes de estados de las vías del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), se encuentra que los desastres naturales que afectan la Vía al Llano incrementan el valor del flete, y disminuyen el volumen de mercancías transportadas por dicha vía. Esto demuestra que los desastres naturales tienen un efecto negativo sobre el comercio nacional, lo cual puede afectar la dinámica económica de la región ante las amenazas por deslizamiento a causa de las temporadas de lluvias o los escenarios de cambio climático. (Ayala & Pérez, 2024)

La nueva vía Bogotá – Villavicencio, conocida como la nueva Vía al Llano, es uno de los corredores más importantes del país, por esta vía se abastece el 48 % de la demanda de alimentos de Bogotá y entre el 50% y el 70% de la carne de cerdo y de res. La carretera une la capital de Colombia con Villavicencio, que es el centro de acopio de productos de los llanos orientales por su conexión con la región de la Orinoquia y Bogotá. Esta ruta de 86 kilómetros presenta un tiempo de recorrido aproximado de tres horas. Este corredor vial hace parte de la Ruta Nacional 40, que busca unir el Pacífico colombiano con las principales ciudades del centro del país y los Llanos orientales, conectando el puerto de Buenaventura (Valle del Cauca) con Puerto Carreño (Vichada). (Ayala & Pérez, 2024)

En la actualidad, la Vía al Llano cuenta con tres peajes por los que transitan 11.000 vehículos en promedio al día (Agencia Nacional de Infraestructura, 2018). Existen solo dos vías adicionales que sirven para conectar la capital del Meta con Bogotá, las cuales se encuentran en mal estado, además de que su recorrido es más largo. La opción vial alterna es la Transversal del Sisga con 137 Km, la que se recorre en aproximadamente 8 horas, y el corredor vial Briceño - Tunja - Sogamoso con 350 Km, el que se transita en aproximadamente 11 horas. Esto posibilitaría la entrada de productos provenientes de los departamentos del Meta, Casanare, Vichada y Arauca, que componen los llanos orientales, importantes en la producción agrícola, pecuaria y minera. Respecto al sector turístico, los Llanos Orientales se caracteriza por amplias llanuras y sabanas que son vistos como suelo rural y paisajes naturales (Gutiérrez-Lesmes, 2015) en (Ayala & Pérez, 2024).

Aunque esta vía es la más importante de los Llanos Orientales, ya que es la que trae más recursos a la región (García, 2019), ha presentado muchos problemas dada la dificultad de su ubicación. Esta carretera fue construida en una cordillera sedimentaria que aún se encuentra en formación y con un elevado grado de afectación tectónica, acompañado de un alto nivel de lluvias (Duque, 2019; Jara, 2018). Se ha identificado que los desplazamientos de suelo afectan en gran medida la infraestructura vial, especialmente en invierno (Jiménez 2022; García 2019). En la construcción de la Vía al Llano se presentaron graves problemas de ingeniería (Jara, 2018; Duque, 2019). Construir una carretera en un terreno montañoso y en presencia de una cordillera puede provocar riesgos inevitables. La topografía y la geología del área puede dar lugar a deslizamientos de tierra, erosión y otros problemas relacionados con el terreno. Esto da lugar a la búsqueda de soluciones avanzadas en el campo de la ingeniería, además de un enfoque cuidadoso en la mitigación de riesgos. (Ayala & Pérez, 2024).

El costo de transporte representa uno de los principales determinantes del comercio subnacional, y los desastres naturales como los deslizamientos afecta de forma directa las vías principales y afecta el transporte reduciendo el flujo de la carga entre la ciudad de Bogotá y Villavicencio. La distancia desde la región importadora impacta negativamente el transporte de mercancías (Ham et al., 2005; Filatov y Novikova, 2015). La destrucción de la infraestructura de transporte obstaculiza la actividad económica y la competitividad empresarial (Ham et al., 2005). Estos eventos dejan claro la necesidad y urgencia de mantener y fortalecer los procesos de resiliencia y la gestión efectiva para mantener

la movilidad en la infraestructura de transporte destacando desafíos económicos a largo plazo (Liu et al., 2023; Yang et al., 2023). (Ayala & Pérez, 2024).

Durante la manifestación de un desastre natural como un deslizamiento, los tiempos de tránsito aumentan significativamente por el mal estado de las carreteras, debido a la reducción en la velocidad de los conductores. lo que genera incrementos considerables en los costos logísticos y de transporte asociados al comercio (Hassan et al., 2016; Pregolato et al., 2017; Ahmed y Ghasemzadeh, 2018). Este aumento se ve incrementado con los desvíos hacia vías secundarias igualmente deterioradas (Diakakis et al., 2020; Singh et al., 2018), lo cual sobrelleva incrementos en las distancias recorridas. (Ayala & Pérez, 2024).

Investigaciones recientes (Ham et al., 2005; Park et al., 2011; Xu & Kouwoaye, 2019; Hamano & Vermeulen 2020) han presentado datos sobre la gravedad de estos impactos, especialmente en la vulnerabilidad de las vías y el transporte de mercancías (Khademi et al., 2015; Singh et al., 2018; Gecchele et al., 2019; Zhang et al., 2020; Morelli y Cunha, 2021; Liu et al., 2021). En donde además, la falta de competencia en los mercados de transporte también contribuye a mantener los costos elevados durante un desastre natural (Rizet y Hine, 1993; Ham et al., 2005; Gossler et al., 2019). Durante situaciones de emergencia, los desastres naturales afectan las relaciones comerciales regionales debido al cierre temporal o permanente de las vías, imposibilitando la comunicación con los centros de producción y la infraestructura vial dañada, dificultando el acceso y la disponibilidad de bienes y servicios (Ham et al., 2005; Xu & Kouwoaye, 2019; Hamano & Vermeulen 2020). De ahí la importancia de analizar la interrelación entre la actividad económica, la infraestructura de transporte y los costos asociados (Park et al., 2011) en (Ayala & Pérez, 2024).

El corredor vial Bogotá – Villavicencio, presenta impactos económicos, sociales y ambientales, presentando cambios en el paisaje, el ordenamiento territorial, en la población y en la manera como se percibe la importancia de contar con un medio de transporte y procesos que respondan a el mantenimiento de los corredores viales y mantengan el desarrollo regional (Gutiérrez, 2015) en (Ayala & Pérez, 2024).

A causa de los múltiples derrumbes presentados en el km 58 durante el mes de en junio y julio de 2023, se registraron cierres totales de la vía Bogotá – Villavicencio, derrumbes presentados el 24 de

junio generando cierre total hasta el 30 de junio. Luego, el 17 de julio se presentó la avalancha en el municipio de Quetame (Cundinamarca), que causó la muerte de 28 personas y arrasó con la vereda El Naranjal. En la emergencia se dañaron dos puentes de la vía, provocando el cierre total de este corredor vital para el transporte de carga. La solución a corto plazo para habilitar el paso tras la emergencia fue la instalación de dos puentes metálicos. Este cierre total se llevó a cabo entre el 16 al 30 de julio de 2023. (Universidad de los Andes, 2023)

La Fotografía 17. Zona de deslizamiento Vía Bogotá – Villavicencio Km 58, muestra las operaciones de carga en procesos de despeje vial desarrolladas por medio de maquinaria amarilla, así como la ubicación de estructuras metálicas para la contención de material. De destaca en la fotografía los niveles de saturación de agua presentados en el área de deslizamiento, los que se ven reflejados en el nivel de humedad de los materiales presentados sobre la vía.



*Fotografía 17. Zona de deslizamiento Vía Bogotá – Villavicencio Km 58  
Fuente: COVIANDINA en Universidad de los andes (2023)*

La Imagen 14. Corredor vial Bogotá – Villavicencio, muestra la zona del deslizamiento presentado en el Km 58 de este corredor vial, en cercanías al sector de Chirajara, la imagen además nos muestra los avances de vía de 1ra Generación y 4ta Generación, en este corredor.



Imagen 14. Corredor vial Bogotá – Villavicencio  
Fuente: Universidad de los andes (2023)

Es de destacar que el corredor vial Bogotá Villavicencio, en condiciones de normalidad tiene un trayecto de 100 km con un tiempo aproximado de tránsito para vehículos de carga de 4 horas. Al momento de presentarse una emergencia los protocolos de descongestión vial, desvían el transporte de carga a dos vías alternas, la Ruta Bogotá-Sisga – Villanueva - Villavicencio que es habilitada con procesos de restricción de peso, limitando el tránsito de vehículos de más de 30 toneladas y autorizados a realizar únicamente circulación diurna, este trayecto de 353 km y un tiempo tránsito para camiones de aproximadamente 11 horas. La segunda ruta alterna es Bogotá – Tunja – Pajarito – Aguazul – Villanueva - Villavicencio sin restricción de capacidad por peso, por la cual circulan los tractocamiones en un trayecto de 560 km y un tiempo de tránsito de aproximadamente 15 horas. (Universidad de los Andes, 2023)

La Imagen 15. Vía alterna Bogotá – Tunja – Pajarito – Aguazul – Villanueva - Villavicencio, muestra uno de los corredores viales alternativos con los que se intenta mitigar los impactos de los cierres ante la manifestación de deslizamientos, se destaca de este corredor que no presenta ningún tipo de restricción de carga al tránsito de automotores.

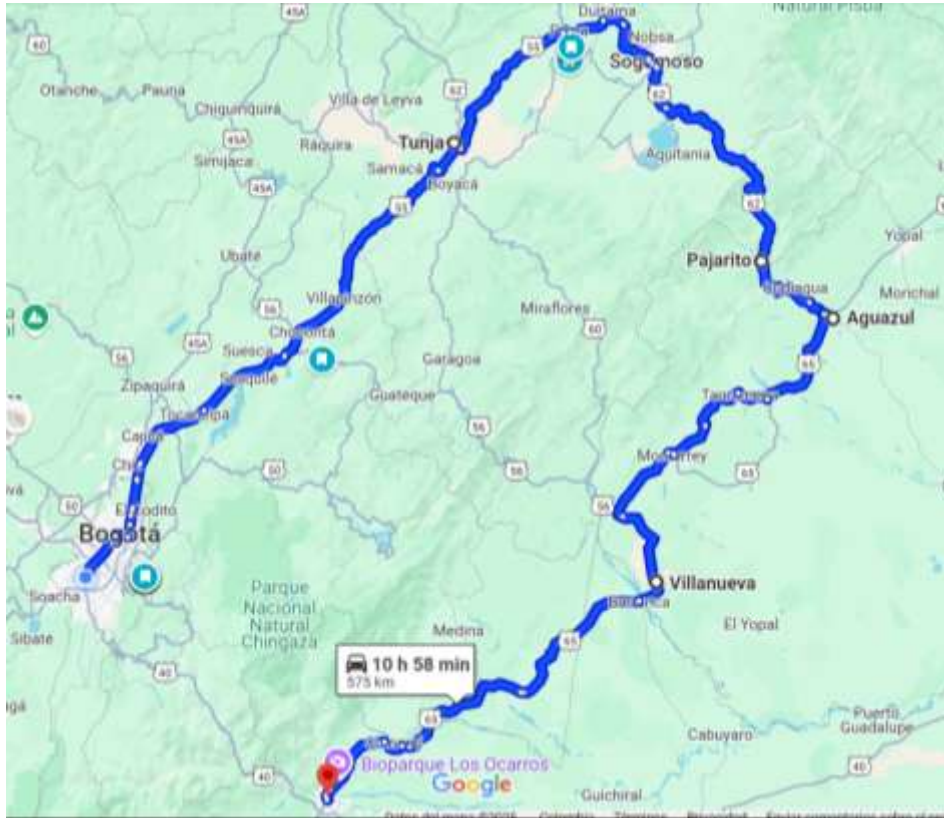


Imagen 15. Vía alterna Bogotá – Tunja – Pajarito – Aguazul – Villanueva - Villavicencio  
 Fuente: Google. (s.f.). [Imagen la vía Bogotá – Tunja – Pajarito – Aguazul – Villanueva - Villavicencio].

Recuperado de [[https://www.google.com/maps/dir/4.6210668,-74.1441073/Tunja,+Boyac%C3%A1/Pajarito,+Boyac%C3%A1/Aguazul,+Casanare/Villanueva,+Casanare/Villavicencio,+Mota/@5.0428478,-73.9796301,9z/data=!4m34!4m33!1m1!4e1!1m5!1m1!1s0x8e6a7c2e897fba5b:0xac9fda7e6b9aa68c!2m2!1d-73.3575572!2d5.5446422!1m5!1m1!1s0x8e6b1d5dc3102e03:0xe7c5b15dd209c0e2!2m2!1d-72.7028179!2d5.2931929!1m5!1m1!1s0x8e6b184123d9e8ef:0x8902c0a035425844!2m2!1d-72.550819!2d5.170847!1m5!1m1!1s0x8e153b65c17b03df:0xe28479c736c36c80!2m2!1d-72.928126!2d4.611252!1m5!1m1!1s0x8e3e2ddfba283211:0x537e40041d7b20c2!2m2!1d-73.6285475!2d4.1491688!3e0?entry=ttu&\\_ep=EgoyMDI1MDcxNi4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/dir/4.6210668,-74.1441073/Tunja,+Boyac%C3%A1/Pajarito,+Boyac%C3%A1/Aguazul,+Casanare/Villanueva,+Casanare/Villavicencio,+Mota/@5.0428478,-73.9796301,9z/data=!4m34!4m33!1m1!4e1!1m5!1m1!1s0x8e6a7c2e897fba5b:0xac9fda7e6b9aa68c!2m2!1d-73.3575572!2d5.5446422!1m5!1m1!1s0x8e6b1d5dc3102e03:0xe7c5b15dd209c0e2!2m2!1d-72.7028179!2d5.2931929!1m5!1m1!1s0x8e6b184123d9e8ef:0x8902c0a035425844!2m2!1d-72.550819!2d5.170847!1m5!1m1!1s0x8e153b65c17b03df:0xe28479c736c36c80!2m2!1d-72.928126!2d4.611252!1m5!1m1!1s0x8e3e2ddfba283211:0x537e40041d7b20c2!2m2!1d-73.6285475!2d4.1491688!3e0?entry=ttu&_ep=EgoyMDI1MDcxNi4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D)]

La Imagen 16. Vía alterna Bogotá - Sisga – Villanueva - Villavicencio, muestra uno de los corredores viales alternativos con los que se intenta mitigar los impactos de los cierres ante la manifestación de deslizamientos, este corredor presenta restricciones de carga en donde no pueden transitar automotores de más de 30m toneladas.

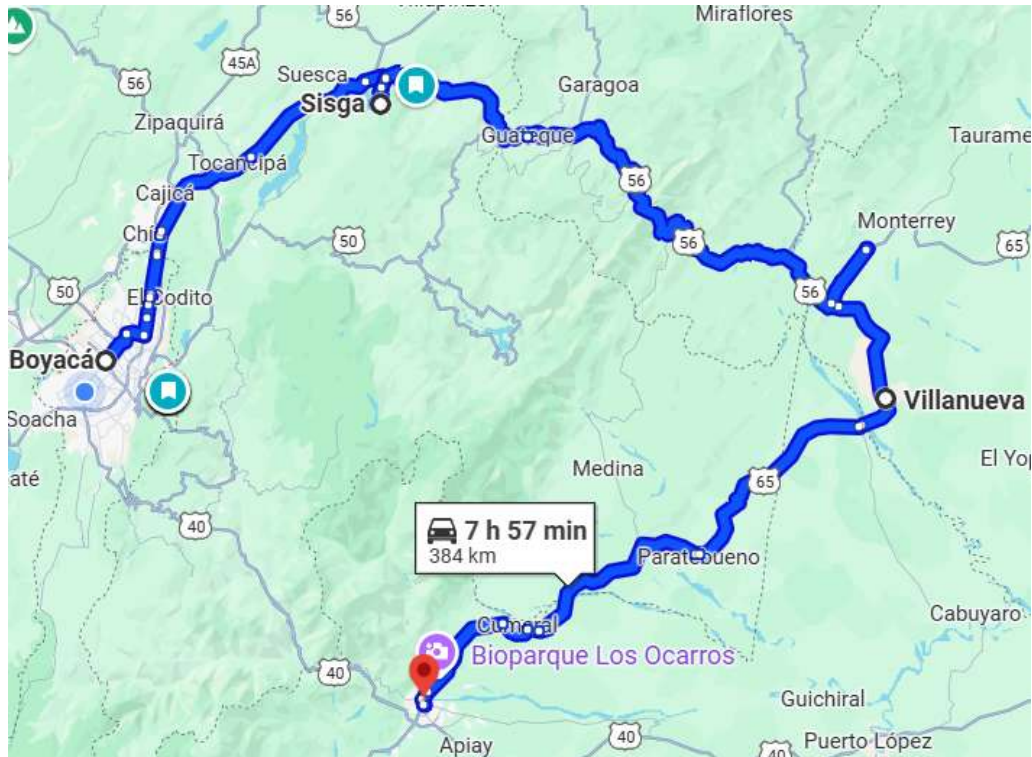


Imagen 16. Vía alterna Bogotá - Sisga – Villanueva - Villavicencio  
 Fuente: Google. (s.f.). [Imagen la vía Bogotá - Sisga – Villanueva - Villavicencio].  
 Recuperado de [https://www.google.com/maps/dir/4.667408,-

74.110625/Sisga,+Chocont%C3%A1,+Cundinamarca/Villanueva,+Casanare/Villavicencio,+Meta/@4.627027,-74.1572129,9z/data=!4m2!4m2!1m0!1m5!1m1!1s0x8e4011cf1ca18f07:0xd7a29ac0d00f7846!2m2!1d-73.6941425!2d5.0551955!1m5!1m1!1s0x8e153b65c17b03df:0xe28479c736c36c80!2m2!1d-72.928126!2d4.611252!1m5!1m1!1s0x8e3e2ddfba283211:0x537e40041d7b20c2!2m2!1d-73.6285475!2d4.1491688!3e0?entry=ttu&g\_ep=EgoyMDI1MDcxNi4wLWlKXMDSoASAFQAw%3D%3D].

Según el Tablero de Indicadores GIRO ZERO de la Universidad de los Andes, el que se basa en los informes del RND - Registro Nacional de Despachos de Carga del Ministerio de Transporte, entre los meses de junio y Julio de 2023, se observó un incremento de los costos por viaje en aproximadamente un 37,5%, en la ruta Bogotá Villavicencio, con una muestra de 3628 viajes de automotores de transporte de carga, en los que no se contabiliza el transporte de líquidos. (Universidad de los Andes, 2023)

La Imagen 17. Consulta del tablero GiroZero, transporte de carga para el mes de julio de 2023 en la Ruta Bogotá Villavicencio, muestra los estadísticos del paso de vehículos de carga asociados al mes de julio de 2023, en el corredor vial Bogotá Villavicencio.

## Tablero de indicadores



Imagen 17. Consulta del tablero GiroZero, transporte de carga para el mes de julio de 2023 en la Ruta Bogotá Villavicencio  
Fuente: GiroZero (2023)

Imagen 18. Consulta del tablero GiroZero, transporte de carga para el mes de junio de 2023 en la Ruta Bogotá Villavicencio muestra los estadísticos del paso de vehículos de carga asociados al mes de junio de 2023, en el corredor vial Bogotá Villavicencio.

## Tablero de indicadores



Imagen 18. Consulta del tablero GiroZero, transporte de carga para el mes de junio de 2023 en la Ruta Bogotá Villavicencio  
Fuente: GiroZero (2023)

Esta fuente establece que el incremento más alto se registró el segmento correspondiente a los vehículos clasificados como doble-troques y tractocamiones los que presentaron un incremento del 53,2% y 46,4%, seguido de los vehículos tipo turbo y sencillos con un incremento de 27,8%, lo cual está relacionado con el esquema de vías alternas, las cuales generaron un mayor recorrido para los camiones más pesados, los que debieron acceder por la vía Pajarito Aguazul, mientras que los camiones más livianos realizan la circulación por el corredor vial del Sisga. (Universidad de los Andes, 2023)

La Tabla 22. Reporte de pago según RNDC entre los meses de junio y julio de 2023, muestra la diferencia de pagos reportados entre los meses de junio y julio de 2023, para los diferentes tipos de vehículos de carga, en donde en promedio se registra un aumento del 37,5 %.

Valor pagado por Viaje RNDC				
Nombre Camión	Tipo	Junio 2023	Julio 2023	Dif en %
Turbos y sencillos	C2	\$ 771.634	\$ 986.434	27,8%
Dobletroques	C3	\$ 1.398.642	\$ 2.143.373	53,2%
Tractocamiones	C2S1 a C3S3	\$ 1.950.901	\$ 2.856.940	46,4%
<b>Total</b>		<b>\$ 888.457</b>	<b>\$ 1.221.595</b>	<b>37,5%</b>

Tabla 22. Reporte de pago según RNDC entre los meses de junio y julio de 2023  
Fuente: Universidad de los Andes, (2023)

El impacto se vio amortiguado debido a que la industria y comercio, que son generadores de carga, en conjunto con los transportadores de carga, elevaron la utilización de capacidad de carga de cada camión en un 12,2%, pasando de 6,73 a 7,55 toneladas por viaje. Por tal razón, el costo por tonelada, que es lo que pagan finalmente los consumidores, subió en un 22,6%. (Universidad de los Andes, 2023)

Valor pagado por tonelada RNDC				
Nombre Camión	Tipo	Junio 2023	Julio 2023	Dif en %
Turbos y sencillos	C2	\$ 159.756	\$ 196.555	23,0%
Dobletroques	C3	\$ 95.832	\$ 157.150	64,0%
Tractocamiones	C2S1 a C3S3	\$ 80.854	\$ 110.482	36,6%
Total		\$ 131.968	\$ 161.836	22,6%

Tabla 23. Valor pagado por tonelada según el RNDC en los meses de junio y julio de 2023  
Fuente: Universidad de los Andes, (2023)

La Tabla 24. Toneladas por viaje según RNDC durante los meses de junio y julio de 2023, muestra el número de toneladas por viaje realizado por cada tipo de vehículo de carga según reporte del RNDC durante los meses de junio y julio de 2023.

Toneladas por viaje RNDC				
Nombre Camión	Tipo	Junio 2023	Julio 2023	Dif en %
Turbos y sencillos	C2	4,83	5,02	3,9%
Dobletroques	C3	14,60	13,64	-6,6%
Tractocamiones	C2S1 a C3S3	24,13	25,86	7,2%
Total		6,73	7,55	12,2%

Tabla 24. Toneladas por viaje según RNDC durante los meses de junio y julio de 2023  
Fuente: Universidad de los Andes, (2023)

La Tabla 25. Número de viajes por tipo de vehículo de carga, según RNDC durante los meses de junio y julio de 2023, muestra el número de viajes según el tipo de vehículo automotor (cada tipo de camión), en donde se observa registra que los camiones de dos ejes C2, Vanes, Turbos y sencillos representan el 88% de los viajes realizados y movilizan el 66% de las toneladas transportadas durante el periodo. Mientras que los tractocamiones que corresponde al tipo de vehículos con mayor capacidad de carga representan el 10% de los viajes realizados y logran movilizar el 36% de la carga movilizada durante el periodo. (Universidad de los Andes, 2023)

Nombre Camión	Tipo	Viajes observados Jun-Jul 2023	% Viajes según Tipo de camión	Toneladas observadas Jun-Jul 2023	% toneladas según Tipo de camión
Turbos y sencillos	C2	3191	88%	16018,82	61%
Dobletroques	C3	73	2%	995,72	4%
Tractocamiones	C2S1 a C3S3	364	10%	9413,04	36%
<b>Total</b>		<b>3628</b>	<b>100%</b>	<b>26427,58</b>	<b>100%</b>

Tabla 25. Numero de viajes por tipo de vehículo de carga, según RNDC durante los meses de junio y julio de 2023  
Fuente: Universidad de los Andes, (2023)

Según FEDETRANSCARGA, los impactos económicos estimados al inicio de la emergencia fueron evaluados en aproximadamente 5.000 millones de pesos. Posteriormente, con la información registrada en el RNDC del Ministerio de Transporte, junto con el reporte del promedio de toneladas movilizadas mensualmente en este corredor, se observa que el impacto económico ascendió a 4.072 millones por la tarifa, pero se presentó una reducción de 1.473 millones de pesos, por la optimización en la productividad dado el aumento de las toneladas en cada viaje, razón por la que el impacto final fue estimado en 2.598 millones de pesos, una cifra menor a la estimado por FEDETRANSCARGA, debido al incremento en la capacidad de carga, debido a la implementación de los acuerdos en transporte de carga junto con los acuerdos negociados entre transportadores, empresas de transporte y generadores de carga. (Universidad de los Andes, 2023)

Impacto económico (costo por tonelada)	Julio 2023
<b>Incremento de costo por tonelada</b>	\$29.868
<b>Toneladas movilizadas por mes</b>	87.000
<b>Impacto económico en un mes (\$COP)</b>	\$2.598.527.000
<b>Impacto en emisiones adicionales por mes (CO2e)</b>	336,4 toneladas de CO2e

Tabla 26. Impacto económico julio de 2023  
Fuente: Universidad de los Andes, (2023)

Finalmente, esta cifra, aunque es alta e importante, representa solo el 11% de los vehículos que transitaban por el corredor vial y el estimado en recaudo de peajes en un mes. Debido a que el transporte tuvo que ser redirigido por las rutas alternas, las emisiones de Gases de Efecto

Invernadero aumentaron en aproximadamente un 28 %, generando un estimado de 336 toneladas de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) adicional por cada mes de afectación en el corredor vial., este estimado generó un costo adicional de 131 millones de pesos por emisiones si se pagaran offset a valor de mercado internacional, para un total del impacto económico generado por emisiones de 2.730 millones de pesos. (Universidad de los Andes, 2023)

El análisis presentado corresponde solo a la variación de los indicadores del corredor vial Bogotá - Villavicencio, en donde no se incluyen otros orígenes con destino la ciudad de Villavicencio, ni tampoco otros destinos relacionados a transporte en el departamento del Meta o demás departamentos de los llanos orientales, bajo este concepto se establece que se asume que estos tramos iniciales o finales no tuvieron variación significativa durante la emergencia, sin embargo al tomar como variable de análisis el volumen de vehículos de carga reportado por los peajes, el TPD - Trafico Promedio Diario, se considera que los otros destinos están considerando las variaciones de las cifras totales. (Universidad de los Andes, 2023)

De manera general se establece que la existencia de cierres en la Vía al Llano, genera incrementos en los costos de transporte en un 41,1 %, mientras que un día más de cierre genera un aumento de los fletes en un promedio del 3,7%. Al examinar el efecto de los cierres de la Vía al Llano causados por los desastres naturales al desglosar las mercancías por sector, se destaca que los aspectos más afectados ante estos procesos son los cultivos y plantas. (Ayala & Pérez, 2024).

# CAPÍTULO 4

## MÉTODOS

En el contexto de lo que ha sido el proceso y desarrollo de la atención de desastres en las vías del territorio colombiano se ha recurrido de manera frecuente a realizar intervención y despeje de los corredores viales afectados por deslizamientos con métodos convencionales, asociados a la realización de operaciones con maquinaria amarilla.

Bajo este panorama el gobierno nacional ha generado propuestas de atención en donde la puesta en marcha del programa caminos para la prosperidad que ejecuta el Instituto Nacional de Vías en la red terciaria, así como el programa de mantenimiento vial del INVIAS, desarrollado en las diferentes regiones del país, cuya estrategia es impulsar la conservación de la infraestructura vial y que en su implementación este bajo las necesidades del evento, así como los recursos económicos y disponibilidad de tiempos para el restablecimiento de la comunicación vial. En el caso de las vías no pavimentadas, las características de un mantenimiento periódico, pero dichas inversiones en muchos casos se pierden, ya que no se cuenta con un mantenimiento rutinario, el cual ayude a la prevención de eventos y el sostenimiento en el tiempo de los trabajos realizados. En el caso de las vías primarias se realiza el mantenimiento y despejes viales acorde a lo establecido en el «MANUAL DE MANTENIMIENTO DE CARRETERAS» elaborado por la Subdirección de estudios e innovación, perteneciente a la Dirección técnica del INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVIAS del Ministerio de Transporte.

Por mucho tiempo se ha observado en Colombia, como se ejecutan diseños, construcción, apertura y afirmado de vías primarias, secundarias y terciarias, en zonas que no cuentan con las características estructurales para el trazado vial, además en muchos sectores no se desarrollan los programas para la ejecución de los recursos para la colocación de pavimento o tratamientos superficiales, que a futuro son afectados por las temporadas de lluvias, por el crecimiento de la vegetación, por deslizamientos etc., al ser la red vial la que representa el medio de interconexión y comunicación más importante para el desarrollo de las poblaciones permitiendo la comunicación entre ellas, el acceso a servicios, recursos y la integración territorial del país, siendo las vías una obra de infraestructura que demanda un trabajo permanente, mediante el desarrollo de obras de

mantenimiento y adecuación que permitan contar con un acceso adecuado para tener condiciones de tránsito que faciliten la movilidad de los vehículos, observamos que de manera general en las vías, en especial en las que se encuentran sin pavimentar, no se realizan labores de mantenimiento rutinario y cuando se realizan no se hace este de forma adecuada, ya que en muchos casos los municipios no se cuenta con personal con experiencia o el conocimiento o las capacidades técnicas para realizarlo, a lo que se suman las precarias condiciones litológicas y geomorfológicas en las que estas se emplazan así como lo inadecuado de su diseño, condiciones de trazado y construcción.

#### **4.1. Métodos tradicionales para el mantenimiento, restablecimiento o apertura de corredores viales para el restablecimiento de la comunicación vía terrestre**

El INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS – INVIAS, dependencia del Ministerio de Transporte, ha generado un manual donde se describen las actividades relacionadas con la construcción, mantenimiento, tipos de mantenimiento y rehabilitación de los corredores viales, los que se describen de manera general a continuación.

Es de resaltar que estos métodos, dependiendo de las condiciones topográficas, condiciones climáticas, tamaño del evento y la resistencia de los materiales a intervenir, pueden presentar diversas problemáticas, asociadas de manera general a demoras en los tiempos de solución a la problemática, esto desencadenado por la limitación de las horas de trabajo de la maquinaria y la velocidad de ejecución de las labores realizadas por los equipos.

##### **4.1.1. Constitución y tipos de materiales**

Los diversos tipos de materiales que se constituyen los depósitos varían desde roca sólida hasta tierra sola, pasando por todas las combinaciones de roca y tierra, desde este panorama los diferentes tipos de materiales ofrecen diferente resistencia para ser movidos, dependiendo del peso del material, dureza, rozamiento interno y cohesión, desde estas características se tiene que una menor resistencia de remoción implica una mayor facilidad de carga, siendo esta última fundamental en la elección del equipo o tipo de maquinaria a utilizar. Los distintos tipos de tierras se forman con rocas desintegradas, residuos vegetales y animales, los que una vez formados, comprenden una mezcla de materia mineral, materia orgánica, agua y aire, estas tierras, en

términos generales general, pueden dividirse en cinco grupos: arcillas, limos, arena, gravas y materia orgánica. En realidad, al presentarse un deslizamiento, se pueden encontrar estos materiales en forma independiente o en diversas combinaciones y mezclas. (Tiktin, 1997)

#### **4.1.2. Despeje por medio de maquinaria**

El despeje por medio de maquinaria puede comprender varias etapas, estas dependen de la diversidad de materiales, estas etapas comprenden el acondicionamiento de la excavación (In situ), remoción del material, el acarreo de materiales (transporte) y la disposición final, el proceso de remoción de materiales antes de desarrollarse comprende un proceso de acondicionamiento de la zona de trabajo: la que comprende el Desmonte, Despalme, Bombeo de agua o drenado y el Aflojado. (Vargas, 1999)

- **Desmonte:** Los terrenos en los que se van a efectuar excavaciones, para la remoción de materiales, hacer rellenos, o a nivelarse, deben desmontarse primero. En el desmonte se incluye el retiro o movimiento de la vegetación correspondiente a árboles o incluso puede ser hierbas, malezas, matorrales, etc., antes de iniciar esta etapa del trabajo, quizás sea necesario quitar otros materiales, como piedras, muros y edificios o sus cimientos. Para esta etapa, el bulldozer es la máquina más adecuada para realizar la operación de desmonte. Esta máquina trabaja mejor cuando el terreno es suficientemente firme para soportarla y cuando no hay hoyos, zanjas, lomas pronunciadas y rocas. Las superficies desiguales dificultan mantener la cuchilla en contacto con el piso y, más que remover la vegetación, la entierran en los hoyos. Los resultados varían con el tipo de vegetación y las condiciones del terreno. En los materiales secos se quebrará un alto porcentaje de troncos, mientras que en los materiales con condiciones húmedas o arenosas favorecen el desenraíce, que es más satisfactorio para la mayoría de los propósitos. El trabajo se puede acelerar poniendo a un trabajador a cortar o recoger los arbustos separados que, de no ser así, requerirán otro paso del bulldozer. Si se requiere remover un montón enmarañado, es probable que se tenga que usar un bulldozer mayor, una draga con cucharón de almeja, una draga con cucharón de arrastre o una retroexcavadora. El separarlo a mano resultaría más caro que el desmonte original. Cuando se amontonan matorrales gruesos y árboles, es recomendable cortarlos en

tamaños pequeños después de arrancarlos. Esto permitirá al bulldozer manejar mayores cargas y colocarlas de manera correcta. (Vargas, 1999)

La Fotografía 18. Desmonte: muestra el proceso de retiro o movimiento de material vegetal como árboles, arbustos y demás material vegetal asociado a un deslizamiento mediante maquinaria pesada, proceso denominado de forma general como operación de desmonte



*Fotografía 18. Desmonte*

*Fuente: Guía práctica de maquinaria adecuada para la construcción de proyectos viales. (1999).*

- **Despalme:** El despalme es la remoción y desperdicio de cualquier tipo de roca o tierra para descubrir y adecuar el área de interés. Este puede consistir en terreno superficial, subsuelo, arena, grava, arcilla, pizarra, caliza, arenisca y otros depósitos sedimentarios. El espesor del despalme que puede removerse depende de su carácter y accesibilidad. Por ejemplo, mucha grava natural no contiene suficientes finos para destinarla al uso de caminos, y si se permite que el suelo que la cubre se mezcle con ella mediante derrumbe, puede mejorarse su calidad. Si el tajo abierto cuenta con equipo para cribado, separación o lavado de grava o piedra, de capacidad adecuada, el terreno puede excavar o volarse con el material de valor, y separarse como parte de un tratamiento normal. (Vargas, 1999)

La Fotografía 19. Despalme: se evidencia una operación de carga en el proceso de remoción de tierra sobre un corredor vial, es de resaltar que este material es fácilmente removible y no se presentan problemas de operación cuando se encuentra seco o parcialmente húmedo, en caso de que se encuentre húmedo este material tiende a comportarse como fluido, lo que imposibilita su recolección con este tipo de maquinaria.



*Fotografía 19. Despalme.*

*Fuente: Guía práctica de maquinaria adecuada para la construcción de proyectos viales. (1999).*

- **Bombeo de agua o drenado:** El desagüe en los procesos de despeje comúnmente requiere el uso de motobombas o técnicas de canalización manual, dado que el agua estancada presenta procesos capilaridad la que humedece los materiales y el suelo mojado se convierten generalmente en lodo o se alteran estos materiales impidiendo el buen funcionamiento de los acarreos. Las excavaciones se pueden realizar sin drenar previamente y bombearse el agua conforme aparezca. Si el agua está muy sucia, y las cantidades son pequeñas o moderadas, se puede usar una bomba de diafragma. Si el agua excede de la capacidad de esta bomba, que es de 1500 a 3000 galones por hora, se pueden usar bombas centrífugas. Los mejores resultados se obtendrán localizando estas bombas lo más cerca del nivel del agua que sea posible, porque tienen mayor eficiencia al empuje que le dan al agua que la succión. Los agujeros deberán excavarse de manera que su entrada quede a unos 30 cm. o más abajo del nivel del agua. Para impedir que entre aire a la bomba cuando el agua tiene poca profundidad. La bomba centrífuga común se construye para manejar agua solamente y bombea aire con dificultad. Cuando la bomba y manguera de entrada están vacías, la bomba debe llenarse con agua (cebarse) antes de echarla a andar. Si el agua es succionada dentro de la bomba, su eficiencia aumenta bruscamente. (Vargas, 1999)

La Fotografía 20. Bombeo de agua en deslizamiento: se muestra el proceso de evacuación de aguas en deslizamiento ocurrido sobre la vía Medellín – Cartago, ocurrido en abril de 2022.



*Fotografía 20. Bombeo de agua en deslizamiento.*

*Fuente: Guía práctica de maquinaria adecuada para la construcción de proyectos viales. (1999).*

- **Aflojado o fragmentación de la roca:** En la facilidad o dificultad con la que una roca puede romperse, intervienen tres factores: resistencia al rompimiento del material mismo de la roca, el grado en que se ha debilitado por las capas de estratificación (laminación) o por fisuración o movimientos de falla y el grado a que se ha reblandecido y debilitado por el intemperismo. Diversos materiales rocosos son fácilmente fragmentables en superficie, pero se vuelven más resistentes con la profundidad debido a la menor exposición al intemperismo. Una roca normalmente fragmentable puede contener vetas o cantos rodados que son difíciles o imposibles de romper. Algunas rocas no son fragmentables en sus condiciones naturales, pero pueden ser fracturadas mediante técnicas de intervención mecánica de tipo percutivo por medio de martillo. (Vargas, 1999).

En esta etapa del proceso se puede acelerar el proceso al usar para la fragmentación un explosivo, el cual por medio de las propiedades de control de la expansión de los gases generados en la detonación reduce los bloques de roca a fragmentos de un tamaño, manejable, además de romper las aristas y las protuberancias.

## 4.2. Métodos tradicionales para despeje vial

Según los sistemas de trabajo y las condiciones particulares como la ubicación del evento, tipo de material, volumen a remover dentro de las obras para despeje vial, tenemos diversos métodos dentro de los que se destacan en el país, los siguientes:

### 4.2.1 Método 1. Excavación y lleno adyacente

En este método se realiza un corte o excavación en el material con el Bulldozer y se empuja o acarrea con el mismo equipo hasta el lugar final bien sea en terraplén para la misma vía o la conformación de un sitio aledaño que sirva para la disposición de los materiales provenientes de las excavaciones u obras desarrolladas en el despeje vial. Para esta actividad se pueden utilizar desde los Caterpillar D4 hasta los D8 o similares, dependiendo de la cantidad de material a remover. A mayor cantidad de  $m^3$  a mover, se debe usar un equipo mayor o sacrificar el tiempo de ejecución del proyecto. (Fonseca & López, 2011)

La Fotografía 21. Corte y lleno Adyacente: en donde se evidencia el proceso de corte en la vía y la tierra que se retira de un área se considera tierra «cortada» o excavada y con este mismo material se realiza el lleno o relleno, esta materia (La tierra), se introduce en el área para dar forma a la vía en lo que se considera un relleno de tierra o terraplén



*Fotografía 21. Corte y lleno Adyacente.*

*Fuente: Guía práctica de maquinaria adecuada para la construcción de proyectos viales. (1999).*

#### 4.2.2. Método 2. Excavación y lleno o disposición del material alejado

En la ejecución de este método se debe cargar el material excavado o removido y llevarlo hasta el sitio de disposición final en volquetas y en este sitio regarlo con un Bulldozer. El material excavado puede utilizarse en terraplenes en la vía o disponerlo en los sitios designados como depósitos de material sobrante. La excavación y cargué se hace con excavadora. Según sea la cantidad de material que hay que retirar (volumen en  $m^3$ ) y el tiempo de que se disponga, se debe definir cuál es el equipo que se necesita. El transporte del material se hace en volquetas hasta el sitio de disposición final donde la extensión se hace con Bulldozer. En relación con este método, existen las siguientes alternativas desde el punto de vista de la posición relativa entre la excavadora y la volqueta. Volqueta por debajo del nivel de sustentación de la retroexcavadora. Esta alternativa es la ideal dentro de su género, ya que las variables, altura de carga y ángulo de giro, tienden a ser mínimas.

La Fotografía 22. Volqueta por debajo del nivel de sustentación de la retroexcavadora: muestra el proceso de sustentación de la retro excavadora, este método permite el retiro de materiales de la vía o proximidades permitiendo el apoyo del equipo sobre el mismo depósito, permitiendo su abordaje por banqueo generando momentos de paso restringidos para los vehículos.



*Fotografía 22. Volqueta por debajo del nivel de sustentación de la retroexcavadora.  
Fuente: Guía práctica de maquinaria adecuada para la construcción de proyectos viales. (1999).*

En este método se pueden realizar algunas variaciones, como el ubicar la volqueta al mismo nivel de sustentación de la excavadora: al encontrarse la excavación al mismo nivel o ligeramente por encima del nivel de la retroexcavadora y la volqueta. En términos logísticos esto permite los

operadores el hacer una plataforma provisional para optimizar el rendimiento del proceso de cargue, brindando la opción de tener varias volquetas esperando a ser cargadas facilitando el proceso de retirado del material, en este aspecto también hay que considerar el tamaño de la cuchara de la retroexcavadora, la que permite hacer una recolección más ágil, y su selección dependerá de las características del material, este proceso se observa en la Fotografía 23. Volqueta al mismo nivel de sustentación de la excavadora.

La Fotografía 23. Volqueta al mismo nivel de sustentación de la excavadora: se ubica la volqueta al mismo nivel de operación o zona de sustento de la excavadora.



*Fotografía 23. Volqueta al mismo nivel de sustentación de la excavadora.*

*Fuente: Guía práctica de maquinaria adecuada para la construcción de proyectos viales. (1999).*

En el caso de que los materiales a remover, se encuentren por debajo del nivel del alcance de la excavadora: bajo estas circunstancias se recomienda el utilizar dos excavadoras, para esta actividad, a la que comúnmente se le llama repaleo.

La Fotografía 24. Excavación bajo condiciones de repaleo: nos muestra la primera excavadora, la cual se ubica hasta cierto nivel dejando el material al alcance de la segunda, donde está lo retoma facilitando el cargue a las volquetas.



*Fotografía 24. Excavación bajo condiciones de repaleo.*

*Fuente: Guía práctica de maquinaria adecuada para la construcción de proyectos viales. (1999)*

Bajo este método el operador encargado del retiro del material deberá tener en cuenta no solo las condiciones del terreno para salvaguardar la integridad del operador y la maquinaria, sino que debe considerar en dónde se debe utilizar este proceso dado que al hacerse necesario el utilizar dos excavadoras, se están afectando los rendimientos y tiempos, dados los procesos de sincronización en que debe entrar la maquinaria.



*Fotografía 25. Volqueta está por encima del nivel de sustentación*

*Fuente: Guía práctica de maquinaria adecuada para la construcción de proyectos viales. (1999)*

En el caso en que la remoción de materiales hay que hacerla cuando la volqueta está por encima del nivel de sustentación de la excavadora, se considera esta la forma y alternativa más desfavorable

de remoción de material, ya que la altura de carga y ángulo de giro, tienden a ser máximas. Según los expertos, este tipo de operación se debe evitar al máximo porque son las más lentas, porque las excavadoras aumentan los tiempos de excavación y cargué.

#### **4.2.3. Método 3. Utilización de la Mototrailla**

Este método no es muy común en nuestro territorio, puesto que hay poca existencia de esta maquinaria en el país, debido a que solo pueden ser operadas en zonas planas porque son maquinarias dotadas de elementos de alto volumen, lo que las hace difíciles de maniobrar en nuestra topografía. Este método, además, presenta serias desventajas en los procesos de transporte y acarreo de materiales, puesto que se utiliza solo para acarreos pequeños de aproximadamente 400 m. Es de resaltar que la Mototrailla, dada su envergadura, tiene una capacidad de almacenamiento de 35 a 40 m<sup>3</sup> de material.



*Fotografía 26. Excavación con Mototrailla*

*Fuente: Guía práctica de maquinaria adecuada para la construcción de proyectos viales. (1999)*

#### **4.3. Método propuesto a partir de técnicas de voladura para el corte o la fragmentación de bloques**

Durante la historia del desarrollo y uso de los dientes explosivos, así como en el planteamiento y desarrollo de nuevas técnicas de voladura, se han presentado diversas dificultades dentro de las que se encuentran los denominados bloques o sobre tamaños, en este aspecto es donde cobra gran

importancia una técnica alternativa a la voladura tradicional, las técnicas de voladura secundaria, a fin de dar solución al problema que generan el manejo de los grandes bloques.

#### **4.3.1. Voladuras secundarias**

Se define una voladura secundaria como la técnica que tiene como fin la reducción del tamaño de los grandes bloques de roca, producto de procesos naturales o de una voladura primaria, a fragmentos de menor tamaño adecuados para su manejo, es usada en ocasiones en procesos de demolición de estructuras.

La condición de fracturamiento, diaclasamiento y otras fisuras naturales, los procesos erosivos, bloques sueltos o enterrados o generados por deficiencia en la voladura primaria causan la generación de bloques de roca de gran tamaño, que deben ser corregidos o reducidos, lo que de manera regular puede ser corregido mediante la voladura secundaria, en la que de manera detallada se debe prestar atención en el grado de fisuramiento del bloque, la orientación de los sistemas de diaclasas y otros aspectos geológicos y estructurales que afectan el fracturamiento, además se debe supervisar cuidadosamente la perforación, de la cual depende la distribución de la carga explosiva y su secuencia de encendido.

Por otra parte, entre los inconvenientes que se deben considerar se encuentran la proyección de fragmentos o esquirlas a distancia y con rumbo impredecible, vibraciones del terreno y el ruido producto de la onda de presión en el aire.

#### **Voladura de cachorro**

Este tipo de voladura también conocida como taqueos o Pop shots, se desarrolla mediante perforaciones de pequeño diámetro, de los 22 mm a 51 mm (7/8" a 2" de diámetro) que se perforan hacia el centro de gravedad de los bloques de roca a fragmentar a una profundidad que va de 1/2 a 2/3 de su espesor, donde se ubica la carga explosiva. Dicha carga dependerá de las características del material, siendo predominante su definición, el tamaño y dureza del bloque de roca, su tenacidad, presencia de planos de fractura.

La profundidad a la que se realiza la perforación se determina por la relación 1,1 a la mitad del espesor del bloque (1,1 x 0,5). En el caso de bloque de roca enterrados donde no se puede estimar el espesor, se recomienda perforar hasta traspasarlos, medir la longitud del taladro y luego rellenarlo hasta la mitad con detritos para centrar la carga explosiva reforzada; de otro modo será difícil romperlos adecuadamente por estar confinados en el suelo.

La Imagen 19. Proceso de voladura de Cachorro. En esta se muestra la secuencia para el desarrollo de una voladura secundaria tipo voladura de Cachorro, (a) medición del bloque de roca en donde se representa  $a$  = ancho del bloque de roca y  $h$  = altura del bloque de roca, (b) representa el punto de perforación el que se ubica hacia el centro de gravedad del bloque la que se debe realizar en  $a/2$  a la mitad del ancho del bloque y en  $h/2$  a la mitad de la altura del bloque, (c) muestra la perforación del bloque zona de carga y tapón de arcilla colocado sobre el bloque.

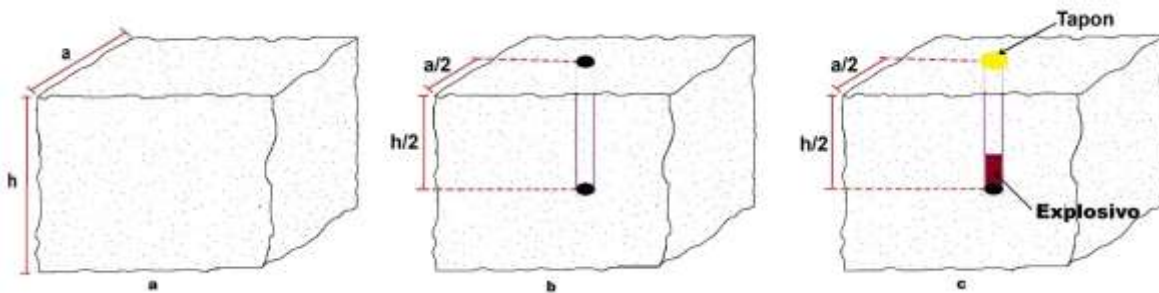


Imagen 19. Proceso de voladura de Cachorro.  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

Para el caso de los bloques de roca de hasta  $1 \text{ m}^3$ , por lo general requieren una sola perforación ubicada al centro; si son más grandes e irregulares necesitarán más perforaciones, donde la relación a considerar es usualmente uno por cada  $0,7$  a  $1,1 \text{ m}^2$  ( $8 \text{ pie}^2$  a  $12 \text{ pie}^2$ ) de área horizontal, estimada desde su parte de mayor diámetro. Estos cachorros se ubicarán de modo que puedan reforzar la perforación central. Después de cargados y cebados, se debe sellar con un taco de arcilla o detritos y, al momento del disparo, este se realiza de manera simultánea.

Por otra parte, existe diferencia entre los bloques de roca procedentes de una voladura (generados en recortes de talud) y los de origen natural, puesto que los primeros han sufrido un cierto debilitamiento (en razón de las elevadas tensiones sufridas), que en cierta forma facilita su posterior fracturamiento.

## **Voladura de cachorros amortiguados (Air cushion pop blasting)**

En esta forma de voladura puede proporcionar un control sobre el número de fragmentos y la dirección en que se puedan proyectar, en este caso se perfora hasta  $2/3$  o  $3/4$  del espesor del bloque de roca, en donde se introduce una carga explosiva de 50 a 60 g/m<sup>3</sup> y se tapona con arcilla, esta carga debe centrarse de modo tal que quede amortiguada por aire, se debe tener en cuenta que el tapón debe ser en arcilla en lugar de arena o detritos, dado que la arcilla por ser adhesiva se fija en la boca de la perforación asegurando la permanencia del colchón de aire, además la arcilla proporcionará un ligero retraso entre el tiempo en que la zona de perforación es presurizada por la explosión y el instante en que el tapón de la arcilla es eyectado, permite la regulación generando el efecto fragmentador, por el que los detritos y la arena se deslizarían sobre la carga, y serían soplados al primer instante sin que se genere la cámara de aire.

Para un bloque de roca con alrededor de 1 m<sup>3</sup> el taco mínimo debería ser de aproximadamente 30 cm (12"), ya que si es menor, la carga podrá soplarse limitando su efecto rompedor. Según la experiencia práctica con diferentes materiales, se podrá regular el grado de fragmentación, teniendo en cuenta que: a menor longitud de taco aumenta el colchón de aire en el área de perforación, rompiéndose el bloque rocoso en pocas piezas grandes y, por lo contrario, si se incrementa su longitud, crece el confinamiento de la carga explosiva, rompiéndose en muchos fragmentos pequeños.

En el caso de disparos en lugares de altas probabilidades de accidente y deterioro, como en calles de una población, se les debe cubrir con una gruesa y pesada malla de voladura (Blasting mat) que puede ser hecha con llantas usadas

## **Aspectos de seguridad**

En el caso de que se deba volver a disparar un cachorro fallido, se debe quitar el taco inerte con cuidado y volver a cargar; si no es seguro y fácil quitar el taco, se le coloca encima una plasta y se dispara, después de un tiempo prudencial se debe volver para buscar restos de explosivo que puedan haber quedado.

Tanto en cachorros como plastas se debe tener extremo cuidado con la proyección de fragmentos (Fly rocks), ya que, por su tamaño, velocidad, dirección de vuelo y distancia a recorrer, son impredecibles.

Para estimar aproximadamente una distancia de proyección que permita en forma tentativa despejar el área de riesgo alrededor del punto de disparo, se puede aplicar la siguiente relación, que fue presentada como guía práctica por el USMTM, del Buró de Minas norteamericano.

Distancia mínima de vuelo:  $120 * \left[ \sqrt[3]{(Q)} \right]$

Y para cantidades mayores a 500 lb (220 kg) será:

Distancia mínima de vuelo:  $300 * \left[ \sqrt[3]{(Q)} \right]$

Donde Q es la cantidad de explosivo a utilizar en lb.

La Tabla 27. Cantidad de explosivo, o equivalente en m/lb, muestra una relación simplificada en la distancia de voladura y la cantidad de explosivo requerido para el corte y/o fragmentación.

CANTIDAD DE EXPLOSIVO (lb)	DISTANCIA (pie)	DISTANCIA (m)
1 a 28	910	277,4
30	930	283,5
35	977	297,8
40	1020	310,9
45	1057	322,2
50	1104	336,5
55	1141	347,8
60	1170	356,6
65	1200	365,8
70	1225	373,4
80	1290	393,2
85	1310	399,3
90	1345	410,0
100	1400	426,7
125	1500	457,2
150	1600	487,7
200	1750	533,4
300	2000	609,6

400	2200	670,6
500	2400	731,5

Tabla 27. Cantidad de explosivo, o equivalente en m/lb  
Fuente: Champi, (2021)

### Voladura secundaria sin perforación

Esta voladura comprende a las plastas, cargas de concusión o taqueos (Mud capping, Concussion charges, Plaster blasting), estas cargas constituyen un medio fácil para romper grandes bloques de roca donde la perforación no es factible o es costosa. Consisten en cargas explosivas cebadas que se colocan directamente en contacto con la superficie de la piedra, cubiertas con una gruesa capa de arcilla o barro presionada a mano, para confinarlas, que se puede disparar con cualquiera de los sistemas de iniciación conocidos.

Si es necesario, estacar cargas, estas pueden comprender a uno o más cartuchos completos, o predominantemente a su masa pelada y moldeada a mano para adaptarla a una mayor superficie de la piedra. Con los cartuchos el efecto de impacto sobre la piedra es lineal, reducido, mientras que el de la misma carga moldeada es real, mucho mayor y efectivo.

La capa de arcilla debe ser bastante gruesa para procurar el mejor confinamiento, ya que solo se aprovecha una mínima proporción de la energía de la explosión, 10 % a 20 %, el resto se disipa en el aire, causando una gran sacudida (golpe de presión en el aire) traducida en un fuerte ruido. A falta de arcilla, puede utilizarse relave, tierra o arena húmeda, pero no gravilla o pedruscos, ya que serán proyectados como esquirlas. Un espesor promedio adecuado es de 10 cm (4"), pero debe ser mayor si el disparo se efectúa cerca de estructuras, instalaciones o equipos, se resalta que los mejores resultados se obtienen con arcilla plástica ligosa, y el peor sin cobertura, porque en este caso el bloque rocoso solo se descascarará superficialmente.

Las cargas explosivas empleadas en plastas son aproximadamente cuatro veces mayores que las necesarias para el disparo de cachorros, con factores entre 1,5 a 2,0 kg/m<sup>3</sup>. Como la energía útil que se puede aplicar a la acción de rompimiento es mínima se debe compensar este inconveniente empleando explosivos rápidos y de alto brisance (potencia explosiva o potencia fragmentadora, es una medida de la rapidez con que un explosivo desarrolla su máxima presión), como las gelatinas

La Tabla 28. Valores de carga aproximada para plastas, se muestran los valores de carga de explosivo en relación con la distancia del barreno con la cara libre.

<b>TABLA DE VALORES DE CARGA APROXIMADA PARA PLASTAS</b>	
<b>DIAMETRO DE LA PIEDRA (mm)</b>	<b>CARGA EXPLOSIVA (g)</b>
300 a 460	115
460 a 600	170
600 a 760	230
760 a 900	280 a 340
900 a 1070	340 a 455

*Tabla 28. Valores de carga aproximada para plastas  
Fuente: Champi, (2021)*

A nivel teórico en la práctica se puede emplear cualquier tipo de explosivo incluyendo el ANFO, naturalmente dependiendo del explosivo utilizado hay que tener en cuenta sus propiedades, en donde explosivos de bajo rendimiento tendrán un alto consumo, dada su baja velocidad y mínima capacidad de fragmentación, en donde para lograr la fragmentación requerida se debe implementar cargas adosadas (cargas de explosivos en colocación múltiples en contacto o cerca unas de otras para aumentar el efecto de la explosión), esta técnica presenta poca implementación por la falta de conocimiento de la mecánica del trabajo de estas.

## CAPÍTULO 5

### ESTUDIO DE CASO-

En este capítulo se presenta información relacionada con casos de voladuras desarrolladas entre los años 2021 a 2023, por parte del Batallón de Infantería N.18 de la Sexta (6<sup>a</sup>) Brigada y el Grupo Marte de la Quinta División del Ejército Nacional, el Batallón de Infantería N.18 de la Cuarta (4<sup>a</sup>) Brigada y el Grupo Marte de la Quinta División del Ejército Nacional, la empresa Voladura Demolición y Perforación 3JY de la ciudad de Medellín - Antioquia, cuyos datos sirvieron como insumo para la validación de resultados en el protocolo propuesto.

Los casos de voladura que se registran en este proyecto obedecen a procesos de atención prioritaria, solicitados por la administración municipal, en los que se destaca el desarrollo de voladura de bloques, para dar solución a problemáticas como:

- Problemas de movilidad vial en vías secundarias y terciarias
- Dificultad para el suministro de agua a la planta de abastecimiento y potabilización de agua en la ciudad de Villavicencio
- Obstrucciones en el proceso de excavación y construcción de zanjas en el emplazamiento de la red de canalización para alcantarillado municipal.

En los diferentes casos de validación de voladura, se realizó a los bloques de roca una evaluación mediante inspección visual, identificando y clasificándolo aspectos teóricos y mediciones en campo de los siguientes parámetros:

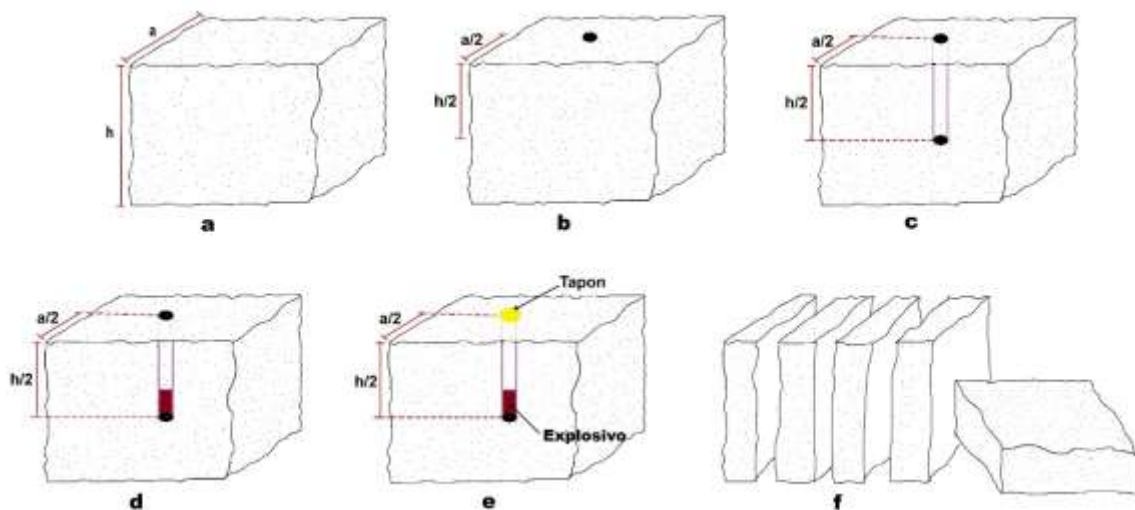
- **Tipo de roca:** se establece por medio de inspección visual, con ayuda de lupa, con ello se establece si corresponde a un bloque de origen ígneo, metamórfico o sedimentario, identificando los minerales que la conforman.
- **Tamaño de grano:** Por medio de inspección visual y ayuda de lupa se establece el tamaño de los granos que componen el bloque de roca.
- **Peso específico:** se mide el bloque, al cual, acorde a sus características volumétricas y el tipo de roca identificada, se estima su peso acorde a los valores teóricos.

- **Factor de esponjamiento:** se establece comparando el volumen del bloque antes de la fragmentación y el volumen de los fragmentos después de esta, corresponde a la relación entre el volumen de un material después de ser fragmentado (esponjado) y su volumen original en su estado natural o compactado, es decir cuánto aumenta el volumen del material al ser fragmentado, este factor es requerido en la planificación de trabajos de manejo de subproductos de voladura, dado que se afecta el volumen del material fragmentado, variando los requerimientos de transporte.
- **Resistencia a la compresión:** de acuerdo al tipo de roca se establece su valor teórico y por medio de penetrómetro se establece su valor real en condiciones de campo. Se realiza por medio de penetrómetro marca: MATEST C194-01.

La Imagen 20. Esquema de voladura implementado. Se muestra la secuencia y los procedimientos implementados para la fragmentación de bloques de roca, en el desarrollo de voladuras secundarias tipo Cachorro, se muestra (a) identificación del tipo de roca, medición y cálculo de volumen del bloque de roca, (b) establecimiento del centro de gravedad del bloque de roca para barrenado (perforación), (c) barrenado o perforación del bloque a lo largo del centro de gravedad estimado, esta se realiza a  $\frac{1}{2}$  del ancho y a  $\frac{1}{2}$  del alto del bloque de roca (d) carga del barreno del bloque con explosivo, se coloca en este la línea de tiro, esta es la encargada de transmitir el impulso eléctrico que da inicio a la reacción en cadena del explosivo, se conecta esta línea al detonador, el que se encarga de iniciar el explosivo y arranque de la detonación, en el caso de que se vaya a realizar la fragmentación de varios bloques al mismo tiempo, se pueden realizar los amarres adicionando retardos a la línea de tiro de cada bloque, mediante los cuales se controla el tiempo de detonación del explosivo en cada uno de los bloques, garantizando con esto que las detonaciones no se den en el mismo instante a fin de reducir impactos como vibraciones, (e) se procede al taponamiento del barreno con arcilla, para generar una cámara de aire al interior del barreno, la cual provoca un vacío al momento de la detonación del explosivo, en donde al interior del barreno se produce la compresión y descompresión de los gases a alta temperatura y alta velocidad, producto de la detonación, lo que genera el proceso de tracción, al cual se debe el efecto fragmentador en la roca, y (f) fragmentación del bloque de roca, a causa de la detonación, los gases producto de la detonación comprimidos a alta velocidad y alta temperatura, fragmentan el bloque, el cual es dividido en varios fragmentos y resultado de la fragmentación se produce en los fragmentos el efecto de esponjamiento, el que consiste en el aumento del volumen que experimenta cada uno de los

fragmentos de roca, es decir que este aumento ocurre debido a que la roca, al ser fragmentada, pasa de un estado de compactación a ser separada en fragmentos, los cuales ahora presentan espacios vacíos entre ellos.

El modelo de voladura secundaria de tipo cachorro, también conocida como voladura de taqueo o voladura Pop shots, aquí descrito corresponde al tipo de voladura implementada, para el total de voladuras realizadas en el registro de datos y la validación del modelo, del presente proyecto de investigación.



*Imagen 20. Esquema de voladura implementado.  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).*

Teniendo en cuenta la resistencia a la compresión simple de los distintos materiales, estos se clasifican según la capacidad de soporte a cargas de compresión (aplastamiento) sin romperse o fallar de cada material, este ensayo se realiza en laboratorio con núcleos cilíndricos de roca y los valores reales varían dependiendo de las condiciones de humedad, fracturamiento, diaclasamiento, textura, grado de meteorización, etc.

La Tabla 29. Clasificación de rocas según su resistencia a la compresión simple. Muestra la escala de resistencia a la compresión simple de las rocas, la que corresponde a una clasificación que permite agrupar distintos tipos de rocas en función de su resistencia a fallar bajo condiciones de una carga axial, sin confinamiento lateral, es decir, en condiciones de compresión uniaxial, esta resistencia es

una propiedad mecánica que se expresa generalmente en megapascales (MPa), también muestra ejemplos de rocas de cada clasificación.

Clasificación	Rango típico (MPa)	Tipo de roca
Extremadamente débil	< 1	Materiales altamente meteorizados
Muy débil	1 – 5	Arcillas duras
Débil	5 – 25	Lutitas, margas
Débil a moderadamente resistente	25 – 50	Lutitas, margas
Moderadamente resistente	50 – 70	Calizas compactas
Resistente	70 – 150	Areniscas
Muy resistente a extrema	150 – 250	Granitos, basaltos
Extremadamente resistente	> 250	Cuarzitas

*Tabla 29. Clasificación de rocas según su resistencia a la compresión simple  
Fuente: (Salinas, 2018)*

### **5.1. Caso de validación de voladura N. 1. Vía Ibagué - Combeima - Villa Restrepo (Tolima).**

Este caso se desarrolló en el departamento del Tolima, en la vía que comunica la ciudad de Ibagué con los municipios de Combeima y Villa Restrepo, sobre el kilómetro 9, en las coordenadas N 4° 30' 53,76" y W 75° 18' 189/-+6,34" en donde 3 bloques de 8 m<sup>3</sup>, 10 m<sup>3</sup> y 11 m<sup>3</sup> obstruyeron la vía durante 5 días, dejando incomunicado el sector del Cañón del río Combeima, una importante zona turística del departamento, este caso se presentó en vísperas de la celebración de las fiestas de San Pedro y San Pablo, las voladuras de corte y fragmentación para dar solución a esta problemática en la movilidad se realizaron el 25 de junio de 2023.

La Administración Municipal solicitó al Batallón de Infantería N.18 bajo la dirección del coronel Jaime Rooke de la Sexta Brigada, al Grupo Marte de la Quinta División del Ejército Nacional, dar prioridad alta a este caso, dadas las características del evento, puesto que un total de 304 familias en Villa Restrepo y 341 en Combeima, las que corresponden a una gran parte de la población de estas localidades devengan su sustento de actividades relacionadas con el turismo, así como de los servicios anexos a dicha actividad y la vía (Tiendas, Bares, Restaurantes, Estaderos, Hoteles, etc.,) además este evento cobro una alta importancia dado que el evento se presentó a menos de 2 semanas de las fiestas del San Pedro, fechas para la cual la capacidad hotelera de esta zona estaba reservada en su totalidad y el flujo vehicular esperado es alto, dado que este corredor vial es una

de las principales vías que comunican a los turistas con que se dirigen hacia El cañón del Combeima y el parque nacional natural Los Nevados y otros destinos turísticos de importancia en el departamento.

La Imagen 21. Ubicación de la zona de voladura en el departamento del Tolima, esta imagen nos muestra la red vial que actualmente presenta el departamento del Tolima, además de mostrar la zona donde se desarrolló la voladura de corte y fragmentación para dar solución al problema de movilidad realizada el 25 de junio de 2023.

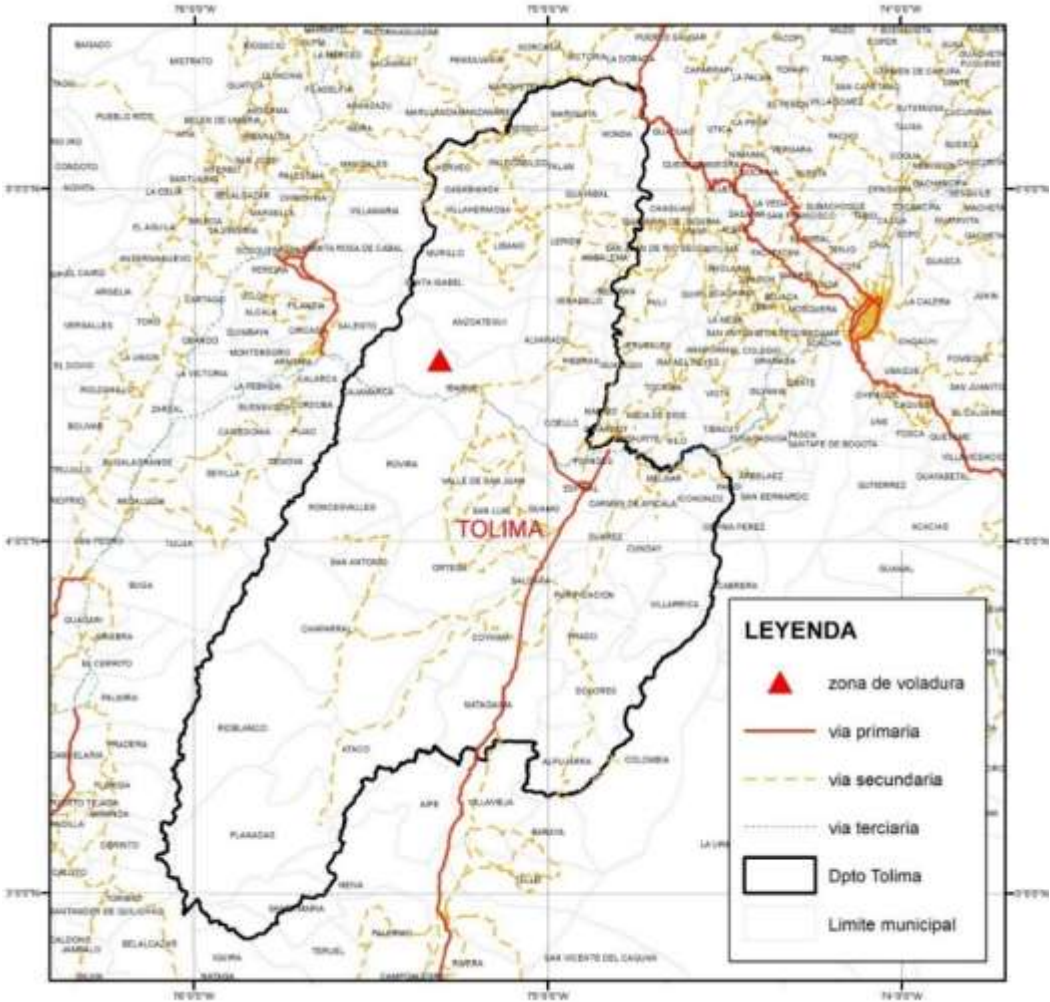
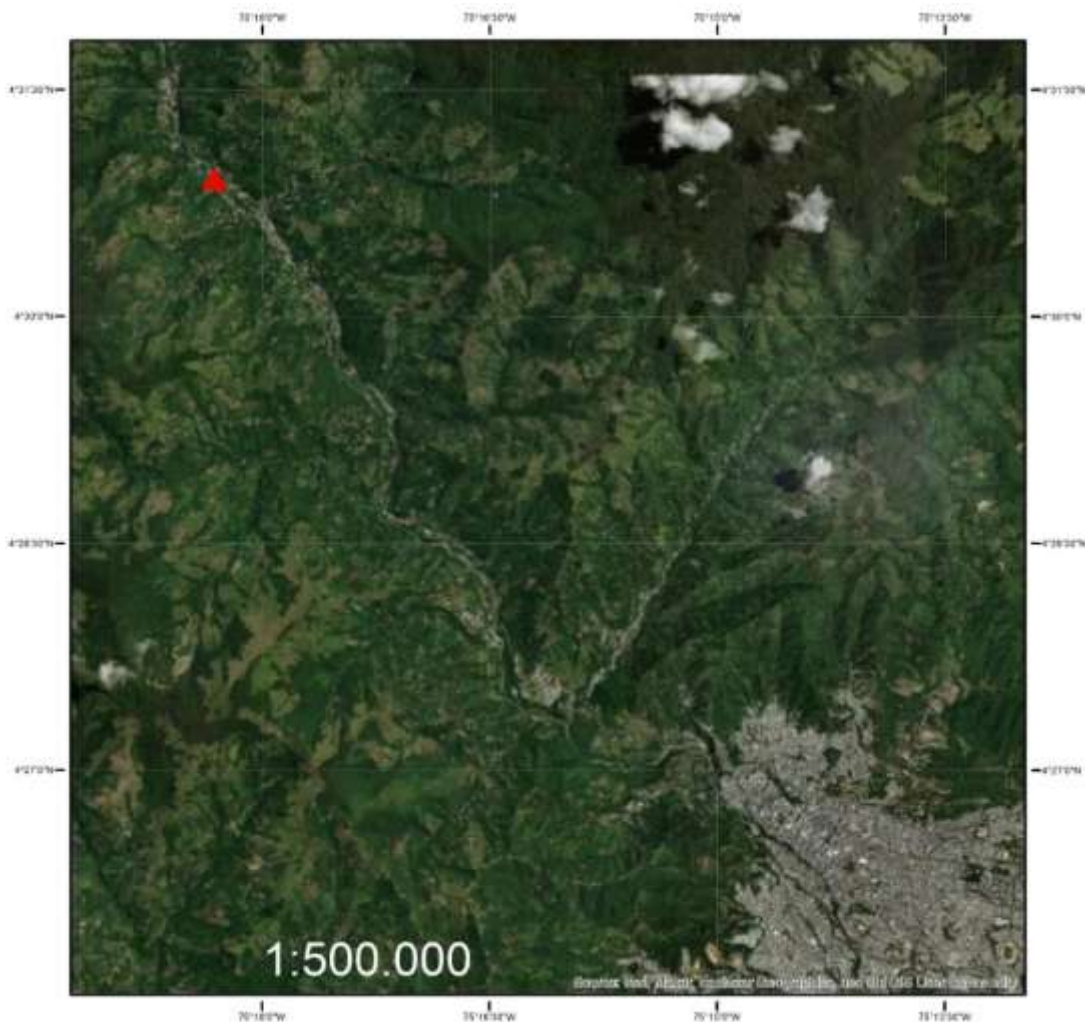


Imagen 21. Ubicación de la zona de voladura en el departamento del Tolima  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

La Imagen 22. Zona de voladura en imagen de satélite. Esta imagen tipo Landsat del repositorio de ESRI nos muestra la ciudad de Ibagué y la vía de tipo terciario sobre la cual se desarrolló el evento, así como el punto de voladura.



*Imagen 22. Zona de voladura en imagen de satélite*

*Fuente: Google. (s.f.). [Imagen la ciudad de Ibagué – departamento del Tolima].*

*Recuperado de [https://www.google.com/maps/@4.4665384,-*

*75.3419645,26452m/data=!3m1!1e3?entry=ttu&g\_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D]*

*Modificado: El autor (2025).*

En el kilómetro 9 de la vía que comunica Ibagué con los municipios de Combeima y Villa Restrepo, se presenta un deslizamiento en donde 3 bloques con un volumen aproximado de 8 m<sup>3</sup>, 10 m<sup>3</sup> y 11 m<sup>3</sup>, de material litológico identificado como esquisto, bloques que se desprendieron y rodaron hacia la vía, a causa de las lluvias presentadas el área del evento durante los meses de mayo y junio, además se destacan en el área de la vía cortes al talud con altas pendientes y sin manejo adecuado de estabilización, a nivel general se presentan en el área estratos de Esquistos gráficas,

cuarzomoscovíticos, cloríticos y anfibólicos; filitas; cuarcitas; mármoles, y serpentinitas, a nivel topográfico se presentan pendientes medias las cuales son cortadas por el río Combeima.

La Tabla 30. Clasificación de bloques sobre la Vía Ibagué - Combeima - Villa Restrepo (Tolima), muestra de manera particular la caracterización realizada a los bloques de esquistos que obstruyeron la vía, las características aquí enunciadas se establecen a partir de inspección visual y ensayos realizados en campo por medio de penetrómetro.

TIPO DE ROCA		PESO ESPECIFICO (t/m <sup>3</sup> )	TAMAÑO DE GRANO (mm)	FACTOR DE ESPONJAMIENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)
Ígnea	Esquisto	2,7	0,1 -1 0,6***	1,6	60 – 400* 210**

*Tabla 30. Clasificación de bloques sobre la Vía Ibagué - Combeima - Villa Restrepo (Tolima)*

\* Resistencia a la compresión (MPa) Teórica

\*\* Resistencia a la compresión (MPa) Medida en Campo.

\*\*\* Medición en campo

Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

La Fotografía 27. Presencia de 3 bloques que obstruyen Vía que comunica la ciudad de Ibagué con los municipios de Combeima y Villa Restrepo (Tolima): se muestran los bloques reposando sobre la vía en donde dos de estos bloques se encuentran reposando sobre la vía y el tercero sobre un depósito de escombros y suelos residuales a punto de colapsar sobre la vía.



*Fotografía 27. Presencia de 3 bloques que obstruyen Vía que comunica la ciudad de Ibagué con los municipios de Combeima y Villa Restrepo (Tolima)*

Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2023)

La técnica de voladura controlada a cielo abierto, que se implementó en este caso, para cortar y fragmentar los bloques de roca que obstruían la vía, fue una voladura de tipo secundario denominada voladura tipo cachorro, por medio de la cual se desarrollaron detonaciones controladas, en donde los bloques se cargaron con 9.8 kilogramos de ANFO, además se usaron 24 detonadores eléctricos y 174 metros de cordón detonante de 12 gramos.

La Fotografía 28. Perforación de barreno en uno de los bloques de roca: se muestra el proceso de perforación del bloque denominado barrenación (perforación del barreno), actividad realizada con taladros neumático para roca, en los barrenos perforados se ubicarán las cargas del agente explosivo para la posterior voladura de corte o fragmentación de bloques, se evidencia que esta actividad es realizada por el personal perteneciente al Ejército Nacional de Colombia, perteneciente a la Sexta Brigada, al Grupo Marte de la Quinta División.



*Fotografía 28. Perforación de barreno en uno de los bloques de roca  
Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2023)*

La Fotografía 29. Momento de la detonación para fragmentar el 1.er bloque de roca: se muestra el momento de la voladura en el cual se genera la reacción química, en la que se genera la expansión de los gases a alta velocidad, lo que resulta en la fragmentación del bloque, se destaca que en una voladura de corte que sea realizada con características ideales, no se deben desarrollar proyecciones, ni gases con colores oscuros, se destaca en la fotografía que el color de los gases es claro, lo que indica que la reacción química se desarrolló con un adecuado balance de oxígeno, lo

que genera una combustión adecuada, lo que a su vez genera unas condiciones óptimas en el proceso de corte o fragmentación de bloques, es de resaltar que en una voladura desarrollada bajo condiciones óptimas no se desarrollan proyecciones ni vibraciones que puedan afectar los alrededores, se evidencia además en la fotografía que los alrededores al área de voladura se encuentran despejados, aspecto que hace parte de los protocolos de seguridad implementados para estas actividades, además se muestra la voladura se realizó en los alrededores del río Combeima, lo que muestra lo delicado del área a intervenir y lo efectivo de la técnica al no presentarse daños posteriores a la realización de la actividad de voladura.



*Fotografía 29. Momento de la detonación para fragmentar el 1.er bloque de roca  
Fuente: El autor (2025)*

La Fotografía 30. Resultado de la detonación, fragmentación del 1er bloque de roca: se observa los resultados de la voladura de corte y fragmentación, muestra cómo el primer bloque fue fragmentado, destacando que cada uno de los fragmentos no presento un gran desplazamiento y los fragmentos quedaron ubicados en el radio del bloque inicial, la voladura permitió tener un tamaño de fragmentos adecuado, para ser removido de la vía con maquinaria amarilla, lo que era el objetivo principal planteado para esta voladura controlada.



*Fotografía 30. Resultado de la detonación, fragmentación del 1er bloque de roca  
Fuente: El autor (2025)*

La Fotografía 31. Bloque que obstruyen vía que comunica la ciudad de Ibagué con los municipios de Combeima y Villa Restrepo (Tolima): se observa el segundo bloque, el cual obstruye la vía, momentos antes al desarrollo de la voladura de corte y fragmentación, los que serán removidos de la vía con maquinaria amarilla, lo que es el objetivo principal planteado para esta voladura controlada.



*Fotografía 31. Bloque que obstruyen vía que comunica la ciudad de Ibagué con los municipios de Combeima y Villa Restrepo (Tolima)  
Fuente: El autor (2025)*

La Fotografía 32. Momento de la detonación para fragmentar el 2.º bloque de roca: muestra el momento en el cual se desarrolla la detonación de la voladura de corte y fragmentación para el segundo bloque, voladura que presenta condiciones similares a las descritas para el primer bloque.



*Fotografía 32. Momento de la detonación para fragmentar el 2.º bloque de roca  
Fuente: El autor (2025)*

La Fotografía 33. Resultado de la detonación, fragmentación del 2do bloque de roca: se observa como el segundo bloque fue cortado y fragmentado, destacando en este caso que los fragmentos de roca no desarrollaron un gran desplazamiento y quedaron en el radio del bloque inicial, además el tamaño de los fragmentos es adecuado para ser removidos de la vía con maquinaria amarilla, lo que era el objetivo principal planteado para esta voladura controlada.



*Fotografía 33. Resultado de la detonación, fragmentación del 2do bloque de roca  
Fuente: El autor (2025)*

Se destaca que durante el desarrollo de la voladura de estos tres (3) bloques, se contó con el apoyo y la participación de la Defensa Civil, La Cruz Roja Colombiana, el cuerpo de Bomberos, representantes de la Alcaldía municipal y la Policía Nacional, en donde se dispusieron las medidas de seguridad como el desarrollo de cierre vial, encerramiento y demarcación del área de voladura, perifoneo, despeje del área de voladura y señales de alarma por medio de sirenas, como medidas de control y seguridad, para evitar afectaciones a los habitantes residentes en los alrededores a la actividad de voladura.

#### **5.1.1. Análisis de caso Vía Ibagué - Combeima - Villa Restrepo (Tolima).**

En este caso se realizó la fragmentación de 3 bloques de esquisto, que presentan una fuerte cementación, los que tienen un volumen total aproximado de  $29 \text{ m}^3$ , donde se usó un total de 9,8 kg de ANFO, lo que equivale a aproximadamente  $338 \text{ gr/m}^3$  de ANFO, para una roca con una resistencia a la compresión simple de 210 MPa, clasificada como muy resistente, lo que esta cantidad de explosivo muy baja, lo que indica que este proceso de fragmentación tuvo una gran eficiencia, dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre  $400 \text{ gr/m}^3$  a  $1600 \text{ gr/m}^3$ , al encontrarse en estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantizo la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favorece el desarrollo de fragmentación mediante el proceso de tracción, además indica que el bloque no presenta fracturas naturales ni planos de debilidad o desgaste por erosión, lo que ha facilitado la fragmentación, al requerirse muy baja cantidad de explosivo.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa el desarrollo de voladuras más eficientes y menos costosa, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente 3.8 MJ/kg, por lo que se presenta alta eficiencia energética, dado que se utilizó en promedio  $0.337 \text{ kg/m}^3$  de ANFO, la energía aplicada durante la voladura fue baja ( $1.28 \text{ MJ/m}^3$ ), lo cual está por debajo de los parámetros de consumo regulares por lo que se cataloga como una fragmentación muy eficiente considerando la dureza de la roca.

La Tabla 31. Resumen caso de validación de voladura N. 1. Vía Ibagué - Combeima - Villa Restrepo (Tolima). Muestra las características generales de la voladura, el número de bloques intervenidos y fragmentados durante la operación, tipo y clasificación de los bloques de roca, tamaño de cada uno de los bloques, peso específico del cada uno de los bloques, peso total aproximado de cada uno de los bloques, tamaño promedio del grano que componen el bloque, factor de esponjamiento, resistencia a la compresión y cantidad de explosivo usado (ANFO)

Tipo de roca	Roca	Bloque	Tamaño del bloque (m <sup>3</sup> )	Peso específico (tn/m <sup>3</sup> )	Peso total aprox. Bloque (Tn)	Tamaño de grano (mm)	Factor de esponjamiento	Resistencia a la compresión (MPa)	Explosivo usado (gr)
Ígnea	Esquisto	1	8	2,7	21,6	0,6	1,6	210	2704
		2	10	2,7	27	0,6	1,6	210	3380
		3	11	2,7	29,7	0,6	1,6	210	3718

Tabla 31. Resumen caso de validación de voladura N. 1. Vía Ibagué - Combeima - Villa Restrepo (Tolima).

Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

## 5.2. Caso de validación de voladura N. 2. Vía San Vicente del Caguán (Caquetá)

Este caso se desarrolló en el departamento del Caquetá, en el municipio de San Vicente del Caguán, sobre una vía de carácter terciario, la que comunica el municipio de San Vicente del Caguán con la vereda de Bélgica, la vereda Buenos Aires, la vereda La Danta, la vereda La Barriosa, la vereda La Cabaña, la vereda La Media, la vereda Nuevo Horizonte, la vereda La Granada, la vereda Las Lajas y la vereda La Quebra, vía sobre la cual cayeron dos bloques de uno de aproximadamente 16 m<sup>3</sup> y otro de 8 m<sup>3</sup>, localizándose el bloque número 1 de aproximadamente 16 m<sup>3</sup>, en las coordenadas N 2° 12' 38,3" y W 74° 57' 16,6" y localizándose el bloque número 2 de aproximadamente 8 m<sup>3</sup>, en las coordenadas N 2° 12' 54.2" y W 74° 57' 25.3", distanciados 548 m, uno del otro sobre la carretera.

La Imagen 23. Ubicación de las zonas de voladura desarrolladas en el departamento del Caquetá. Se muestra un punto al noroccidente del departamento del Caquetá, en inmediaciones al municipio de San Vicente del Caguán, en donde se desarrollaron las voladuras de este caso.

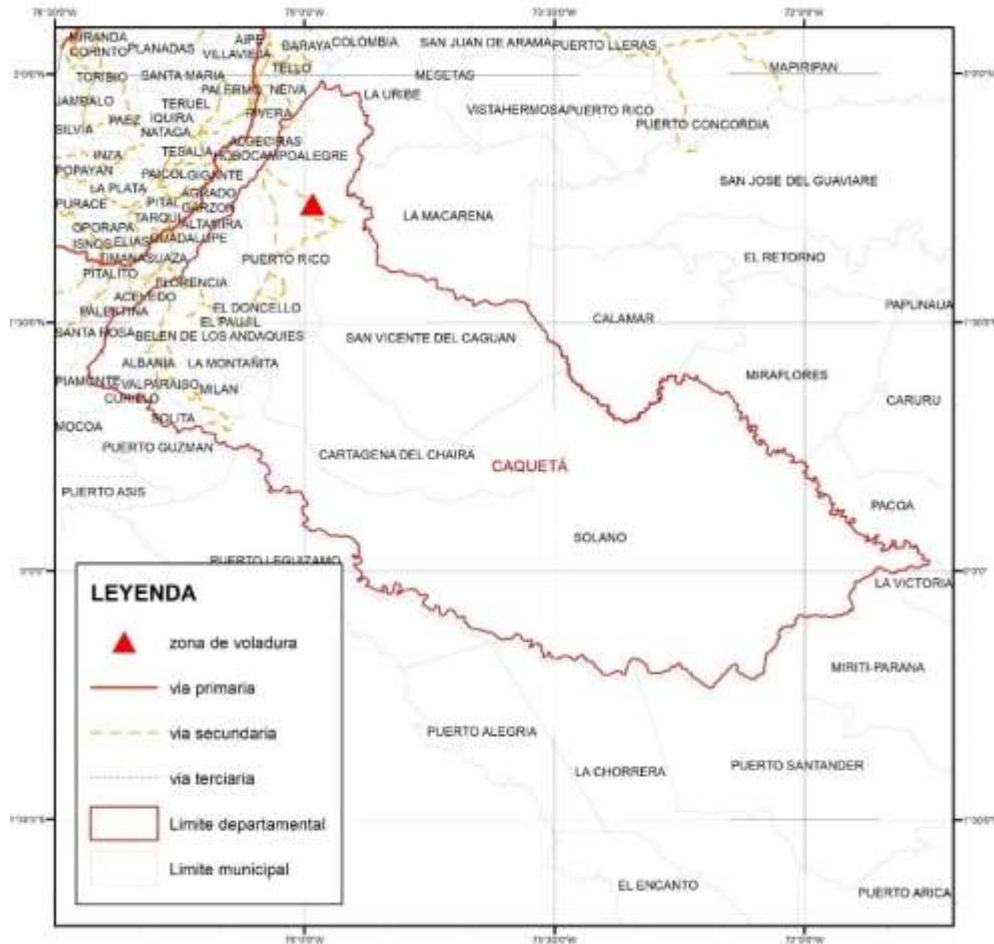


Imagen 23. Ubicación de las zonas de voladura desarrolladas en el departamento del Caquetá  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

La Administración Municipal de San Vicente del Caguán, solícito a las tropas de la Sexta División del Ejército Nacional de Colombia, el apoyo para la voladura y fragmentación de 2 bloques uno de aproximadamente 16 m<sup>3</sup> y otro de 8 m<sup>3</sup>, los que por cerca de 2 meses ha mantenido obstruido el paso vehicular por esta vía terciaria, la que comunica la vereda de Bélgica, la vereda Buenos Aires, la vereda La Danta, la vereda La Barriosa, la vereda La Cabaña, la vereda La Media, la vereda Nuevo Horizonte, la vereda La Granada, la vereda Las Lajas y la vereda La Quebra, del municipio de San Vicente del Caguán, en el departamento del Caquetá, quedando limitado el transporte de personas, insumos para la producción agrícola y pecuaria, productos agrícolas, productos que deben ingresar y salir de las veredas a lomo de bestias, en estas labores de voladura, un aproximado de 5000 personas en las 10 veredas se vieron beneficiadas con el procedimiento realizado por los técnicos en explosivos del Grupo de Manejo de Artefactos Explosivos (Grupo MARTE), en donde se requirió

un total de 8 (ocho) voladuras a cielo abierto, para realizar el recorte de los 2 bloques que obstaculizaban el paso de los pobladores.

La Imagen 24. Zonas de voladura en imagen de satélite. En esta imagen tipo Landsat del repositorio de ESRI, se muestra la vía de tipo terciario sobre la cual se desarrolló la caída de los 2 bloques y corresponde a los puntos de voladura.



*Imagen 24. Zonas de voladura en imagen de satélite*

*Fuente: Google. (s.f.). [Imagen del municipio de San Vicente del Caguán – departamento del Caquetá].  
Recuperado de [[https://www.google.com/maps/@2.1129464,-74.7830158,3314m/data=!3m1!1e3?entry=ttu&g\\_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/@2.1129464,-74.7830158,3314m/data=!3m1!1e3?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D)]  
Modificado: El autor (2025).*

El material que predomina en el área de voladura corresponde a piroclastos y andesitas y los materiales que hicieron parte del bloque a fragmentar corresponden a cuarcita del complejo Cajamarca, además en el área a nivel geomorfológico se caracteriza por el predominio de lomeríos con pendientes medias además de presentar zona montañosa con pendientes altas.

La Tabla 32. Clasificación de bloques sobre la Vía San Vicente del Caguán (Caquetá), muestra de manera particular la caracterización de los dos (2) bloques de cuarcita, los que obstruyen la vía, a los que se les establecen las características enunciadas a partir de inspección visual y ensayo en campo por medio de penetrómetro.

TIPO DE ROCA		PESO ESPECIFICO (t/m <sup>3</sup> )	TAMAÑO DE GRANO (mm)	FACTOR DE ESPONJAMIENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)
Metamórfica	Cuarcita	2,7	0,1 -1 0,5***	1,55	60 – 220* 180**

*Tabla 32. Clasificación de bloques sobre la Vía San Vicente del Caguán (Caquetá)*

\* Resistencia a la compresión (MPa) Teórica

\*\* Resistencia a la compresión (MPa) Medida en Campo.

\*\*\* Medición en campo

*Fuente: El autor (Elaboración propia). 2025.*

Los procedimientos realizados se efectuaron de manera controlada y siguiendo los pasos y directrices establecidas por el protocolo de seguridad del ejército nacional de Colombia, como lo son: despeje de área cercana a la voladura y el anillo de seguridad, estas labores se desarrollaron durante tres (3) días (enero 16 al 18 de 2023), posterior a la voladura, el manejo y la remoción de escombros, se realizó por medio de maquinaria amarilla y herramientas manuales como: palamecánica, donde los bloques producto de la fragmentación, fueron reducidos de tamaño por medio de martillo neumático y porra por parte de los pobladores y estos fragmentos se usaron como recebo para dar afirmado y dar estabilidad a algunos sectores de la vía, permitiendo el restablecimiento y la libre movilidad vehicular y de la población que habitan en el sector, quienes tienen la necesidad de sacar sus productos de tipo perecedero hasta el casco urbano del municipio de San Vicente del Caguán.

La técnica de voladura controlada a cielo abierto, que se implementó en este caso de voladura, fue una voladura de tipo secundario denominada voladura tipo cachorro, por medio de la cual se desarrollaron perforaciones a los bloques de roca, los que fueron cargados con 14.6 kilogramos de ANFO, además del uso de 36 detonadores eléctricos y 220 metros de cordón detónante de 12 gramos, con lo que se realizaron los cortes y fragmentación de los bloques por medio de detonaciones controladas.

La Fotografía 34. Bloque cargado y con cordón detonante: nos muestra el bloque que será sujeto del proceso de corte y fragmentación por medio de voladura, se caracteriza el bloque, para el posterior proceso de barrenado, para la posterior carga y ubicación de cordón detonante, además en la parte media de la foto se observa a personal militar en labores de caracterización del bloque (evaluación y caracterización de las propiedades físicas del bloque de roca), además en la parte de atrás de la fotografía se observa a personal militar ejerciendo labores de control y vigilancia del anillo de seguridad establecido para esta labor de voladura.



*Fotografía 34. Bloque cargado y con cordón detonante*  
*Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2023)*

La Fotografía 35. Proceso de carga y tacado de explosivo en bloque: se observa a personal del ejército nacional de Colombia, realizando el proceso de carga y retacado del barreno con el agente explosivo ANFO, proceso que se realiza posteriormente a las actividades de barrenado, además se observa al personal militar realizando el proceso de tacado de con el agente explosivo y la puesta del cordón detonante en el bloque, antes de realizar las actividades de voladura de corte y fragmentación del bloque.



*Fotografía 35. Proceso de carga y tacado de explosivo en bloque  
Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2023)*

La Fotografía 36. Resultados de la voladura: muestra los resultados de la voladura de corte y fragmentación, realizada al bloque de roca, además se muestra a personal del Ejército Nacional de Colombia, haciendo inspección de seguridad, el proceso de inspección involucra la verificación de los barrenos y que todas las cargas explosivas que se hayan colocado detonaran, además de realizar un proceso de verificación de las condiciones de estabilidad del talud Postvoladura, a fin de establecer que no se generen eventos posteriores a causa de las vibraciones generadas en la actividad de voladura.



*Fotografía 36. Resultados de la voladura  
Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2023)*

Fotografía 37. Resultados de la voladura: se muestran los resultados de la voladura de corte y fragmentación realizada al bloque, además se muestra al personal del ejército nacional de Colombia, haciendo el proceso de inspección de rutina, para verificar el tamaño de los bloques y posterior manejo de los productos de la voladura, además de ser verificadas las condiciones de estabilidad

del talud Postvoladura, a fin de establecer que no se generen eventos de inestabilidad posteriores a causa de las vibraciones generadas en la actividad de voladura.



*Fotografía 37. Resultados de la voladura*

*Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2023)*

Fotografía 38. Manejo de escombros, proceso de reafirmado en la vía: se muestra las actividades del manejo de escombros realizado por el ejército nacional de Colombia, en donde en acompañamiento de los pobladores de la región se tritura parte del material producto de la voladura, este se aprovecha como recebo y para dar afirmado y estabilidad a la vía, en donde se realiza la disposición del mismo con ayuda de una pala mecánica con la que se redistribuyen los fragmentos a lado y lado de la vía.



*Fotografía 38. Manejo de escombros, proceso de reafirmado en la vía*

*Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2023)*

### 5.2.1. Análisis de caso Vía San Vicente del Caguán (Caquetá)

En este caso se realizó la fragmentación de 2 bloques de cuarcita, clasificados como extremadamente resistentes, los que cuentan con un volumen total aproximado de  $24 \text{ m}^3$ , donde se usaron un total de 14,6 kg de ANFO, lo que equivale a aproximadamente  $608,33 \text{ gr/m}^3$  de ANFO, para una roca con una resistencia a la compresión simple de 260 MPa, lo que es una cantidad de explosivo baja dentro de los consumos promedio, indicando que este proceso de fragmentación tuvo una gran eficiencia, dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre los  $500 \text{ gr/m}^3$  a  $1200 \text{ gr/m}^3$ , al encontrarse en un estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantizó la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favoreció el desarrollo de la fragmentación por procesos de tracción, además indica que el bloque no presenta fracturas naturales ni planos de debilidad o desgaste por erosión, lo que ha facilitado la fragmentación, al requerirse una muy baja cantidad de explosivo.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa voladuras más eficientes y menos costosas, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente 3.8 MJ/kg, por lo que se presenta una alta eficiencia energética, dado que se utiliza en promedio  $0.60833 \text{ kg/m}^3$  de ANFO, la energía aplicada durante la voladura fue baja ( $2.311,6 \text{ MJ/m}^3$ ), lo cual está dentro de los parámetros de consumo regulares por lo que se cataloga como una fragmentación eficiente considerando la dureza de la roca.

La Tabla 33. Resumen caso de validación de voladura N. 2. Vía San Vicente del Caguán (Caquetá). Muestra las características generales de la voladura, el número de bloques intervenidos y fragmentados durante la operación, tipo y clasificación de los bloques de roca, tamaño de cada uno de los bloques, peso específico del cada uno de los bloques, peso total aproximado de cada uno de los bloques, tamaño promedio del grano que componen el bloque, factor de esponjamiento, resistencia a la compresión y cantidad de explosivo usado (ANFO)

Tipo de roca	Roca	Bloque	Tamaño del bloque (m <sup>3</sup> )	Peso específico (tn/m <sup>3</sup> )	Peso total aprox. Bloque (Tn)	Tamaño de grano (mm)	Factor de esponjamiento	Resistencia a la compresión (MPa)	Explosivo usado (gr)
Metamórfica	Cuarcita	1	8	2,3	18,4	0,3	1,5	260	4866,6
		2	16	2,3	36,8	0,3	1,5	260	9733,28

Tabla 33. Resumen caso de validación de voladura N. 2. Vía San Vicente del Caguán (Caquetá)

Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

### 5.3. Caso de validación de voladura N. 3. Vía Florencia (Caquetá)

Este caso se desarrolló en el municipio de Florencia departamento del Caquetá, en la variante Troncal del Hacha específicamente en el kilómetro 4 de la vereda Caldas, ubicada en el municipio de Florencia – Caquetá, esta vía de carácter terciario, es una de las más importantes para el municipio, ya que rodea el perímetro del casco urbano de Florencia y la intercomunica con todos los municipios del departamento y que es utilizada para el tránsito de vehículos livianos y pesados, así como para el transporte de mercancías y productos agrícolas de los municipios del sur del Caquetá. La vía se vio afectada debido a la fuerte temporada invernal que afecto la zona durante el primer periodo del año en donde a mediados del mes de marzo de 2022, sé la cual genero un desprendimiento de suelos y en donde dos grandes bloques de roca rodaron hacia la vía y que obstruyeron la misma, generando afectaciones a la movilidad e imposibilitaron el tránsito de insumos y la comunicación por vía terrestre con los municipios del sur del Caquetá con la capital departamental Florencia y desde acá con los municipios del interior del país, por un periodo de casi tres (3) meses

La Imagen 25. Ubicación de las zonas de voladura desarrolladas en el departamento del Caquetá, se muestran dos (2) puntos al suroccidente del departamento del Caquetá, en inmediaciones del municipio de Florencia Capital del departamento del Caquetá, en la vereda Morelia lugar en donde se desarrolló la voladura de corte y fragmentación, es de resaltar que en el departamento la densidad de la red vial es baja, en donde hay predominio de vías secundarias y terciarias en mal estado y un evento de esta magnitud genera grandes afectaciones a la movilidad de la región.

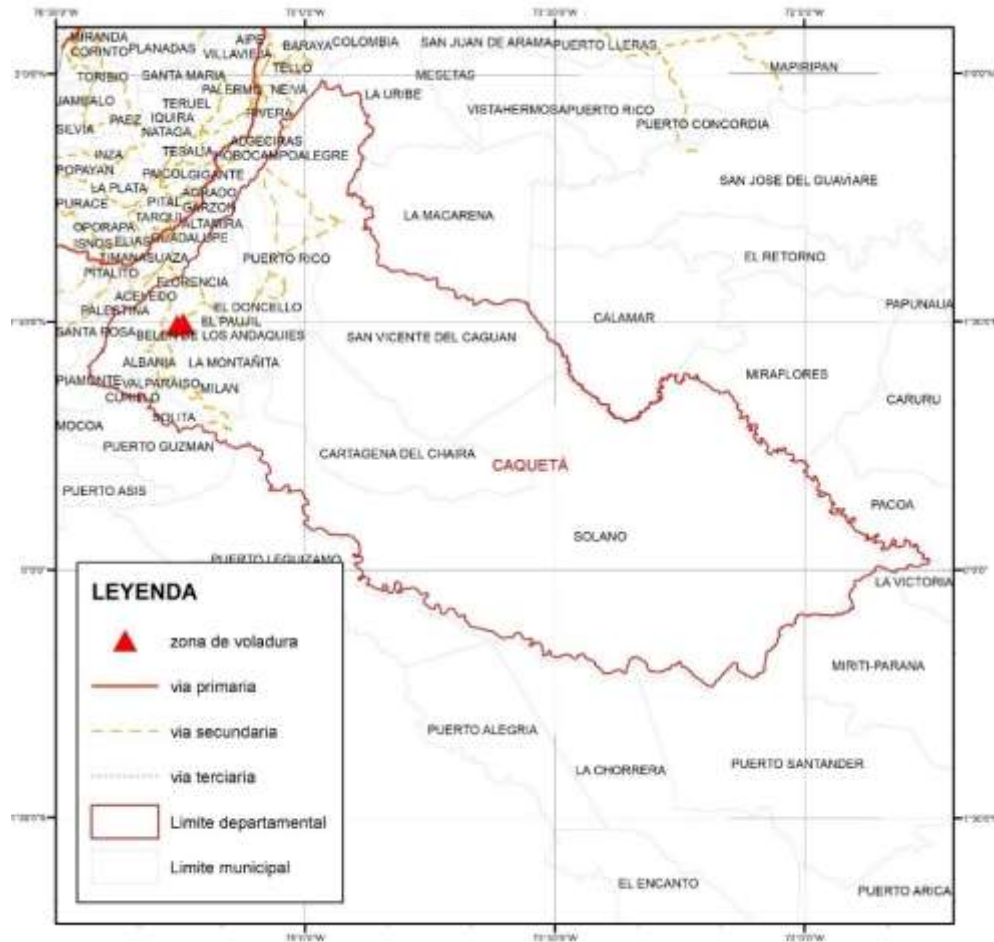
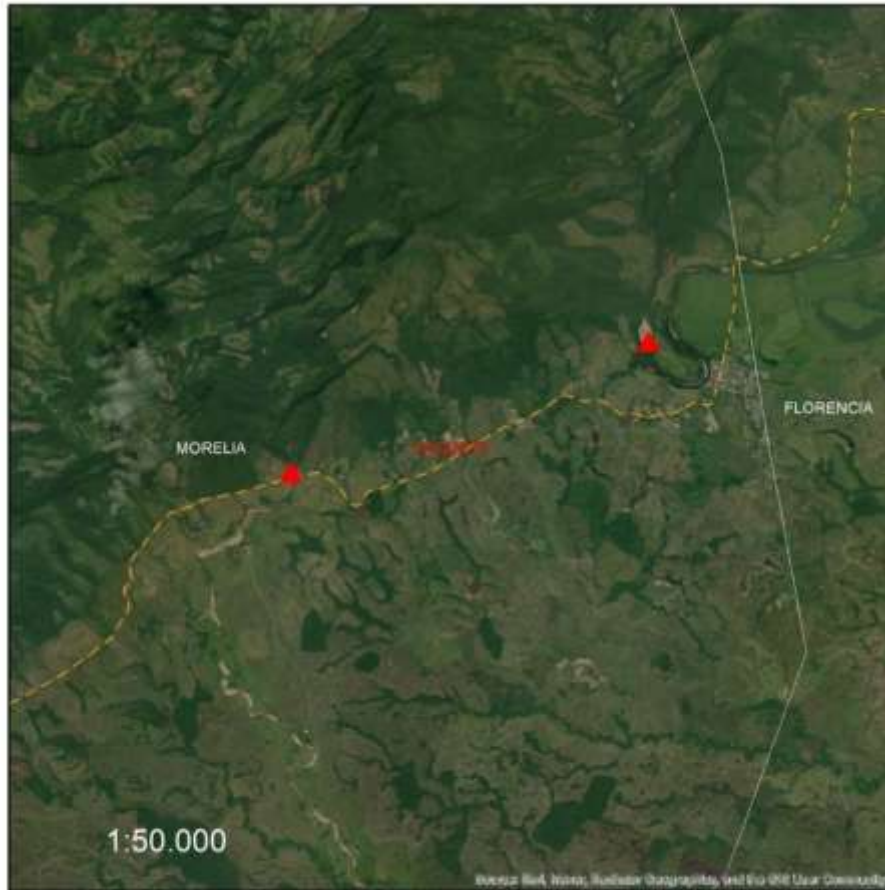


Imagen 25. Ubicación de las zonas de voladura desarrolladas en el departamento del Caquetá  
 Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

Este caso se realizó la voladura de corte y fragmentación de manera controlada con explosivo tipo ANFO, donde se efectuó el fracturamiento de dos (2) bloques de rocas de amplia magnitud que yacían sobre este importante corredor vial, que en su mayoría es utilizado principalmente por vehículos de carga pesada, así como por los pobladores de las comunidades propias de la región. En esta zona se realiza una voladura a cielo abierto de tipo secundaria a dos bloques de roca de aproximadamente  $16 \text{ m}^3$  y  $11 \text{ m}^3$ , localizados respectivamente en las coordenadas Bloque 1 en  $N 1^\circ 28' 40.1''$  y  $W 75^\circ 46' 11.4''$  y Bloque 2 en  $N 1^\circ 29' 28.3''$  y  $W 75^\circ 44' 00.8''$  W, los cuales pesan de manera conjunta aproximadamente 40 toneladas, es de resaltar que por las dificultades de la zona no era posible llegar al lugar con maquinaria amarilla y retirar del camino ni siquiera con la ayuda de retroexcavadora u otro tipo de equipos, además se resalta que uno de los bloques quedo cerca de una zona con alta pendiente, por lo que las labores de ubicación y desplazamiento del bloque

con maquinaria no eran posibles, por la amenaza de colapso del bloque, razón por la que se solicita apoyo al ejército nacional de Colombia para la fragmentación de dichos bloques.

La Imagen 26. Zonas de voladura cercanías de Florencia - Caquetá en imagen de satélite, muestra la vereda Morelia en inmediaciones del municipio de Florencia – Caquetá, así como la vía de carácter secundario y los dos puntos para el desarrollo de la voladura en el sector.



*Imagen 26. Zonas de voladura cercanías de Florencia - Caquetá en imagen de satélite*

*Fuente: Google. (s.f.). [Imagen del municipio de Florencia – departamento del Caquetá].*

*Recuperado de [[https://www.google.com/maps/place/Florencia,+Caquet%C3%A1/@1.6189118,-75.6244417,6630m/data=!3m2!1e3!4b1!4m6!3m5!1s0x8e244e1a71ba142f:0x408dc3d21376d444!8m2!3d1.6153858!4d-75.6042364!16s%2Fm%2F02qrvfq?entry=ttu&g\\_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIwIKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/Florencia,+Caquet%C3%A1/@1.6189118,-75.6244417,6630m/data=!3m2!1e3!4b1!4m6!3m5!1s0x8e244e1a71ba142f:0x408dc3d21376d444!8m2!3d1.6153858!4d-75.6042364!16s%2Fm%2F02qrvfq?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIwIKXMDSoASAFQAw%3D%3D)]*

*Modificado: El autor (2025).*

El área en donde se presentó el evento, se caracteriza por ser una zona con relieve de montaña, en donde se presentan pendientes medias a altas, con rasgos topográficos fuertes en donde se presentan áreas fuertemente escarpadas, en donde el material identificado predominante que

compone los bloques de roca, se identificaron por medio de inspección visual como Areniscas y por su localización y características pertenecen a la formación pepino.

La Tabla 34. Clasificación de bloques sobre la Vía Florencia (Caquetá), muestra de manera particular la caracterización de los bloques de arenisca que obstruyen la vía, donde se les establecen las características enunciadas a partir de ensayo en campo por medio de inspección visual y penetrómetro.

TIPO DE ROCA		PESO ESPECIFICO (t/m3)	TAMAÑO DE GRANO (mm)	FACTOR DE ESPONJAMIENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)
Sedimentaria	Arenisca	2,5	0,1 -1 0,3***	1,5	160 – 255* 195**

*Tabla 34. Clasificación de bloques sobre la Vía Florencia (Caquetá)*

\* Resistencia a la compresión (MPa) Teórica

\*\* Resistencia a la compresión (MPa) Medida en Campo.

\*\*\* Medición en campo

*Fuente: El autor (Elaboración propia). 2025.*

La operación de voladura fue desarrollada por los soldados que hacen parte del Grupo Técnico de Manejo de Artefactos Explosivos (Grupo MARTE) del Ejército Nacional de Colombia, esto en coordinación con la Secretaría de Obras Públicas del municipio de Florencia, quienes enviaron el ingeniero a cargo de la secretaria de obras públicas y 1 representante de comunicación social de la alcaldía, además de líderes locales quienes se encargaron de la logística relacionada con el perifoneo e información de las labores a desarrollar en el sector y de mantener los cordones de seguridad, mientras el Ejército Nacional procedió realizar la operación de corte y fragmentación de bloques, en donde se utilizaron un total de 17,20 kg de ANFO, 41 detonadores eléctricos y 300 metros de cordón detonante de 12 gramos.

En la voladura que fue desarrollada el día 3 de junio de 2022, se dio reapertura a la vía después de cerca de (3) tres meses de pasos restringidos y bloqueos parciales y totales en la vía, en este caso se vieron beneficiadas de manera directa con la reapertura de la movilidad en la vía cerca de 30 mil personas, además los vehículos livianos y el transporte de carga pesada, corredor en el que predomina el transporte de productos agrícolas, pecuarios e hidrocarburos, entre otros los que se desplazan desde el sur del departamento al municipio de Florencia y desde este punto al interior del país y viceversa.

La Fotografía 39. Proceso de inspección del área de voladura: se muestra el proceso de inspección del bloque en el área de voladura, en donde evalúan las condiciones de pseudo - estabilidad del bloque y estabilidad del talud, por parte del personal del ejército nacional de Colombia, posterior a esta actividad se realiza la clasificación y caracterización del bloque mediante inspección visual y se realiza la prueba con el penetrómetro a fin de establecer las características de resistencia del bloque antes de dar inicio a las labores de barrenado y perforación del bloque para el desarrollo de la voladura de corte y fragmentación, estas labores se desarrollan en compañía del delegado de obras públicas de la alcaldía municipal.

Es de resaltar que este bloque se emplazó sobre una vía de carácter secundario, en zona montañosa, en donde la banca de la vía se encuentra sobre el corte del talud, lo que hace que el bloque presente condiciones de amenazas de caída, además este presenta altos niveles en los procesos de meteorización, los que son evidentes en las características del material deslizado, siendo predominante los bloques de arenisca de diferentes tamaños, los que se desprendieron con suelos residuales con altos contenidos de arcillas.



*Fotografía 39. Proceso de inspección del área de voladura  
Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2022)*

La Fotografía 40. Medición y evaluación de las características físicas del bloque a volar: se muestra el proceso de inspección y evaluación visual de las características físicas y mecánicas del bloque de roca, además de la evaluación de su resistencia por medio de penetrómetro, antes del proceso de

perforación de barrenos para el cargue con el agente de voladura a fin de realizar el corte y fragmentación del bloque, estas labores son desarrolladas por parte del personal del ejército nacional de Colombia.



*Fotografía 40. Medición y evaluación de las características físicas del bloque a volar  
Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2022)*

La Fotografía 41. Evaluación de las características físicas del bloque a volar: se muestra el proceso de inspección y evaluación visual de las características físicas y mecánicas del segundo bloque de roca, antes del proceso de perforación de barrenos para la carga con agente explosivo para el corte y fragmentación del bloque, estas labores son desarrolladas por parte del personal del ejército nacional de Colombia.



*Fotografía 41. Evaluación de las características físicas del bloque a volar*  
*Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2022)*

La Fotografía 42. Voladura del bloque en vía secundaria sobre talud con alta pendiente: se muestra el momento de la voladura en el que se genera la reacción química, la que a su vez propicia la generación de gases y su expansión a alta velocidad, lo que resulta en el corte y fragmentación del bloque, se destaca que en la voladura se generaron gases de color claro, lo que es un indicador de que la reacción química se desarrolló con un adecuado balance de oxígeno, lo que genera una combustión adecuada, lo que a su vez se traduce en condiciones óptimas en el proceso de corte o fragmentación de bloques, es de resaltar que en la voladura desarrollada no se desarrollan proyecciones ni vibraciones, lo que se reflejó en las condiciones de estabilidad del talud potsvoladura, además se muestra en la fotografía que los alrededores al área de voladura se encuentran despejados, aspecto que hace parte de los protocolos de seguridad implementados para estas actividades, además se muestra la voladura se realizó en condiciones de alta pendiente del talud a lado y lado de la vía al encontrarse está emplazada sobre un corte realizado a este, en donde se evidencian las potenciales condiciones de amenazas por colapso que se podrían presentar por parte de los bloques, el talud o incluso alguno sector de la banca.



*Fotografía 42. Voladura del bloque en vía secundaria sobre talud con alta pendiente  
Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2022)*

### **5.3.1. Análisis de caso Vía Florencia (Caquetá)**

En este caso se realizó la fragmentación de 2 bloques de arenisca, clasificados como muy resistentes a extremos, los que tienen un volumen total aproximado de  $27 \text{ m}^3$ , donde se usaron un total de  $17,2 \text{ kg}$  de ANFO, lo que equivale a aproximadamente  $637,03 \text{ gr/m}^3$  de ANFO, lo que para una roca con una resistencia a la compresión simple de  $195 \text{ MPa}$ , es una cantidad de explosivo promedio, lo que indica que este proceso de fragmentación tuvo una eficiencia adecuada, dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre  $400 \text{ gr/m}^3$  a  $1400 \text{ gr/m}^3$ , al encontrarse en un estado de no alteración, lo que permite un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantizó la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo una correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favoreció el desarrollo de la fragmentación por procesos de tracción, además indica que el bloque no presenta fracturas naturales ni planos de debilidad o desgaste generado por erosión, lo que ha facilitado la fragmentación, al requerirse una cantidad muy baja de explosivo.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa que la voladura es más eficiente y menos costosa, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente  $3.8 \text{ MJ/kg}$ , por lo que presenta una alta eficiencia energética, dado se utilizaron en promedio  $0.63703 \text{ kg/m}^3$  de ANFO, la energía

aplicada durante la voladura fue baja (2.4206 MJ/m<sup>3</sup>), lo cual está dentro de los parámetros de consumo promedio por lo que se cataloga como una fragmentación eficiente considerando la dureza de la roca.

Tabla 35. Resumen caso de validación de voladura N. 3, Vía Florencia (Caquetá). Muestra las características generales de la voladura, el número de bloques intervenidos y fragmentados durante la operación, tipo y clasificación de los bloques de roca, tamaño de cada uno de los bloques, peso específico del cada uno de los bloques, peso total aproximado de cada uno de los bloques, tamaño promedio del grano que componen el bloque, factor de esponjamiento, resistencia a la compresión y cantidad de explosivo usado (ANFO)

N. de bloque	Tipo de roca	Roca	Bloque	Tamaño del bloque (m <sup>3</sup> )	Peso específico (tn/m <sup>3</sup> )	Peso total aprox. Bloque (Tn)	Tamaño de grano (mm)	Factor de esponjamiento	Resistencia a la compresión (MPa)	Explosivo usado (gr)
6	Sedimentaria	Arenisca	1	11	2,5	27,5	0,3	1,5	195	7007,3
7			2	16	2,5	40	0,3	1,5	195	10192,7

Tabla 35. Resumen caso de validación de voladura N. 3, Vía Florencia (Caquetá)

Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

#### 5.4. Caso de validación de voladura N. 4. Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. - E.S.P., Acueducto de Villavicencio – Villavicencio (Meta)

Este caso de voladura se desarrolló el día 9 de mayo de 2022 en la ciudad de Villavicencio capital del departamento del Meta, en donde la temporada invernal que afecto esta ciudad y sus alrededores género una avalancha y procesos de caída de rocas en diferentes sectores en la zona de piedemonte sobre la quebrada Caño Grande, que surte de agua la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. - E.S.P., una de las plantas de tratamiento de agua, más importantes para la ciudad de Villavicencio, a causa de este evento se generaron afectaciones al cauce como represamiento y desvíos del mismo a causa de los bloques de roca que se desprendieron y afectaron el área de captación, además que las altas cantidades de barro que causaron el taponamiento y obstrucción de las rejillas y rejillas de la bocatoma que hacen parte del sistema de captación de agua que abastece la Planta de Potabilización, la cual abastece de agua potable varios sectores de la ciudad de Villavicencio.

Imagen 27. Comunas de Villavicencio, la imagen muestra las comunas en los que se encuentra dividida la ciudad de Villavicencio, en donde se puede apreciar los sectores más afectados por el desabastecimiento de agua, las denominadas Comuna 7, Comuna 8 y Comuna 9, las que corresponden a la zona sur de la ciudad.



Imagen 27. Comunas de Villavicencio

Fuente: Alcaldía de Villavicencio. <https://informacionvillavicencio.wordpress.com/about/>

Es de destacar que esta planta abastece el 100 % del agua potable al área denominada la Comuna 7, Comuna 8 y Comuna 9, de la ciudad de Villavicencio, sector sur de la ciudad, esta planta además de contribuir con un alto porcentaje en el abastecimiento de agua a estos sectores, contribuye con el suministro a otros sectores de esta ciudad, los que a causa del evento se vieron afectados en el abastecimiento de agua, destacando que la zona sur fue la que presentó las más graves afectaciones siendo la comuna 8, la más afectada la que sufrió un desabastecimiento total del servicio de agua por un periodo de tiempo de (3) tres semanas, lo que generó la afectación a cerca de 57.200 habitantes, lo que corresponde al 12 % de la población de esta ciudad para el año 2022, además afectarse el suministro de agua en un 100 % en la zona sur y una afectación en el suministro del 50 % en la zona suroriental de la ciudad, afectando adicionalmente a aproximadamente 100.000 habitantes y en el resto de la ciudad se presentaron reducciones en la presión del servicio hasta en un 30 %, generando una afectación a las estructuras de más de 3 plantas, donde la falta de presión hacía que no llegara el líquido.

La Imagen 28. Ubicación de las zonas de voladura desarrollada en la ciudad de Villavicencio, se muestra el departamento del meta, donde se encuentra la ubicación de la zona de voladura, correspondiente a una zona de piedemonte sobre la quebrada Caño Grande, en cercanías a la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. - E.S.P. que surte de agua la zona sur y otros sectores de la ciudad de Villavicencio.

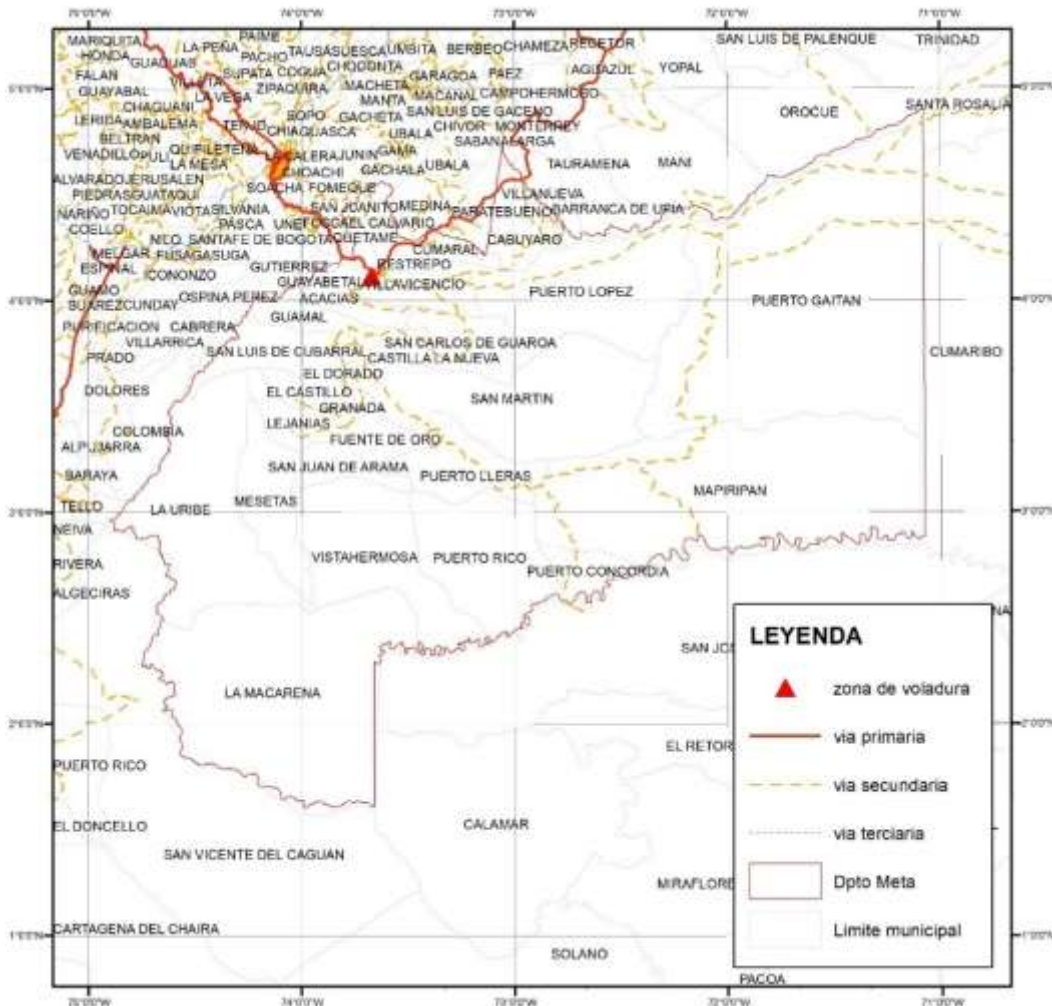


Imagen 28. Ubicación de las zonas de voladura desarrollada en la ciudad de Villavicencio  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

Es de resaltar que esta zona sur de la ciudad, solo recibe suministro y abastecimiento de la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. - E.S.P., plantas de tratamiento afectada por el evento, razón por lo que en este sector de la ciudad se presentaron las mayores afectaciones por la emergencia por falta en el suministro y abastecimiento de agua potable, además esta zona de

manera generalizada alberga barrios pertenecientes a los estratos 1, 2 y 3, en donde los barrios pertenecientes al estrato (2) dos, son predominante en esta zona, los que corresponden al 53 % del total de barrios registrados en el sector, por otra parte, en estas comunas se albergan a los usuarios con los menores recursos de esta ciudad, siendo la que ubica la mayor parte de las áreas deprimidas y barrios de invasión, pertenecientes a los estratos bajos.

La Imagen 29. Ubicación de las zonas de voladura en la ciudad de Villavicencio en imagen tipo Landsat, nos muestra la ubicación del bloque que afecto las rejas y rejillas de la bocatoma de la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. – E.S.P., planta que surte de agua la ciudad de Villavicencio, así como la denominada comuna 8 ubicada en el sur de la ciudad, área que sufrió la mayor afectación por este evento.



*Imagen 29. Ubicación de las zonas de voladura en la ciudad de Villavicencio en imagen tipo Landsat*

*Fuente: Google. (s.f.). [Imagen del municipio de Villavicencio – departamento del Meta].*

*Recuperado de [[https://www.google.com/maps/place/Villavicencio,+Meta/@4.1861353,-73.7443305,26461m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e3e2ddfba283211:0x537e40041d7b20c2!8m2!3d4.1491688!4d-73.6285475!16zL20vMDQ1NWh6?entry=ttu&g\\_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIWXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/Villavicencio,+Meta/@4.1861353,-73.7443305,26461m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e3e2ddfba283211:0x537e40041d7b20c2!8m2!3d4.1491688!4d-73.6285475!16zL20vMDQ1NWh6?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIWXMDSoASAFQAw%3D%3D)].*

*Modificado: El autor (2025).*

La Imagen 30. Ubicación específica de la caída de bloques sobre las rejas y rejillas en la quebrada Caño Grande, zona de desarrollo de la voladura en cercanía de la bocatoma en la ciudad de Villavicencio, en imagen tipo Landsat, se muestra el área donde cayeron los bloques que afectaron la bocatoma y zona donde se desarrolló la voladura de corte y fragmentación por parte de personal del Ejército Nacional de Colombia, en la quebrada Caño Grande, la que surte de agua la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. – E.S.P., se resalta que el área es de difícil acceso, correspondiendo a una zona de piedemonte donde la quebrada se encuentra encajonada presentando un control estructural a lado y lado del cauce, además de ser una zona con abundante vegetación correspondiente a bosque nativo, en donde el punto donde se desarrolló el evento no cuenta con vías de acceso, razón por la que los materiales y equipos relacionados con la actividad de voladura debieron ser cargados por parte del personal militar y en lomo de mula desde una finca cercana, en la cual se instauró el campamento para el desarrollo de las actividades y desde la cual se improvisó y dio apertura de un camino por entre la vegetación hasta llegar al lugar de los hechos y proceder a las actividades de voladura.



*Imagen 30. Ubicación específica de la caída de bloques sobre las rejas y rejillas en la quebrada Caño Grande, zona de desarrollo de la voladura en cercanía de la bocatoma en la ciudad de Villavicencio, en imagen tipo Landsat*  
*Fuente: Google. (s.f.). [Imagen del municipio de Villavicencio – departamento del Meta].*  
*Recuperado de [https://www.google.com/maps/place/Villavicencio,+Meta/@4.2371522,-73.6407328,6615m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e3e2ddfba283211:0x537e40041d7b20c2!8m2!3d4.1491688!4d-73.6285475!16zL20vMDQ1NWWh6?entry=ttu&g\_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D].*  
*Modificado: El autor (2025).*

La Fotografía 43. Inicio de creciente por lluvias en zona de la bocatoma: se muestra las lluvias que afectaron la zona, además de mostrar el inicio de la creciente que generó la obstrucción de la bocatoma de la planta de tratamiento.



*Fotografía 43. Inicio de creciente por lluvias en zona de la bocatoma*  
*Fuente: El Tiempo (2022)*

En esta fotografía además de mostrar el inicio de la creciente que transporto consigo materiales de diferente tamaño y origen, en donde se transportó materiales como: barro, tierra, arena, sedimento y gravas, materiales que generaron el taponamiento y sepultamiento de estructuras como las rejas y rejillas en las áreas cercanas a la bocatoma y en la planta de tratamiento afectar estructuras como el desarenador, además a causa de las fuertes lluvias se generaron procesos de inestabilidad en las laderas de donde desprendieron bloques de gran tamaño que produjeron un desvío del cauce, en la fotografía se observa el cauce tiene 3 ramificaciones, de los cuales la ramificación que abastece la planta de tratamiento, es desviada por la caída de grandes bloques desde la ladera, además de los demás materiales arrastrados en el proceso, lo que imposibilito la llegada del suministro de agua a la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. – E.S.P., de la ciudad de Villavicencio – Meta

La Fotografía 44. Creciente y afectación en la zona de bocatoma: se muestra el momento de la emergencia en el que la bocatoma empieza a ser sepultada, además de mostrar la magnitud del

evento que genero las afectaciones a la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. – E.S.P., de la ciudad de Villavicencio – Meta, se observa que el flujo de agua que maneja esta quebrada es de alta energía y en consecuencia presenta un alto transporte de materiales lo que genero el aumento de los daños a diferentes estructuras en el área afectada.



*Fotografía 44. Creciente y afectación en la zona de bocatoma  
Fuente: El Tiempo (2022)*

La Fotografía 45. Bocatoma sepultada por barro, se muestran los efectos y magnitud del evento: un día después de la creciete, en donde se evidencia que la bocatoma y otras estructuras, se encuentran completamente sepultadas por el barro y otros materiales arrastrados por él cauce durante la avalancha, además de haberse generado el desvió del cauce que surte de agua a dicha bocatoma, entre otras afectaciones hidrológicas presentadas en el área.



*Fotografía 45. Bocatoma sepultada por barro  
Fuente: El Tiempo (2022)*

La Imagen 31. Ubicación de bloques que obstruían el cauce y paso de agua a la bocatoma. Se muestra en la imagen tipo Landsat la ubicación del bloque que obstruía la bocatoma que abastece la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. – E.S.P., de la ciudad de Villavicencio – Meta.



*Imagen 31. Ubicación de bloques que obstruían el cauce y paso de agua a la bocatoma*

*Fuente: Google. (s.f.). [Imagen del municipio de Villavicencio – departamento del Meta].*

*Recuperado de [[https://www.google.com/maps/place/Villavicencio,+Meta/@4.2371522,-73.6407328,6615m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e3e2ddfba283211:0x537e40041d7b20c2!8m2!3d4.1491688!4d-73.6285475!16zL20vMDQ1NWh6?entry=ttu&g\\_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIjKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/Villavicencio,+Meta/@4.2371522,-73.6407328,6615m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e3e2ddfba283211:0x537e40041d7b20c2!8m2!3d4.1491688!4d-73.6285475!16zL20vMDQ1NWh6?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIjKXMDSoASAFQAw%3D%3D)].*

*Modificado: El autor (2025).*

En la imagen se observan varios bloques de gran tamaño, localizados en las cercanías de la bocatoma, estos bloques generaron además del taponamiento de las rejas y rejillas de la bocatoma, estos bloques causaron que en diferentes zonas de la quebrada se presentaran desvíos del curso de agua, impidiendo el paso a la zona de captación, la imagen muestra el tamaño de los bloques, lo que da referencia de la magnitud del evento.

De manera específica, para este bloque, se clasifica como arenisca, al cual se le establecieron las siguientes características:

La Tabla 36. Clasificación de bloques sobre la Quebrada Caño Grande, que afecta la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – Villavicencio (Meta), muestra de manera general la caracterización de los bloques de arenisca que obstruyen la Planta de Potabilización Caño Grande, que abastece el Acueducto de Villavicencio, a los que se les establece las características enunciadas a partir de inspección visual y ensayos en campo por medio de penetrómetro.

TIPO DE ROCA		PESO ESPECÍFICO (t/m <sup>3</sup> )	TAMAÑO DE GRANO (mm)	FACTOR DE ESPONJAMIENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)
Sedimentaria	Arenisca	2,5	0,1 -1 0,4***	1,5	160 – 255* 210**

Tabla 36. Clasificación de bloques sobre la Quebrada Caño Grande, que afecta la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – Villavicencio (Meta)

\* Resistencia a la compresión (MPa) Teórica

\*\* Resistencia a la compresión (MPa) Medida en Campo.

\*\*\* Medición en campo

Fuente: El autor (Elaboración propia). 2025.

La Fotografía 46. Perforación de barrenos en el bloque: se muestra el proceso de perforación del bloque denominado barrenación (perforación del barreno), actividad realizada con taladros neumático para roca, en los barrenos perforados se ubicarán las cargas del agente explosivo para la posterior voladura de corte o fragmentación del bloque, esta actividad se realiza posterior a la inspección y caracterización las propiedades físicas y mecánicas del mismo, las que se establecen a partir de inspección visual y ensayos en campo por medio de penetrómetro, estas actividades fueron realizadas por parte del personal técnico de explosivos del Ejército Nacional de Colombia, este bloque de gran tamaño que rodó por el talud de la quebrada Caño Grande y se alojó en las inmediaciones de la bocatoma, bloque que obstruía y taponaba la rejilla de paso de agua hacia la reja principal de la bocatoma.

En este caso la administración municipal en cabeza por Juan Felipe Harman Ortiz alcalde de la ciudad de Villavicencio, quien ante la magnitud de la avalancha solicita apoyo al Ejército Nacional, quien envía a la unidad de técnicos en explosivos del Grupo Marte de la Cuarta División a apoyar la emergencia, además esta operación conto con el apoyo de la Defensa Civil y personal de promoción y comunicación social por parte de la alcaldía, quienes se encargaron de la logística relacionada con

la información y perifoneo, además de los cordones de seguridad, mientras el Ejército Nacional procedió a la operación de voladura y fragmentación del bloque de gran tamaño que rodó por el talud de la quebrada Caño Grande y se alojó en las inmediaciones de la bocatoma en las coordenadas N 4° 6' 41.74" y W 73° 40' 15.11", bloque que obstruía y taponaba la rejilla del paso de agua hacia la reja principal de la bocatoma, en donde el personal técnico del ejército nacional por medio de explosivos con una voladura controlada, se fragmenta el bloque a fin de contribuir al restablecimiento del paso de agua y restaurar el servicio de agua potable por parte del acueducto garantizando el flujo hacia la planta de tratamiento de agua potable Caño Grande, que surte de agua a más 45 barrios de la comuna 8 y del sur de la ciudad, además de que esta planta es la segunda planta de tratamiento más grande de la ciudad de Villavicencio.



*Fotografía 46. Perforación de barrenos en el bloque*  
*Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2022)*

La zona donde se presentó el evento y se dio la obstrucción de las rejjas y rejillas, corresponde a una montañosa donde se presentan pendientes medias a altas correspondientes a los valles de la quebrada Italia y la quebrada Caño Grande, a aproximadamente 600 metros de la unión de estas 2 quebradas, punto desde el cual conserva el nombre de quebrada Caño Grande, en este punto se desprendió un bloque de roca clasificado como arenisca de aproximadamente 9 m<sup>3</sup>, que genera la obstrucción del paso de agua a la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. – E.S.P., de esta ciudad.

La técnica de voladura controlada a cielo abierto, que se implementó fue una voladura secundaria tipo cachorro, por medio de la cual se desarrollaron perforaciones en el bloque a fin de que, por medio de una detonación controladas, la expansión de gases a alta velocidad realice una fragmentación o corte, en donde fueron utilizados 1,6 kilogramos de ANFO, 6 detonadores eléctricos y 26 metros de cordón detonante de 12 gramos.

En este caso no se hizo disposición ni manejo de los desechos producto de la fragmentación, el manejo realizado se hizo desde el diseño de la detonación en donde se limitó a hacer un corte que dejara los fragmentos del bloque acomodados y dispuestos en un área de la quebrada, donde no afecte el curso de agua, despejando y retirando los fragmentos de menor tamaño de forma manual del cauce principal, la bocatoma, las rejas y rejillas, se destaca que estas actividades fueron realizadas por parte del personal del acueducto de Villavicencio, por medio de barras, palancas y herramientas de mano, dado la dificultad del área para el ingreso de maquinaria pesada.

#### **5.4.1. Análisis de caso N. 4. Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. - E-S-P-, Acueducto de Villavicencio – Villavicencio (Meta)**

En este caso se realizó la fragmentación de 1 bloque de arenisca, clasificado como muy resistente a extremo, el cual tiene un volumen total aproximado de  $9 \text{ m}^3$ , donde se usaron un total de 1,6 kg de ANFO, lo que equivale a aproximadamente  $178 \text{ gr/m}^3$  de ANFO, para una roca con una resistencia a la compresión simple de 210 MPa, lo que es una cantidad de explosivo muy baja, lo que indica que este proceso de fragmentación tuvo una muy alta eficiencia, dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre  $500 \text{ gr/m}^3$  a  $1600 \text{ gr/m}^3$ , al encontrarse en un estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, garantizando la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favorece el desarrollo de la fragmentación por procesos de tracción, además indica que en el bloque no se presentan redes de fracturas preexistentes, ni planos de debilidad, lo que ha facilitado la fragmentación de bloque, usando estas características de la roca se generan confinamientos como facilitadores del mecanismo de fractura, haciendo que requieran muy bajas cantidades de explosivo.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa desarrollo de voladuras más eficientes y menos costosas, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente 3.8 MJ/kg, por lo que se presenta una muy alta eficiencia energética, dado se utiliza en promedio 0.178 kg/m<sup>3</sup> de ANFO, en donde la energía aplicada durante la voladura fue muy baja (0,6764 MJ/m<sup>3</sup>), lo cual está muy por debajo de los parámetros de consumo regulares por lo que se cataloga como una fragmentación muy eficiente considerando la dureza de la roca.

La Tabla 37. Resumen caso de validación de voladura N. 4. Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – Villavicencio (Meta). Muestra las características generales de la voladura, el número de bloques intervenidos y fragmentados durante la operación, tipo y clasificación de los bloques de roca, tamaño de cada uno de los bloques, peso específico del cada uno de los bloques, peso total aproximado de cada uno de los bloques, tamaño promedio del grano que componen el bloque, factor de esponjamiento, resistencia a la compresión y cantidad de explosivo usado (ANFO)

N. de bloque	Tipo de roca	Roca	Bloque	Tamaño del bloque (m <sup>3</sup> )	Peso específico (tn/m <sup>3</sup> )	Peso total aprox. Bloque (Tn)	Tamaño de grano (mm)	Factor de esponjamiento	Resistencia a la compresión (MPa)	Explosivo usado (gr)
8	Sedimentaria	Arenisca	1	9	2,5	22,5	0,3	1,5	210	1600

*Tabla 37. Resumen caso de validación de voladura N. 4. Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – Villavicencio (Meta)  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).*

#### **5.5. Caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta)**

Este caso de voladura fue desarrollado durante los días 27 al 31 de marzo de 2017, sobre el cauce del río Guatiquia, a causa de una serie de eventos donde se vio afectada la bocatoma ubicada en la vereda la Argentina, en el departamento del Meta, en las coordenadas N 4° 06' 42.3" y W 73° 40' 17.3" W, en cercanías a la ciudad de Villavicencio, este evento en el que actuaron como detonante las altas precipitaciones presentadas en la región desde inicios del mes de marzo, a causa de la fuerte ola invernal que afecto la zona generando afectaciones y problemas de inestabilidad en el talud y laderas cercanas al cauce del río y a consecuencia de ello el desprendimiento de materiales, estos fueron identificados por las autoridades locales, la corporación autónoma regional y el ejército

nacional de Colombia, como una combinación de materiales compuesto principalmente por suelo y rocas como: arenisca, arenisca calcárea, calizas y cuarzoarenitas, como se muestra en la Tabla 38. Clasificación de bloques sobre el río Guatiquia, que afectan la Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta), por otra parte, dichas autoridades identifican al menos seis (6) puntos críticos, en donde se debe dar atención prioritaria por el colapso de altos volúmenes de material y además en esta inspección se estimó un aproximado de 1700 m<sup>3</sup>, como volumen del material producto del deslizamiento.

La Imagen 32. Ubicación de zonas de voladura en la vereda La Argentina y Santa María Alta. Se muestra la localización de la bocatoma y las zonas donde se produjo la caída de los bloques, que fueron sometidos a voladura de corte y fragmentación, sobre el río Guatiquia en el departamento del Meta.

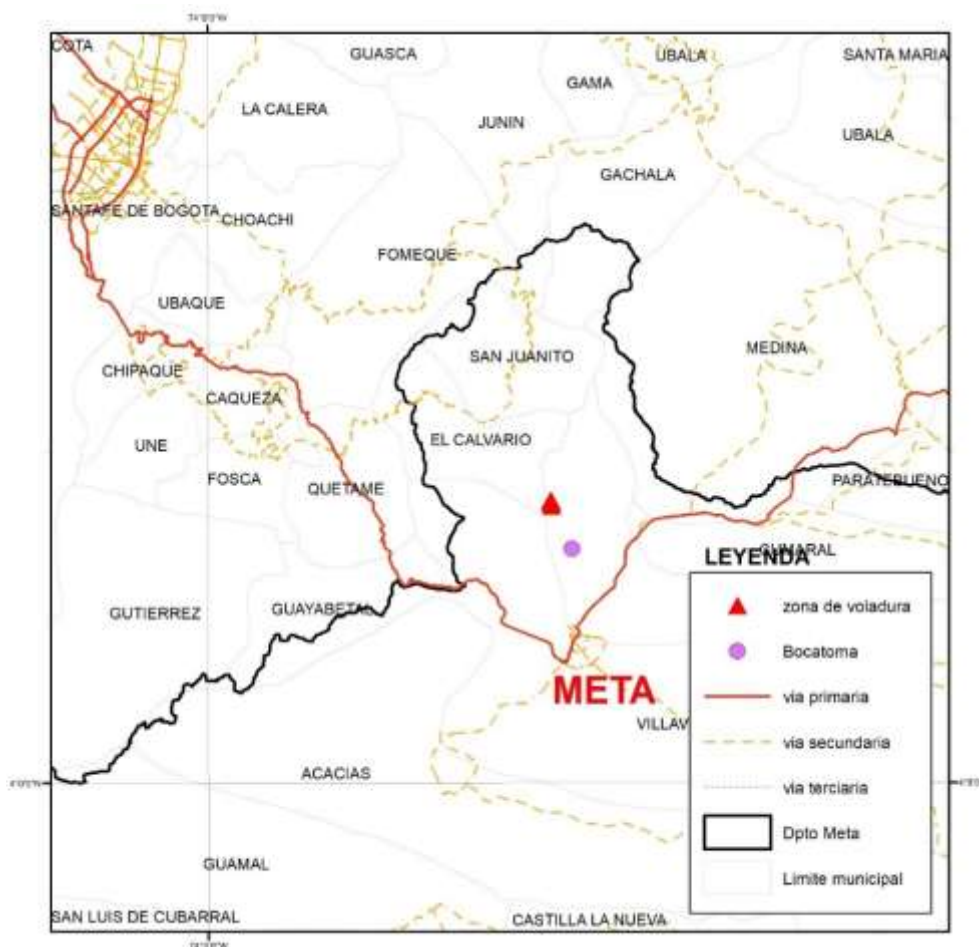


Imagen 32. Ubicación de zonas de voladura en la vereda La Argentina y Santa María Alta  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

La inspección del área afectada se desarrolló de manera conjunta entre las autoridades municipales, CORMACARENA y el Ejército Nacional de Colombia, lo que dio como resultado la identificación y priorización de cuatro (4) zonas con procesos de importancia, las que a futuro por sus características podrían generar problemas de represamiento y podrían generar potenciales afectaciones a la región o al sistema de captación de agua para la ciudad, en estos puntos localizados a lo largo de una franja de menos de 1 km, sobre el río Guatiquia, localizados entre la vereda la Argentina y la vereda Santa María Alta, en donde el personal del ejército nacional de Colombia, hace el acompañamiento a la secretaria de obras públicas dependencia encargada por las autoridades municipales y a la corporación autónoma regional, a evaluar la potencial amenaza, en donde fueron identificados y caracterizadas las condiciones de estabilidad de los bloques en los cuatro (4) puntos priorizados, por estos organismos, en donde se identificaron bloques de gran tamaño, los que varían entre los 8 m<sup>3</sup> y 30 m<sup>3</sup>, estos bloques se evaluaron bajo criterios para establecer cuáles de estos bloques, podrían estar relacionados con la obstrucción y represamiento del cauce, lo que podría generar una avalancha, identificar procesos de obstrucción al curso de agua hacia la bocatoma y bloques que de algún modo amenacen la infraestructura.

Como resultado de la inspección realizada por parte del personal de manejo de explosivos del ejército nacional de Colombia, se establece que de los aproximadamente 1700 m<sup>3</sup>, de material que comprenden a la masa deslizada hacia el cauce del río Guatiquia durante el evento, aproximadamente 440 m<sup>3</sup>, lo que corresponde a un total de 27 bloques de gran tamaño, se recomendó debían ser manejados de manera prioritaria por medio de voladura controlada en labores de corte o fragmentación, dado que estos bloques por su ubicación están asociados a la generación de alguna amenaza potencial.

El primer punto de voladura se localiza en las coordenadas N 3° 20' 17.4" y W 71° 29' 16.2" a aproximadamente 6 km al norte de la bocatoma, que surte de agua la Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., principal planta de tratamiento y distribución de agua potable, para la ciudad de Villavicencio capital del departamento del Meta, la que abastece el sector norte, oriental y occidental de la ciudad, la que da cubrimiento a aproximadamente el 80 % de la población.

Dentro de los impactos generados por este evento, está la afectación en el suministro de agua para unos 420.000 habitantes de esta ciudad, lo que corresponde al 80 % de la población para este año,

lo que generó una alerta a las autoridades municipales y de salud pública de la ciudad, razón por lo que la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villavicencio – E.A.A.V. – E.S.P., ante la emergencia que afectó la prestación del servicio de agua, obligó a las autoridades municipales a activar los planes de contingencia y mitigación de emergencias, para evitar una emergencia sanitaria y garantizar la prestación del servicio por unas cuantas horas al día en diferentes sectores de la ciudad, este plan de contingencia no atendió con eficiencia el 100 % de usuarios de la E.A.A.V. – E.S.P., ya que hay sectores de la ciudad donde nunca llegó el servicio de agua ni por unas pocas horas al día, ni el abastecimiento por medio de carrotaques, además de esta emergencia se resalta que no se pudo satisfacer las necesidades de la población, dado que en promedio cada hogar en la ciudad tiene 4 personas y estos recibían aproximadamente 3 baldes de agua al día, (lo que es equivalente a 15 lt de agua al día, para 4 personas) lo que no es suficiente, generando distintas afectaciones a los hogares y en general al sector residencial; adicionalmente los sectores comercial, hotelero y agroindustrial, sectores de la economía con influencia en la ciudad, también se vieron gravemente afectados por la problemática, donde se resalta el caso del sector salud, en donde la falta del suministro de agua potable obligó a los puestos de salud y al hospital regional a atender solo los casos de urgencia, comprometiendo la atención de consultas externas, la atención de urgencias y en algunos casos también las hospitalizaciones, además en el centro carcelario se presentó un foco infeccioso a causa de esta problemática, ya que el centro está dotado para recluir a 1.000 internos y en el momento de la emergencia se presentaba en este centro penitenciario condiciones de hacinamiento con aproximadamente 1.800 internos en el penal, en donde se deben mantener las condiciones mínimas de salubridad, las que obligatoriamente requieren del servicio de agua, en cuanto al sector educativo, este también sufrió consecuencias viéndose obligado tanto las instituciones públicas como privadas a suspender las actividades académicas ante la falta de suministro de agua y en especial las actividades económicas relacionadas con el sector comercial y el sector hotelero registraron las más grandes pérdidas económicas dado que los establecimientos comerciales no pueden funcionar con normalidad.

La Imagen 33. Ubicación de las zonas de voladura en las veredas La Argentina y Santa María Alta y La bocatoma. Se muestra la localización de la bocatoma y las cuatro (4) zonas, donde se produjeron los deslizamientos considerados como puntos críticos y donde posteriormente se realizaron las labores de voladura de corte y fragmentación, en este evento se estableció por parte de las autoridades municipales y el E.A.A.V. – E.S.P., un total de siete (7) zonas prioritarias para la atención

y por su parte el Ejército Nacional de Colombia, estableció un total de cuatro (4) zonas críticas para atención prioritaria, las que corresponden a los cuatro (4) puntos donde se realizó intervención y manejo de bloques mediante el uso de explosivos en el cauce del río Guatiquia, en inmediaciones de la vereda la Argentina y Santa María Alta departamento del Meta.



*Imagen 33. Ubicación de las zonas de voladura en las veredas La Argentina y Santa María Alta y La bocatoma*

*Fuente: Google. (s.f.). [Imagen del municipio de Villavicencio – departamento del Meta].*

*Recuperado de [[https://www.google.com/maps/place/Villavicencio,+Meta/@4.2371522,-73.6407328,6615m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e3e2ddfba283211:0x537e40041d7b20c2!8m2!3d4.1491688!4d-73.6285475!16zL20vMDQ1NWh6?entry=ttu&g\\_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/Villavicencio,+Meta/@4.2371522,-73.6407328,6615m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e3e2ddfba283211:0x537e40041d7b20c2!8m2!3d4.1491688!4d-73.6285475!16zL20vMDQ1NWh6?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D)].*

*Modificado: El autor (2025).*

Ante esta condición de falta de un suministro continuo de agua potable y el desencadenamiento potencial de una emergencia sanitaria, las consecuencias que trae consigo y las complicaciones para el correcto desarrollo de la ciudad, la administración local se ve en la necesidad de solicitar apoyo al Ejército Nacional de Colombia y coordinar junto con este la atención de la emergencia, desde donde se envía técnicos en explosivos del Grupo Marte de la Cuarta División a apoyar la emergencia, además esta operación contó con el apoyo de la defensa civil colombiana y personal de promoción

y comunicación social por parte de la alcaldía, quienes se encargaron de los procesos relacionados con la logística en comunicaciones y difusión de la información, lo relacionada con los cordones de seguridad y los controles de los accesos al río, en las zonas y los alrededores de donde se presentaron los eventos durante los cuatro (4) días, en los que se desarrollaron las operaciones de voladura, por otra parte, el Ejército Nacional de Colombia, realizó la valoración y caracterización de los bloques que harán parte de la operación de voladura, para fragmentar y cortar los bloques y con ello dar apoyo en el restablecimiento del servicio de agua a la población.

La Imagen 34. Ubicación de las zonas de voladura, se muestran ubicadas sobre la imagen tipo Landsat, las cuatro (4) zonas de voladura, que fueron priorizadas por el Ejército Nacional de Colombia, para el desarrollo de la voladura, sobre el río Guatiquia, las que se encuentran en las veredas la Argentina y Santa María Alta, localizadas de sur a norte en las siguientes coordenadas: punto 1 N 3° 20' 17.4" y W 71° 29' 16.2"; punto 2 N 3° 20' 45.4" y W 71° 29' 01.5"; punto 3 N 3° 20' 57.4" y W 71° 28' 28.6" y punto 4 N 3° 20' 36.9" y W 71° 29' 28.3"



Imagen 34. Ubicación de las zonas de voladura

Fuente: Google. (s.f.). [Imagen del municipio de Villavicencio – departamento del Meta].  
 Recuperado de [https://www.google.com/maps/place/Villavicencio,+Meta/@4.2371522,-73.6407328,6615m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e3e2ddfba283211:0x537e40041d7b20c2!8m2!3d4.1491688!4d-73.6285475!16zL20vMDQ1NWh6?entry=ttu&g\_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wIXMDS0ASAFQAw%3D%3D].  
 Modificado: El autor (2025).

Las técnicas de voladura controlada a cielo abierto, que se implementaron en este caso fueron de tipo secundario, las denominadas cachorro y plasteo, por medio de las cuales se desarrollaron cortes y fragmentación de los bloques por medio de detonaciones controladas, en donde al final de las operaciones se estimó la utilización de 156 kilogramos de ANFO, 407 detonadores eléctricos y 2628 metros de cordón de 12 gramos.

La zona donde se desarrollaron las operaciones de voladuras, fueron sobre el cauce del río Guatiquia, el cual sus alrededores se caracterizan por presentar pendientes medias a altas, en donde los bloques a volar se clasificaron como bloques de arenisca, arenisca calcárea, cuarzoarenitas y calizas, este material se asocia a la litología presente en la formación Farallones.

La Tabla 38. Clasificación de bloques sobre el río Guatiquia, que afectan la Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta), muestra de manera particular la caracterización de los bloques de arenisca, arenisca calcárea, calizas y cuarzoarenitas, que obstruyeron el cauce del río Guatiquia, que afectaron la Planta de Potabilización Bavaria del Acueducto de Villavicencio, en la Tabla 38. Clasificación de bloques sobre el río Guatiquia, que afectan la Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta), se registran las características de los bloques establecidas a partir de inspección visual y ensayo en campo por medio de penetrómetro.

TIPO DE ROCA	ROCA	PESO ESPECIFICO (Tn/m <sup>3</sup> )	TAMAÑO DE GRANO (mm)	FACTOR DE ESPONJAMIENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)	N. DE BLOQUES
Sedimentaria	Arenisca	2,5	0,4	1,5	220	7
Sedimentaria	Arenisca calcárea	2,6	1	1,55	200	9
Sedimentaria	Calizas	2,7	1	1,55	190	4
Sedimentaria	Cuarzoarenitas	2,5	0,4	1,5	240	7

Tabla 38. Clasificación de bloques sobre el río Guatiquia, que afectan la Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta)  
 Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

La Fotografía 47. Inspección de bloque antes de la voladura: se muestra a personal técnico en explosivos del Ejército Nacional de Colombia, realizando el proceso de inspección de cargas, este proceso es el último a realizar antes del proceso de voladura, esta actividad es realizada a cada uno de los bloques a cortar y fragmentar, posterior a las labores de clasificación y caracterización de los materiales, la perforación de barrenos, la carga barrenos con el agente explosivo ANFO, ubicación y amarre con cordón detonante, esta inspección hace parte de las labores de rutina dentro del manual de operaciones y de seguridad en voladura del Ejército Nacional de Colombia, antes de realizar la detonación para la fragmentación o el corte de los bloques, según corresponda al caso, es de resaltar que en este proceso se verifica todos los barrenos se encuentren debidamente cargados y realizados los amarres con cordón detonante, así como al detonador o explosor respectivo, esta labor es de suma importancia a fin de garantizar que la detonación de los barrenos se desarrolle de forma adecuada, dado que un barreno sin detonar puede generar una amenaza para el personal que se desempeña en las labores de voladura.



*Fotografía 47. Inspección de bloque antes de la voladura*

*Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2017)*

La Fotografía 48. Proceso de amarre y corte de cordón detonante y ubicación de detonadores: se observa a personal del Ejército Nacional de Colombia, realizando corte del cordón detonante amarres (circuito) e inspección de las mallas de seguridad, las que se colocaran sobre los bloques de gran tamaño y la ubicación de los detonadores en el cordón detonante, a fin de ser trasladados y puestas en el bloque. Se destaca que el cordón detonante es un tubo de plástico delgado y flexible que generalmente se llena con tetranitrato de pentaeritritol. Con el PETN, el cual explota a una

velocidad de aproximadamente 6400 m / s, cuya función es actuar como tendido de la línea troncal formando un circuito cerrado, para permitir que a todas las cargas explosivas se detonen garantizando la iniciación por los dos sentidos.



*Fotografía 48. Proceso de amarre y corte de cordón detonante y ubicación de detonadores  
Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2017)*

La Fotografía 49. Transporte de plantas eléctricas requeridas para los trabajos técnicos: se muestra el proceso de apoyo permanente ha dado ante la emergencia a los habitantes del departamento Meta, en donde se transportaron plantas eléctricas y otros insumos requeridos en el desarrollo de los trabajos técnicos de voladura por parte del Ejército Nacional de Colombia, para dar solución a la problemática que presentó la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villavicencio – E.A.A.V., en el río Guatiquía, la fotografía muestra las maniobras de descarga de insumos realizadas por la tripulación del helicóptero UH-60 'Black Hawk' del Comando Aéreo de Combate No. 2 - CACOM 2, de la Fuerza Aérea Colombiana, en donde durante los días 27 al 31 de marzo de 2017, que se realizaron las operaciones fueron transportadas más de 5 Toneladas en maquinaria y equipos, los que fueron movilizados en coordinación con el Centro Nacional de Recuperación de Personal - CENRP, hasta el área afectada, estas actividades se desarrollaron vía aérea a causa de las difíciles condiciones de acceso y la imposibilidad por vía terrestre, dadas las condiciones del terreno, falta de vías y las fuertes lluvias que predominaron en la zona durante este periodo del año.



*Fotografía 49. Transporte de plantas eléctricas requeridas para los trabajos técnicos  
Fuente: Ejército Nacional de Colombia. Escuela de Ingenieros Militares – ESING. (2017)*

#### **5.5.1. Análisis de caso N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta)**

En este caso se realizó la fragmentación de diferentes bloques de arenisca calcárea, bloques de arenisca y bloques de cuarzoarenitas, los cuales se encuentran en diferentes niveles de resistencia a la compresión simple, destacando los siguientes:

Nueve (9) bloques identificados como arenisca calcárea, clasificados como muy resistentes a extremos, los que tienen un volumen total aproximado de  $152 \text{ m}^3$ , con una resistencia a la compresión simple de 200 MPa, para la fragmentación de estos bloques fueron necesarios un total de 62,5 kg de ANFO, lo que equivale a aproximadamente  $411,18 \text{ gr/m}^3$  de ANFO, para una roca con una resistencia a la compresión simple de 200 MPa, es una cantidad de explosivo baja, pero que se encuentra dentro de los consumos promedio, lo que indica que este proceso de fragmentación tuvo una buena eficiencia, dado que la cantidad de explosivo usado de forma tradicional en este tipo de rocas está entre  $400 \text{ gr/m}^3$  a  $1500 \text{ gr/m}^3$ , al encontrarse en un estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantizó la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favorece el desarrollo

de la fragmentación mediante procesos de tracción, además indica que los bloques no presentan redes asociadas a fracturas preexistentes o planos de debilidad o zonas de alta porosidad, lo que ha facilitado la fragmentación del bloque, al no permitir el escape de gases, requiriendo con esto una cantidad de explosivo baja.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa desarrollo de voladuras más eficientes y menos costosas, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente 3.8 MJ/kg, por lo que se presenta eficiencia dentro del promedio energético, dado se utiliza en promedio 0,41118 kg/m<sup>3</sup> de ANFO, en donde la energía aplicada durante la voladura se encuentra dentro de los estándares promedio (1,56248 MJ/m<sup>3</sup>), lo cual corresponde a parámetros de consumo bajos, pero dentro del estándar regular, por lo que se cataloga como una fragmentación eficiente considerando la dureza de la roca.

La Tabla 39. Resumen caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta). Muestra las características generales de la voladura, el número de bloques intervenidos y fragmentados durante la operación, tipo y clasificación de los bloques de roca, tamaño de cada uno de los bloques, peso específico del cada uno de los bloques, peso total aproximado de cada uno de los bloques, tamaño promedio del grano que componen el bloque, factor de esponjamiento, resistencia a la compresión y cantidad de explosivo usado (ANFO)

Tipo de roca	Roca	Bloque	Tamaño del bloque (m <sup>3</sup> )	Peso específico (tn/m <sup>3</sup> )	Peso total aprox. Bloque (Tn)	Tamaño de grano (mm)	Factor de esponjamiento	Resistencia a la compresión (MPa)	Explosivo usado (gr)
Sedimentaria	Arenisca calcárea	1	14	2,6	36,4	1	1,55	200	5756,52
		2	19	2,6	49,4	1	1,55	200	7812,42
		3	21	2,6	54,6	1	1,55	200	8634,78
		4	14	2,6	36,4	1	1,55	200	5756,52
		5	14	2,6	36,4	1	1,55	200	5756,52
		6	9	2,6	23,4	1	1,55	200	3700,62
		7	18	2,6	46,8	1	1,55	200	7201,24
		8	27	2,6	70,2	1	1,55	200	11101,86
		9	16	2,6	41,6	1	1,55	200	6578,88

Tabla 39. Resumen caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta)  
Fuente: El autor (Elaboración propia). 2025.

Siete (7) bloques de arenisca, los que presentan diferentes grados de alteración, en consecuencia, los bloques de roca muestran diferentes valores de resistencia a la compresión simple, los que presentan un volumen total aproximado de 128 m<sup>3</sup>, para la fragmentación de estos bloques se usaron un total de 45,1 kg de ANFO, bloques representados así:

Un (1) bloque de roca de arenisca de 9 m<sup>3</sup> con una resistencia a la compresión simple de 160 MPa, el que se clasifica como muy resistente a extremo, para la fragmentación de este bloque se usaron un total de 2,3 kg de ANFO, lo que equivale a aproximadamente 255,55 gr/m<sup>3</sup> de ANFO, lo que es una cantidad de explosivo muy baja, lo que indica que este proceso de fragmentación tuvo muy alta eficiencia, dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre 400 gr/m<sup>3</sup> a 1400 gr/m<sup>3</sup>, al encontrarse en un estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantizó la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favoreció el desarrollo de la fragmentación por procesos de tracción, además indica que en el bloque no presenta redes asociadas a fracturas preexistentes, ni planos de debilidad, zonas de alta porosidad o alta alteración, lo que ha facilitado la fragmentación del bloque, al permitir la separación del bloque al aprovechar las características del bloque, requiriendo una cantidad baja de explosivo.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa desarrollo de voladuras más eficientes y menos costosas, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente 3.8 MJ/kg, por lo que se presenta una alta eficiencia energética, dado se utiliza en promedio 0,25555 kg/m<sup>3</sup> de ANFO, en donde la energía aplicada durante la voladura se encuentra dentro de los estándares bajos (0,9711 MJ/m<sup>3</sup>), lo cual corresponde a parámetros de consumo bajos, pero dentro del estándar regular, por lo que se cataloga como una fragmentación eficiente considerando la dureza de la roca.

Un (1) bloque de roca de arenisca de 23 m<sup>3</sup> con una resistencia a la compresión simple de 190 MPa, que se clasifica como muy resistente a extremo, para la fragmentación de este bloque se usaron un total de 6,6 kg de ANFO, lo que equivale a aproximadamente 286,96 gr/m<sup>3</sup> de ANFO, lo que es una cantidad de explosivo baja, lo que indica que este proceso de fragmentación tuvo una alta eficiencia,

dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre  $400 \text{ gr/m}^3$  a  $1400 \text{ gr/m}^3$ , al encontrarse en un estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantizo la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favorece el desarrollo de fragmentación por procesos de tracción, además indica que en el bloque presenta redes asociadas a fracturas preexistentes o planos de debilidad, zonas de alta porosidad o alta alteración, lo que ha facilitado la fragmentación del bloque, al permitir la separación del bloque aprovechando la capacidad del explosivo para fragmentar por estos planos, requiriendo una cantidad de explosivo más baja.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa desarrollo de voladuras más eficientes y menos costosas, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente  $3.8 \text{ MJ/kg}$ , por lo que se presenta una alta eficiencia energética, dado se utiliza en promedio  $0,28696 \text{ kg/m}^3$  de ANFO, en donde la energía aplicada durante la voladura se encuentra dentro de los estándares bajos ( $1,0904 \text{ MJ/m}^3$ ), lo cual corresponde a parámetros de consumo bajos, pero dentro del estándar regular, dada la alteración de la roca, por lo que se cataloga como una fragmentación eficiente considerando la dureza de la roca.

Tres (3) bloques de roca de arenisca de  $46 \text{ m}^3$ , los que se clasifican como muy resistentes a extremos, con una resistencia a la compresión simple de  $200 \text{ MPa}$ , para la fragmentación de este bloque se usaron un total de  $13,8 \text{ kg}$  de ANFO, lo que equivale a aproximadamente  $0,30 \text{ kg/m}^3$  de ANFO, lo que es una cantidad de explosivo baja, pero cercana al estándar, lo que indica que este proceso de fragmentación tuvo una adecuada eficiencia, dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre  $400 \text{ gr/m}^3$  a  $1500 \text{ gr/m}^3$ , al encontrarse en un estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantizo la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favorece el desarrollo de fragmentación por procesos de tracción, además indica que en el bloque no presenta redes asociadas a fracturas preexistentes, ni planos de debilidad, zonas de alta porosidad

o alta alteración, lo que ha facilitado la fragmentación del bloque, al permitir el confinamiento de los gases, facilitando la fragmentación del bloque, requiriendo una cantidad de explosivo baja.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa desarrollo de voladuras más eficientes y menos costosas, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente 3.8 MJ/kg, por lo que se presenta una adecuada eficiencia energética, dado se utiliza en promedio 0,3 kg/m<sup>3</sup> de ANFO, en donde la energía aplicada durante la voladura se encuentra dentro de los estándares bajos (1,14 MJ/m<sup>3</sup>), lo cual corresponde a parámetros de consumo bajos, pero dentro del estándar regular, dada la alteración de la roca, por lo que se cataloga como una fragmentación eficiente considerando la dureza y alteración de la roca.

Un (1) bloque de roca de arenisca de 20 m<sup>3</sup>, clasificado como muy resistente a extremo, con una resistencia a la compresión simple de 210 MPa, clasificado como muy resistente a extremo, para su fragmentación se usaron un total de 8,3 kg de ANFO, lo que equivale a aproximadamente 415 gr/m<sup>3</sup> de ANFO, lo que es una cantidad de explosivo dentro del estándar, lo que indica que este proceso de fragmentación tuvo una eficiencia adecuada, dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre 400 gr/m<sup>3</sup> a 1400 gr/m<sup>3</sup>, al encontrarse en un estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantiza la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favorece el desarrollo de fragmentación por procesos de tracción, además indica que en el bloque no presenta redes asociadas a fracturas preexistentes, ni planos de debilidad, zonas de alta porosidad o alta alteración, lo que ha facilitado la fractura del bloque, al desarrollarse una adecuada fragmentación por la adecuada confinación de los gases, requiriendo una cantidad de explosivo dentro del promedio.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa desarrollo de voladuras más eficientes y menos costosas, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente 3.8 MJ/kg, por lo que se presenta una adecuada eficiencia energética, dado se utiliza en promedio 0,415 kg/m<sup>3</sup> de ANFO, en donde la energía aplicada durante la voladura se encuentra dentro del promedio (1,577 MJ/m<sup>3</sup>), lo cual corresponde a parámetros de consumo promedio dentro del estándar, dada la baja alteración

de la roca, por lo que se cataloga como una fragmentación eficiente considerando la dureza y alteración de la roca.

Un (1) bloque de roca de arenisca de  $30 \text{ m}^3$ , clasificado como muy resistente a extremo, con una resistencia a la compresión simple de 220 MPa, para la fragmentación de este bloque se usaron un total de 14,1 kg de ANFO, lo que equivale a aproximadamente  $0,47 \text{ kg/m}^3$  de ANFO, lo que es una cantidad de explosivo dentro del promedio, lo que indica que este proceso de fragmentación tuvo una eficiencia adecuada, dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre  $400 \text{ gr/m}^3$  a  $1400 \text{ gr/m}^3$ , al encontrarse en un estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantizó la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favorece el desarrollo de fragmentación por procesos de tracción, además indica que en el bloque no presenta redes asociadas a fracturas preexistentes, ni planos de debilidad, zonas de alta porosidad o alta alteración, lo que ha facilitado la fragmentación del bloque, requiriendo una cantidad de explosivo establecida dentro del promedio.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa desarrollo de voladuras más eficientes y menos costosas, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente 3.8 MJ/kg, por lo que se presenta una adecuada eficiencia energética, dado se utiliza en promedio  $0,47 \text{ kg/m}^3$  de ANFO, en donde la energía aplicada durante la voladura se encuentra dentro del promedio ( $1,786 \text{ MJ/m}^3$ ), lo cual corresponde a parámetros de consumo promedio dentro del estándar, dada la baja alteración de la roca, por lo que se cataloga como una fragmentación eficiente considerando la dureza y poca alteración de la roca.

La Tabla 40. Resumen caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta). Muestra las características generales de la voladura, el número de bloques intervenidos y fragmentados durante la operación, tipo y clasificación de los bloques de roca, tamaño de cada uno de los bloques, peso específico del cada uno de los bloques, peso total aproximado de cada uno de los bloques, tamaño promedio del

grano que componen el bloque, factor de esponjamiento, resistencia a la compresión y cantidad de explosivo usado (ANFO)

Tipo de roca	Roca	Bloque	Tamaño del bloque (m³)	Peso específico (tn/m³)	Peso total aprox. Bloque (Tn)	Tamaño de grano (mm)	Factor de esponjamiento	Resistencia a la compresión (MPa)	Explosivo usado (gr)
Sedimentaria	Arenisca	1	9	2,5	22,5	0,3	1,5	160	3063,9
		2	23	2,5	57,5	0,5	1,5	190	7830,2
		3	8	2,5	20	0,4	1,5	200	2723,5
		4	30	2,5	75	0,4	1,5	200	10213,2
		5	8	2,5	20	0,3	1,5	200	2723,5
		6	20	2,5	50	0,3	1,5	210	6808,8
		7	30	2,5	75	0,4	1,5	220	10213,2

*Tabla 40. Resumen caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta)  
Fuente: El autor (Elaboración propia). 2025.*

Siete (7) bloques de cuarzoarenitas de 89 m<sup>3</sup>, clasificados como muy resistente a extremos, con una resistencia a la compresión simple de 240 MPa, para la fragmentación de este bloque se usaron un total de 30,3 kg de ANFO, lo que equivale a aproximadamente 340,44 gr/m<sup>3</sup> de ANFO, lo que es una cantidad de explosivo baja, pero muy cercana al promedio, lo que indica que este proceso de fragmentación tuvo una eficiencia alta, dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre 500 gr/m<sup>3</sup> a 1600 gr/m<sup>3</sup>, al encontrarse en un estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantizó la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favorece el desarrollo de fragmentación por procesos de tracción, además indica que en el bloque no presenta redes asociadas a fracturas preexistentes, ni planos de debilidad, ni zonas de alta porosidad o alta alteración, lo que ha facilitado la fragmentación del bloque, al permitir la confinación del gas en que genera la fragmentación del bloque por tracción, requiriendo una cantidad de explosivo baja.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa una voladura más eficiente y menos costosa, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente 3.8 MJ/kg, por lo que se presenta una eficiencia energética promedio, dado se utiliza en promedio 0,34044 kg/m<sup>3</sup> de ANFO, la energía

aplicada durante la voladura fue eficiente (1,295 MJ/m<sup>3</sup>), lo cual está dentro de los parámetros de consumo por lo que se cataloga como una fragmentación eficiente, aunque su consumo está dentro del promedio con tendencia baja, considerando la dureza de la roca.

La Tabla 41. Resumen caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. - E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta). Muestra las características generales de la voladura, el número de bloques intervenidos y fragmentados durante la operación, tipo y clasificación de los bloques de roca, tamaño de cada uno de los bloques, peso específico del cada uno de los bloques, peso total aproximado de cada uno de los bloques, tamaño promedio del grano que componen el bloque, factor de esponjamiento, resistencia a la compresión y cantidad de explosivo usado (ANFO)

Tipo de roca	Roca	Bloque	Tamaño del bloque (m <sup>3</sup> )	Peso específico (tn/m <sup>3</sup> )	Peso total aprox. Bloque (Tn)	Tamaño de grano (mm)	Factor de esponjamiento	Resistencia a la compresión (MPa)	Explosivo usado (gr)
Sedimentaria	Cuarzoarenitas	1	12	2,5	30	0,4	1,5	240	4920
		2	8	2,5	20	0,4	1,5	240	3280
		3	19	2,5	47,5	0,4	1,5	240	7790
		4	10	2,5	25	0,4	1,5	240	4100
		5	14	2,5	35	0,4	1,5	240	5740
		6	15	2,5	37,5	0,4	1,5	240	6150
		7	11	2,5	27,5	0,4	1,5	240	4510

*Tabla 41. Resumen caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. - E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta)  
Fuente: El autor (Elaboración propia). 2025.*

Cuatro (4) bloques de caliza de 69 m<sup>3</sup>, clasificados como muy resistente a extremos, con una resistencia a la compresión simple de 190 MPa, para la fragmentación de este bloque se usaron un total de 28,5 kg de ANFO, lo que equivale a aproximadamente 410 gr/m<sup>3</sup> de ANFO, lo que es una cantidad de explosivo dentro del promedio, lo que indica que este proceso de fragmentación tuvo una eficiencia adecuada, dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre 400 gr/m<sup>3</sup> a 1400 gr/m<sup>3</sup>, al encontrarse en un estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantizo la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favorece el desarrollo

de fragmentación por procesos de tracción, además indica que en el bloque no presenta redes asociadas a fracturas preexistentes, ni planos de debilidad, ni zonas de alta porosidad o alta alteración, lo que ha facilitado la fragmentación del bloque, al permitir la confinación del gas en que genera la fragmentación del bloque por tracción, requiriendo una cantidad de explosivo baja.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa una voladura más eficiente y menos costosa, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente 3.8 MJ/kg, por lo que se presenta una eficiencia energética promedio, dado se utiliza en promedio 0,410 kg/m<sup>3</sup> de ANFO, la energía aplicada durante la voladura fue eficiente (1,558 MJ/m<sup>3</sup>), lo cual está dentro de los parámetros de consumo por lo que se cataloga como una fragmentación eficiente, aunque su consumo está dentro del promedio, considerando la dureza de la roca.

La Tabla 42. Resumen caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta). Muestra las características generales de la voladura, el número de bloques intervenidos y fragmentados durante la operación, tipo y clasificación de los bloques de roca, tamaño de cada uno de los bloques, peso específico del cada uno de los bloques, peso total aproximado de cada uno de los bloques, tamaño promedio del grano que componen el bloque, factor de esponjamiento, resistencia a la compresión y cantidad de explosivo usado (ANFO)

Tipo de roca	Roca	Bloque	Tamaño del bloque (m <sup>3</sup> )	Peso específico (tn/m <sup>3</sup> )	Peso total aprox. Bloque (Tn)	Tamaño de grano (mm)	Factor de esponjamiento	Resistencia a la compresión (MPa)	Explosivo usado (gr)
Sedimentaria	Calizas	1	21	2,7	56,7	1	1,55	190	8610
		2	28	2,7	75,6	1	1,55	190	11480
		3	10	2,7	27	1	1,55	190	4100
		4	10	2,7	27	1	1,55	190	4100

*Tabla 42. Resumen caso de validación de voladura N. 5. Planta de Potabilización Bavaria - E.A.A.V. – E.S.P., Acueducto de Villavicencio – vereda la Argentina (Meta)  
Fuente: (2025) El autor (Elaboración propia).*

## 5.6. Caso de validación de voladura N. 6. Vía San Luis – Marinilla – Medellín (Antioquia)

Este caso se desarrolló en el municipio de San Luis en el departamento de Antioquia, el día 8 de abril de 2022, en donde a causa de las fuertes lluvias presentadas entre el 17 y el 21 de marzo, asociadas a la primera temporada invernal del año, se generaron deslizamientos de bloques de roca en cinco (5) tramos de la vía, las que causaron el bloqueo y cierre de la vía que comunica el municipio de San Luis y el municipio de Marinilla departamento de Antioquia con la ciudad de Medellín.

La Imagen 35. Ubicación de zonas de voladura en el municipio de San Luis, se observa el municipio de Marinilla y San Luis, respecto a la zona sur oriental del departamento de Antioquia, además de la red vial junto con los municipios en los que sus veredas dependen, estrechamente de este corredor vial, así como la localización de los puntos críticos donde se desarrolló la caída de bloques y posterior proceso voladura de corte y/o fragmentación de tres (3) bloques.

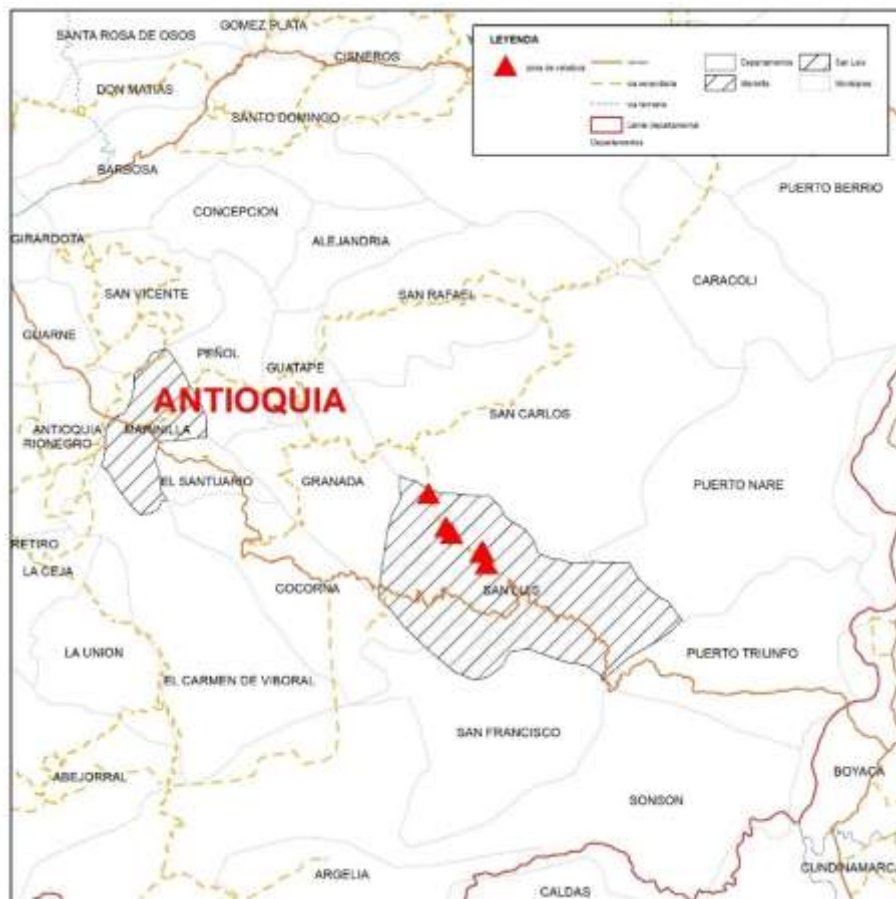


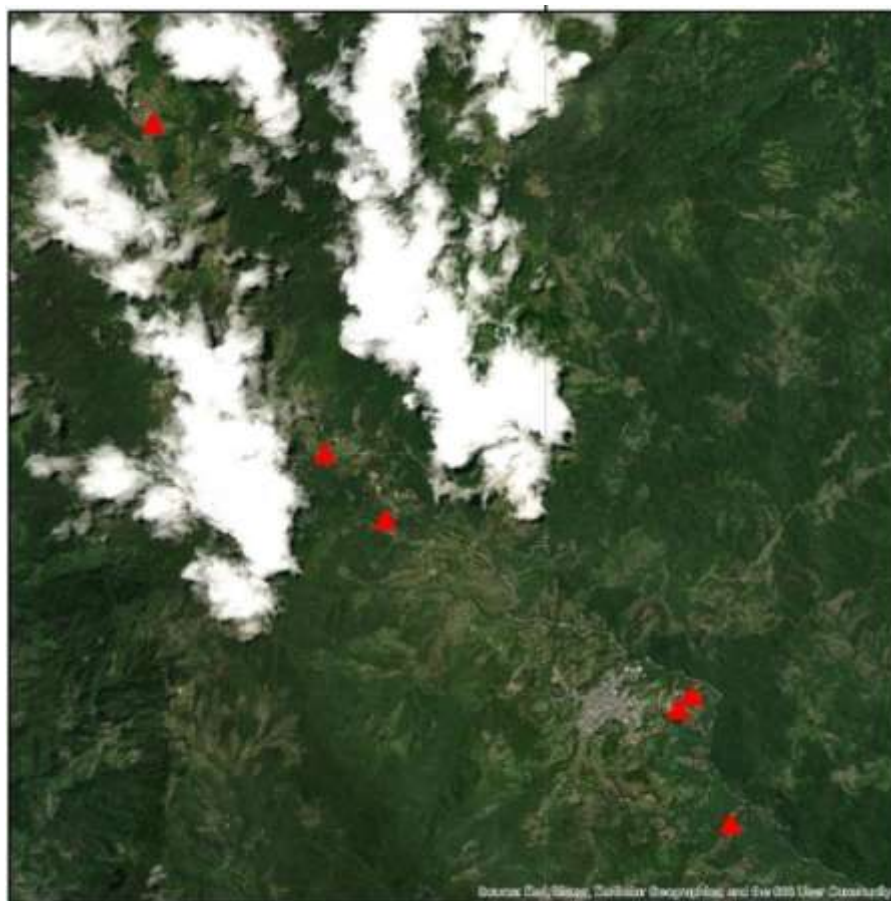
Imagen 35. Ubicación de zonas de voladura en el municipio de San Luis  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

Para dar atención a la emergencia por parte de la administración municipal se solicitó apoyo para las operaciones de corte y fragmentación al Ejército Nacional de Colombia, pero dada la cercanía a la celebración de la semana mayor y dada la programación y atención de los corredores de seguridad vial desarrollados por esta entidad, la voladura podía ser desarrollada al finalizar la Semana Santa, razón por la que la administración realiza la contratación con una empresa de voladura privada de la ciudad de Medellín.

Dadas las condiciones de movilidad que se anticipaba se desarrollarían en este corredor vial, a fin de comunicar los turistas con diferentes zonas de la región, entre el domingo 10 de abril y el sábado 16 de abril, dada la celebración de la Semana Santa, las administraciones municipales de estos municipios se ven en la necesidad de contactar y contratar los servicios de una empresa privada para el desarrollo de la voladura, a fin de dar movilidad a la zona en este corredor de manera oportuna, en donde en coordinación con la empresa «Voladura Demolición y Perforación 3JY» de la ciudad de Medellín - Antioquia se realiza la voladura el día 8 de abril de 2022, la voladura de corte y/o fragmentación se realiza a tres (3) Bloques para el posterior manejo de los productos generados del corte y/o fragmentación, por medio de maquinaria amarilla y se realiza despeje de la vía, los puntos donde se desarrollaron las labores de voladura se localizaron en: punto 1 N 6°01'51.1" y W 74°58'52.7"; punto 2 N 6°03'42.2" y W 75°00'58.5"; punto 3 N 6°04'06.2" y W 75°01'20.5" Y Punto 4 N 6°01'51.1" y W 74°58'52.7"

Se resalta que esta vía de carácter terciario es crucial para la movilidad en la región, porque de esta depende la movilidad de personas, desde las veredas asociadas a este corredor, así como insumos y productos agrícolas desde las veredas ubicadas al oriente del municipio de Marinilla, además de ser un importante corredor para la movilidad de vehículos livianos durante los periodos vacacionales, dado que desde este punto se da la interconexión con la ciudad de Medellín y conecta con diversos atractivos turísticos en la región, razón por la que se vería afectado este sector, donde el cierre de esta vía presentaría grandes afectaciones a las familias que derivan su sustento del turismo y los servicios anexos a la vía, además de afectar familias campesinas por la pérdida de productos agrícolas perecederos a causa del represamiento de estos ante un cierre prolongado.

La Imagen 36. Ubicación de los puntos de deslizamiento en el municipio de San Luis, muestran los puntos de deslizamiento que afectaron la vía que comunica los municipios de San Luis y Marinilla con la ciudad de Medellín, durante el inicio de la ola invernal, se resalta durante la inspección realizada por los ingenieros de la secretaria de obras públicas de municipio y el cuerpo técnico de la empresa «Voladura Demolición y Perforación 3JY», se determinó que el bloque de roca que se encuentra al sur, no requería manejo con explosivo, es decir bloque que se ubica en el punto suroriental de la imagen, bloque que fue removido con maquinaria amarilla, por otra parte, los otros tres (3) puntos requirió el uso de explosivos.



*Imagen 36. Ubicación de los puntos de deslizamiento en el municipio de San Luis*  
*Fuente: Google. (s.f.). [Imagen del municipio de San Vicente del Caguán – departamento del Caquetá].*  
*Recuperado de*  
*[[https://www.google.com/maps/place/San+Vicente+Del+Cagu%C3%A1n,+Caquet%C3%A1/@2.1822489,-74.9656635,53026m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e23432f597e31f1:0xaaef5177d388e8ac!8m2!3d2.1136446!4d-74.7732056!16s%2Fm%2F02qrhs?entry=ttu&g\\_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/San+Vicente+Del+Cagu%C3%A1n,+Caquet%C3%A1/@2.1822489,-74.9656635,53026m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e23432f597e31f1:0xaaef5177d388e8ac!8m2!3d2.1136446!4d-74.7732056!16s%2Fm%2F02qrhs?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wKXMDSoASAFQAw%3D%3D)].*  
*Modificado: El autor (2025).*

La zona donde se realizaron las voladuras de corte y/o fragmentación en sus características de relieve, presenta de manera general medias a altas pendientes, en donde se resalta que el área a

nivel geológico se encuentra sobre el denominado Batolito Antioqueño y los materiales deslizados se identificaron como rocas ígneas, destacándose la presencia de granodioritas, tonalitas y cuarzodioritas, en donde los bloques a los cuales se les realizó el proceso de voladura se identificaron como bloques de tonalita, esta clasificación se realizó mediante inspección visual.

La Tabla 43. Clasificación de bloques sobre la vía que comunica el municipio de San Luis y Marinilla – Antioquia. Muestra la clasificación de bloques establecida a partir de muestra de mano e inspección visual del bloque.

TIPO DE ROCA		PESO ESPECIFICO (t/m <sup>3</sup> )	TAMAÑO DE GRANO (mm)	FACTOR DE ESPONJAMIENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)
Ígnea	Tonalita	2,7	0,2 -2 0,2***	1,5	200 – 350* 220**

Tabla 43. Clasificación de bloques sobre la vía que comunica el municipio de San Luis y Marinilla – Antioquia.

\* Resistencia a la compresión (MPa) Teórica

\*\* Resistencia a la compresión (MPa) Medida en Campo.

\*\*\* Medición en campo

Fuente: El autor (Elaboración propia). 2025.



Fotografía 50. Bloque que obstruye la vía entre los municipios de San Luis y Marinilla – Antioquia  
Fuente: Voladura Demolición y Perforación 3JY (2022)



Fotografía 51. Corte y/o fragmentación de bloque  
Fuente: El autor (2022)

La Fotografía 50. Bloque que obstruye la vía entre los municipios de San Luis y Marinilla La Fotografía 51. Corte y/o fragmentación de bloque, se muestra el momento de la detonación:

– Antioquia: se muestra el bloque de roca en donde la generación de gases que al expandirse a alta velocidad generan la fragmentación y/o corte del bloque de roca, además el color de los gases demuestra que hubo combustión con un correcto balance de oxígeno, lo que generó una voladura adecuada, la técnica de voladura implementada en este caso fue una voladura secundaria a cielo abierto tipo cachorro



*Fotografía 52. Resultados de la fragmentación del bloque de roca N. 01 municipio de San Luis  
Fuente: Voladura Demolición y Perforación 3JY  
(2022)*

La Fotografía 52. Resultados de la fragmentación del bloque de roca N. 01 municipio de San Luis: se muestran los resultados de la voladura de corte y/o fragmentación del primer bloque, el cual se encontraba a un costado de la carretera imposibilitando el paso de los vehículos por esta vía, la fragmentación se desarrolla con el fin de facilitar el posterior manejo y retiro de bloques de menor tamaño con maquinaria amarilla.



*Fotografía 53. Resultados de la fragmentación del Bloque de roca N. 02 municipio de San Luis  
Fuente: Voladura Demolición y Perforación 3JY (2022)*

La Fotografía 53. Resultados de la fragmentación del Bloque de roca N. 02 municipio de San Luis: se muestran los resultados de la voladura de fragmentación del segundo bloque, el cual se encontraba reposando hacia la parte media de la carretera imposibilitando el paso de vehículos por esta vía, la fragmentación se desarrolla con el fin de facilitar el posterior manejo y retiro de bloques de menor tamaño con maquinaria amarilla.



*Fotografía 54. Resultados de la fragmentación del Bloque de roca N. 03 municipio de San Luis  
Fuente: Voladura Demolición y Perforación 3JY (2022)*

La Fotografía 54. Resultados de la fragmentación del Bloque de roca N. 03 municipio de San Luis: se muestran los resultados de la voladura de fragmentación del tercer bloque, el cual se encontraba a un costado de la carretera en estado de pseudo estabilidad, pero al estar en una curva en zona alta, en amenaza de colapsar sobre la vía, la administración opto por el manejo con explosivos, ya que este bloque generaba una amenaza potencial de nuevo cierre por la posterior caída del bloque, la fragmentación se desarrolla con el fin de facilitar el posterior manejo y retiro de bloques de menor tamaño con maquinaria amarilla.

Para este caso el manejo de los fragmentos resultado de la voladura de corte y fragmentación, parte de los fragmentos fueron dispuestos en un tambor de trituración y posteriormente al proceso de

triturado se dispuso el material a los lados de la vía, desde donde fueron llevados a diversos sectores de la vía, para ser dispuestos en esta como parte de material de relleno y afirmado, usado en los bordes de la vía, en las áreas que presentan problemas de hundimiento, a los que se realiza el relleno y dar reparación y estabilidad en estos sectores, por otra parte, los fragmentos que no fueron triturados se procede por parte de algunos habitantes del sector a realizar el proceso de rotura con herramientas de mano y se disponen en los bordes de la vía.

#### **5.6.1. Análisis de caso N. 6. Vía San Luis – Marinilla – Medellín (Antioquia)**

Tres (3) bloques de Tonalita de 13 m<sup>3</sup>, clasificados como muy resistente a extremos, con una resistencia a la compresión simple de 220 MPa, para la fragmentación de este bloque se usaron un total de 6,43 kg de ANFO, lo que equivale a aproximadamente 492,3 gr/m<sup>3</sup> de ANFO, lo que es una cantidad de explosivo promedio, lo que indica que el proceso de fragmentación tuvo una eficiencia adecuada, dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre 500 gr/m<sup>3</sup> a 1600 gr/m<sup>3</sup>, al encontrarse en un estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantiza la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favorece el desarrollo de fragmentación por procesos de tracción, además indica que en el bloque no presenta redes asociadas a fracturas preexistentes, ni planos de debilidad, ni zonas de alta porosidad o alta alteración, lo que ha facilitado la fragmentación del bloque, al permitir la confinación del gas en que genera la fragmentación del bloque por tracción, requiriendo una cantidad de explosivo baja.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa una voladura más eficiente y menos costosa, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente 3.8 MJ/kg, por lo que se presenta una eficiencia energética dentro del promedio, dado se utiliza en promedio 0,4923 kg/m<sup>3</sup> de ANFO, la energía aplicada durante la voladura fue eficiente (1,87 MJ/m<sup>3</sup>), lo cual está dentro de los parámetros de consumo promedio por lo que se cataloga como una fragmentación eficiente, considerando la dureza de la roca.

La Tabla 44. Resumen caso de validación de voladura N. 6. Vía San Luis – Marinilla – Medellín (Antioquia). Muestra las características generales de la voladura, el número de bloques intervenidos y fragmentados durante la operación, tipo y clasificación de los bloques de roca, tamaño de cada uno de los bloques, peso específico del cada uno de los bloques, peso total aproximado de cada uno de los bloques, tamaño promedio del grano que componen el bloque, factor de esponjamiento, resistencia a la compresión y cantidad de explosivo usado (ANFO)

Tipo de roca	Roca	Bloque	Tamaño del bloque (m <sup>3</sup> )	Peso específico (tn/m <sup>3</sup> )	Peso total aprox. Bloque (Tn)	Tamaño de grano (mm)	Factor de esponjamiento	Resistencia a la compresión (MPa)	Explosivo usado (gr)
Ígnea	Tonalita	1	4	2,5	10	1	1,5	220	1970
		2	5	2,5	12,5	1	1,5	220	2460
		3	4	2,5	10	1	1,5	220	1970

*Tabla 44. Resumen caso de validación de voladura N. 6. Vía San Luis – Marinilla – Medellín (Antioquia)  
Fuente: El autor (Elaboración propia). 2025.*

### 5.7. Caso de validación de voladura N. 7. Alcantarillado de San Luis - Antioquia

Este caso de voladura de corte y/o fragmentación fue desarrollado durante los días 18 y 19 de abril de 2017, en el municipio de San Luis departamento de Antioquia, en donde la secretaria de obras públicas del municipio adelantaba obras asociadas a la ampliación del sistema de alcantarillado rural y en proceso de excavación de zanjas para el emplazamiento de la tubería correspondiente al sistema de Alcantarillado para el manejo y disposición de aguas residuales del casco urbano del municipio, la obra se ve detenida y afectada, dado que el trazado se ve interrumpido por la presencia de grandes bloques de roca, en las zanjas, lo que imposibilitó, el avance de las obras y la ubicación respectiva de la tubería, ante la imposibilidad de extracción de los bloques de roca por medio de maquinaria amarilla, su fragmentación por métodos manuales o hidráulicos, o cambios en el diseño o replanteo de las zanjas, la secretaria municipal de obras públicas delega la empresa «Voladura Demolición y Perforación 3JY» de la ciudad de Medellín – Antioquia, para realizar el corte y/o fragmentación de los bloques de roca ubicados al interior de las zanjas del paso de la tubería de conducción para el transporte y disposición final de las aguas servidas del casco urbano municipal.

La Imagen 37. Ubicación de las zonas de voladura en el municipio de San Luis - Antioquia, muestra la ubicación de los puntos de voladura de corte y/o fragmentación, en las zanjas para la ampliación del sistema de alcantarillado municipal.

Las voladuras de corte y/o fragmentaciones realizadas en la zanja para la ampliación del sistema de alcantarillado municipal, se realizaron en dos (2) corredores cuyos puntos se encuentran localizados en las coordenadas: punto 1 N 6° 02' 33.0" y W 74° 59' 11.6" y punto 2 N 6° 02' 37.9" y W 74° 59' 06.6"



Imagen 37. Ubicación de las zonas de voladura en el municipio de San Luis - Antioquia  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

Se destaca en la fotografía que el casco urbano del municipio presenta pendientes bajas, correspondiendo a una zona plana elevada, donde la zona rural aledaña presenta pendientes medias, altas y muy altas, resaltando que la zona de intervención se localiza a las afueras del casco urbano al oriente de este en donde se presentan pendientes medias a altas, correspondiente en el

diseño al tramo de conducción de aguas servidas a la zona de disposición final, según los reportes de la secretaria de obras públicas municipal, las zanjas presentan profundidades que van desde los 120 cm a los 280 cm de profundidad, y dadas las condiciones topográficas se imposibilita un cambio en los diseños.

La Fotografía 55. Municipio de San Luis – Antioquia: nos muestra las características generales del relieve en el que se localiza el casco urbano del municipio. Se evidencia una zona plana correspondiente a un coluvión y los alrededores del mismo medias, altas y muy altas pendientes.



*Fotografía 55. Municipio de San Luis – Antioquia  
Fuente: Diarioriente (2021)*

En este caso los bloques se encuentran sobre depósitos con consolidados correspondientes a un coluvión y en zonas que presentan alta alteración de tipo saprolito de rocas ígneas, los cuales se caracterizan por mostrar un alto grado de descomposición física y química del material parental correspondiente a rocas ígneas, la cual se han transformado hasta convertirse en suelos de tipo residual, con un alto contenido de limos y arcillas micáceas de una coloración café amarillenta a rojiza con motas blancas; en estos suelos ya se ha perdido la textura y la estructura de la roca original, esta clasificación es realizada por el autor a partir de inspección visual de muestras.

La Imagen 38. Ubicación de los puntos de voladura en zanjas en el municipio de San Luis, muestra los puntos de voladura en la zanja sobre una imagen de satélite tipo Landsat.



*Imagen 38. Ubicación de los puntos de voladura en zanjas en el municipio de San Luis*  
*Fuente: Google. (s.f.). [Imagen del municipio de San Luis – departamento de Antioquia].*

*Recuperado de [[https://www.google.com/maps/place/San+Lu%C3%ADs,+Antioquia/@6.0593649,-75.0112935,6596m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e46ad6bc4404165:0xecd0f01ef96f2464!8m2!3d6.0432523!4d-74.9945045!16zL20vMDdrNG00?entry=ttu&q\\_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wLkXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/San+Lu%C3%ADs,+Antioquia/@6.0593649,-75.0112935,6596m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x8e46ad6bc4404165:0xecd0f01ef96f2464!8m2!3d6.0432523!4d-74.9945045!16zL20vMDdrNG00?entry=ttu&q_ep=EgoyMDI1MDcxMy4wLkXMDSoASAFQAw%3D%3D)].*

*Modificado: El autor (2025).*

La Fotografía 56. Bloque de tonalita fragmentado: muestra los resultados del corte y/o la fragmentación, en donde se muestra el resultado de la voladura del bloque dentro de la zanja, en donde se evidencian los resultados de la voladura, es de resaltar que posterior a la voladura a algunos fragmentos se les realizó manejo con herramienta manual para su disposición fuera de la zanja.

La Fotografía 57. Zanja con bloque de tonalita fragmentados: se muestran los fragmentos del bloque resultado de la voladura de corte y/o fragmentación a lo largo de la zanja que fue objeto de intervención con explosivo.



*Fotografía 56. Bloque de tonalita fragmentado*  
*Fuente: Voladura Demolición y Perforación 3JY (2017)*



*Fotografía 57. Zanja con bloque de tonalita fragmentados*  
*Fuente: Voladura Demolición y Perforación 3JY (2017)*

A continuación, se presentan tablas de resumen de las características de evaluación de los bloques a volar y la tabla de requerimientos de la voladura, las cuales reúnen parámetros fundamentales en la evaluación de una voladura.

La Tabla 46. Parámetros de evaluación de bloques, muestra el número de bloques objeto de voladura, destacando el departamento y municipio donde se realizó la operación, así como el tipo de roca de acuerdo a la caracterización realizada y dimensiones del mismo al igual que parámetros propios de la operación de corte y/o fragmentación.

La -Tabla 47. Predicción de fragmentación y requerimientos, muestra los requerimientos de insumos de explosivo y accesorios requeridos para la voladura en cada uno de los bloques, acorde a su tamaño.

### 5.7.1. Análisis de caso N. 7. Alcantarillado de San Luis - Antioquia

Dos (2) bloques de Tonalita de 7 m<sup>3</sup>, clasificados como muy resistente a extremos, con una resistencia a la compresión simple de 220 MPa, para la fragmentación de este bloque se usaron un total de 3,5 kg de ANFO, lo que equivale a aproximadamente 500 gr/m<sup>3</sup> de ANFO, lo que es una cantidad de explosivo promedio, lo que indica que el proceso de fragmentación tuvo una eficiencia adecuada, dado que la cantidad de explosivo usado típicamente en este tipo de rocas está entre 500 gr/m<sup>3</sup> a 1600 gr/m<sup>3</sup>, al encontrarse en un estado de no alteración, permitiendo un mejor confinamiento de los gases, de estos resultados se establece que al ser una perforación secundaria tipo cachorro, la perforación en el centro de gravedad del bloque fue bien establecida, lo que garantiza la adecuada ubicación de cargas y un correcto proceso de confinamiento, permitiendo la correcta compresión y rápida expansión de los gases, lo que favorece el desarrollo de fragmentación por procesos de tracción, además indica que en el bloque no presenta redes asociadas a fracturas preexistentes, ni planos de debilidad, ni zonas de alta porosidad o alta alteración, lo que ha facilitado la fragmentación del bloque, al permitir la confinación del gas en que genera la fragmentación del bloque por tracción, requiriendo una cantidad de explosivo dentro del promedio.

En general, menos explosivo por metro cúbico significa una voladura más eficiente y menos costosa, el ANFO tiene una energía explosiva de aproximadamente 3.8 MJ/kg, por lo que se presenta una eficiencia energética dentro del promedio, dado se utiliza en promedio 0,50 kg/m<sup>3</sup> de ANFO, la energía aplicada durante la voladura fue eficiente (1,9 MJ/m<sup>3</sup>), lo cual está dentro de los parámetros de consumo promedio por lo que se cataloga como una fragmentación eficiente, considerando la dureza de la roca.

La Tabla 45. Resumen caso de validación de voladura N. 7. Alcantarillado de San Luis - Antioquia. Muestra las características generales de la voladura, el número de bloques intervenidos y fragmentados durante la operación, tipo y clasificación de los bloques de roca, tamaño de cada uno de los bloques, peso específico del cada uno de los bloques, peso total aproximado de cada uno de los bloques, tamaño promedio del grano que componen el bloque, factor de esponjamiento, resistencia a la compresión y cantidad de explosivo usado (ANFO)

Tipo de roca	Roca	Bloque	Tamaño del bloque (m <sup>3</sup> )	Peso específico (tn/m <sup>3</sup> )	Peso total aprox. Bloque (Tn)	Tamaño de grano (mm)	Factor de esponjamiento	Resistencia a la compresión (MPa)	Explosivo usado (Kg)
Ígnea	Tonalita	1	3	2,5	7,5	1	1,5	220	1500
		2	4	2,5	10	1	1,5	220	2000

*Tabla 45. Resumen caso de validación de voladura N. 7. Alcantarillado de San Luis - Antioquia  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).*

La Tabla 46. Parámetros de evaluación de bloques, muestra parámetros como el Tipo de roca, clasificación de la Roca, numero de Bloques, Tamaño del bloque (m<sup>3</sup>), Peso específico (tn/m<sup>3</sup>), Peso total aproximado del Bloque (Tn), Tamaño de grano (mm), Factor de esponjamiento, Resistencia a la compresión (MPa) y Peso total material fragmentado (Tn), valores que son evaluados antes de cada voladura, para los 40 casos desarrollados en los departamentos de Tolima, Caquetá, Meta y Antioquia.

La -Tabla 47. Predicción de fragmentación y requerimientos, muestra lugar de la voladura (Departamento y Municipio), Tipo de roca, Clasificación de la Roca, numero de Bloques, Volumen aproximado antes de voladura (m<sup>3</sup>), Volumen total aproximado Postvoladura, Volumen aproximado del Bloque Postvoladura, numero de Detonadores eléctricos usados por bloque, Metros de cordón de 12 gramos y ANFO requerido en la fragmentación.

Tabla 46. Parámetros de evaluación de bloques  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

N. de bloque	Caso	Departamento	Municipio	Tipo de roca	Roca	Bloque	Tamaño del bloque (m <sup>2</sup> )	Peso específico (tn/m <sup>3</sup> )	Peso total aprox. Bloque (Tn)	Tamaño de grano (mm)	Factor de esponjamiento	Resistencia a la compresión (MPa)	Peso total material fragmentado (Tn)
1	1	Tolima	Ibagué	Ígnea	Esquisto	1	8	2,7	21,6	0,6	1,6	210	78,3
2						10	2,7	27	0,6	1,6	210		
3						11	2,7	29,7	0,6	1,6	210		
4	2	Caquetá	San Vicente del Caguán	Metamórfica	Cuarcita	1	8	2,3	18,4	0,3	1,5	260	55,2
5						16	2,3	36,8	0,3	1,5	260		
6	3	Caquetá	Florencia	Sedimentaria	Arenisca	1	11	2,5	27,5	0,3	1,5	195	67,5
7						16	2,5	40	0,3	1,5	195		
8	4	Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Arenisca	1	9	2,5	22,5	0,3	1,5	210	22,5
9	5	Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Arenisca calcárea	1	14	2,6	36,4	1	1,55	200	1124
10						2	19	2,6	49,4	1	1,55	200	
11						3	21	2,6	54,6	1	1,55	200	
12						4	14	2,6	36,4	1	1,55	200	
13						5	14	2,6	36,4	1	1,55	200	
14						6	9	2,6	23,4	1	1,55	200	
15						7	18	2,6	46,8	1	1,55	200	
16						8	27	2,6	70,2	1	1,55	200	
17						9	16	2,6	41,6	1	1,55	200	
18	5	Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Arenisca	10	9	2,5	22,5	0,3	1,5	160	
19						11	30	2,5	75	0,4	1,5	200	
20						12	20	2,5	50	0,3	1,5	210	
21						13	30	2,5	75	0,4	1,5	220	
22						14	8	2,5	20	0,4	1,5	200	

23						15	23	2,5	57,5	0,5	1,5	190	
24						16	8	2,5	20	0,3	1,5	200	
25	5	Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Cuarzoarenitas	17	12	2,5	30	0,4	1,5	240	
26						18	8	2,5	20	0,4	1,5	240	
27						19	19	2,5	47,5	0,4	1,5	240	
28						20	10	2,5	25	0,4	1,5	240	
29						21	14	2,5	35	0,4	1,5	240	
30						22	15	2,5	37,5	0,4	1,5	240	
31						23	11	2,5	27,5	0,4	1,5	240	
32	5	Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Calizas	24	21	2,7	56,7	1	1,55	190	
33						25	28	2,7	75,6	1	1,55	190	
34						26	10	2,7	27	1	1,55	190	
35						27	10	2,7	27	1	1,55	190	
36	6	Antioquia	San Luis	Ígnea	Tonalita	1	4	2,5	10	1	1,5	220	32,5
37						2	5	2,5	12,5	1	1,5	220	
38						3	4	2,5	10	1	1,5	220	
39	7	Antioquia	San Luis	Ígnea	Tonalita	1	3	2,5	7,5	1	1,5	220	
40						2	4	2,5	10	1	1,5	220	

-Tabla 47. Predicción de fragmentación y requerimientos  
Fuente: El autor (Elaboración propia). 2025.

N. De bloque	Caso	Departamento	Municipio	Tipo de roca	Roca	Bloque	Volumen aprox. Antes de voladura (m3)	Volumen total aprox. Postvoladura	Volumen aprox. Bloque Postvoladura	Detonadores eléctricos (bloque)	Metros de cordón de 12 gramos (bloque)	ANFO (kg) (bloque)	Total detonadores eléctricos	Total metros de cordón de 12 gramos	Total anfo (kg)
1	1	Tolima	Ibagué	Ígnea	Esquisto	1	29	13	46	6	48	3	26	174	10
2						16		8		60	3				
3						18		9		66	4				
4	2	Caquetá	San Vicente del Caguán	Metamórfica	Cuarcita	1	24	12	36	6	48	3	21	144	8
5						24		13		96	5				
6	3	Caquetá	Florencia	Sedimentaria	Arenisca	1	27	17	41	9	66	4	24	162	9
7						24		13		96	5				
8	4	Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Arenisca	1	9	14	14	7	54	3	8	54	3
9	5	Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Arenisca calcárea	1	438	22	668	11	84	5	407	2628	146
10						2	29	15	114	6					
11						3	33	17	126	7					
12						4	22	11	84	5					
13						5	22	11	84	5					
14						6	14	7	54	3					
15						7	28	14	108	6					
16						8	42	22	162	9					
17						9	25	13	96	5					
18	5	Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Arenisca	10		14		7	54	3			
19						11		45		24	180	10			
20						12		30		16	120	7			
21						13		45		24	180	10			
22						14		12		6	48	3			

23						15		35		18	138	8			
24						16		12		6	48	3			
25	5	Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Cuarzoarenitas	17		18		10	72	4			
26						18		12		6	48	3			
27						19		29		15	114	6			
28						20		15		8	60	3			
29						21		21		11	84	5			
30						22		23		12	90	5			
31						23		17		9	66	4			
32	5	Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Calizas	24		33		17	126	7			
33						25		43		22	168	9			
34						26		16		8	60	3			
35						27		16		8	60	3			
36	6	Antioquia	San Luis	Igneas	Tonalita	1	13	6	20	3	24	1	13	78	4
37						2		8		4	30	2			
38						3		6		3	24	1			
39	7	Antioquia	San Luis	Igneas	Tonalita	1	7	5	11	2	18	1	8	42	2
40						2		6		3	24	1			

# CAPÍTULO 6

## PROPUESTA DE PROTOCOLO

El desarrollo de las obras civiles y las actividades mineras referentes al desarrollo de voladuras requieren el uso de explosivos, elemento fundamental por sus características físico-químicas, lo que permite la fragmentación de la roca de manera rápida y dirigida, controlando de manera efectiva la energía distribuyéndola en tiempo y espacio, por otra parte, esta técnica se ha asociado a una serie de impactos destacando vibraciones y ruido los que presuntamente afecta las zonas cercanas a la voladura, en donde se presume una supuesta relación causa - efecto entre el uso de explosivos y la generación de vibraciones, aspectos que se han mitificado desde factores como el desconocimiento de las propiedades del insumo, la técnica y los procesos de control asociados a esta temática.

### **6.1. Aspectos Normativos**

En el aspecto de normativo respecto a las medidas de seguridad industrial e higiene laboral, ante la ausencia de normatividad en el país, la fabricación, comercialización, transporte de estos agentes explosivos es controlado y supervisado por el Ejército Nacional de Colombia, y en cuanto a su adecuado uso se ha establecido de manera generalizada la aplicación de normas internacionales por parte de las empresas, que manipulan explosivos, en donde la elección de la norma adoptada recae en las características de la actividad desarrollada y en que se usara el agente explosivo.

Por esta razón la propuesta está centrada y tiene en cuenta las necesidades de cada uno de los procesos y etapas requeridas en la operación de voladuras de tipo secundaria, objeto de estudio en este caso de estudio y que a su vez es el proceso a implementar en el corte y/o fragmentación de bloques de roca y sobretamaños, en actividades de mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura, en donde a su vez fue necesario tener conocimiento y analizar los reglamentos enunciados a continuación:

La Tabla 48. Normatividad asociada a la seguridad y salud en el trabajo, mostrando el conjunto de medidas y acciones legales de tipo preventivo destinadas a proteger la salud y la integridad física de los trabajadores en un entorno laboral donde se realiza la manipulación de explosivos.

INSTITUCIÓN/TEMA	MARCO LEGAL
SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO	<p><b>Código Sustantivo Del Trabajo.</b></p> <p><b>Decreto 1072 De 2015.</b> Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo.</p> <p><b>Resolución 0312 de 2019.</b> Por la cual se definen los estándares mínimos del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo.</p> <p><b>Decreto 1496 de 2018.</b> Por el cual se adopta el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos y se dictan otras disposiciones en materia de seguridad química.</p> <p><b>Resolución 2400 de 1979.</b> Por la cual se establecen algunas disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo.</p> <p><b>Decreto 2090 de 2003.</b> Por la cual se definen las actividades de alto riesgo para la salud del trabajador y se modifican y señalan las condiciones, requisitos y beneficios del régimen de pensiones de los trabajadores que laboran en dichas actividades. Artículo 1 y 2.</p> <p><b>Decreto 2222 de 1993.</b> Reglamento de Salud Ocupacional en Labores Mineras a Cielo Abierto.</p>

*Tabla 48. Normatividad asociada a la seguridad y salud en el trabajo  
Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

La Tabla 49. Normatividad asociada a la gestión del riesgo de desastres, muestra la legislación mediante la cual se intenta integrar el uso de explosivos a un proceso sistemático que busca identificar, evaluar y mitigar los riesgos potenciales que puedan afectar las condiciones del entorno cuando se realizan operaciones con explosivos.

INSTITUCIÓN/TEMA	MARCO LEGAL
GESTIÓN DEL RIESGO	<p><b>Ley 1523 de 2012.</b> Por la cual se adopta la política Nacional de Gestión del Riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de desastres.</p>

*Tabla 49. Normatividad asociada a la gestión del riesgo de desastres  
Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

La Tabla 50. Normatividad asociada al almacenamiento y uso de explosivos, donde se establece la normatividad mediante la que se establece la disposición y organización del explosivo, bajo reglas de información, especificaciones de conservación, custodia y procesos de entrega para su posterior uso o disposición

INSTITUCIÓN/TEMA	MARCO LEGAL
ALMACENAMIENTO Y USO DE EXPLOSIVOS	<b>Decreto 1886 de 2015.</b> Por la cual se establece el reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas. <b>Decreto 0944 de 2022 modifica</b> <b>Decreto 0539 de 2022.</b> Por el cual se expide el reglamento de higiene y seguridad en las labores mineras a cielo abierto.

*Tabla 50. Normatividad asociada al almacenamiento y uso de explosivos  
Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

La Tabla 51. Normatividad asociada a la adquisición de explosivos, muestra la normatividad que rige el proceso para el trámite de obtención de permisos y adquisición de material explosivo en Colombia.

INSTITUCIÓN/TEMA	MARCO LEGAL
ADQUISICIÓN DE EXPLOSIVOS	<b>Decreto 2535 de 1993.</b> Por medio del cual se expiden normas sobre armas, municiones y explosivos. <b>Decreto 1809 de 1994.</b> Reglamento el decreto 2535 de 1993. <b>Decreto 334 de 2002.</b> Por el cual se establecen normas en materia de explosivos

*Tabla 51. Normatividad asociada a la adquisición de explosivos  
Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

La Tabla 52. Normatividad asociada al transporte de explosivos, muestra el conjunto normas que regulan la actividad del transporte terrestre de explosivos, con lo que se busca garantizar la seguridad de las personas, la seguridad vial, la protección del ambiente, la eficiencia en la prestación del servicio y la protección y seguridad del insumo.

INSTITUCIÓN/TEMA	MARCO LEGAL
TRANSPORTE DE EXPLOSIVOS	<b>Decreto 1079 de 2015.</b> Decreto Único Reglamentario del Sector Transporte. <b>Decreto 1609 de 2002 .</b> Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera. <b>Decreto 2535 de 1993.</b> Por medio del cual se expiden normas sobre armas, municiones y explosivos. <b>Decreto 334 de 2002.</b> Por el cual se establecen normas en materia de explosivos. <b>Resolución 1223 de 2014</b> del Ministerio de Transporte - Requisitos del curso básico obligatorio de capacitación para los conductores de vehículos de carga que transportan mercancías peligrosas

*Tabla 52. Normatividad asociada al transporte de explosivos  
Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

La Tabla 53. Normatividad asociada a las disposiciones del Ministerio de Minas y Energía - MINENERGIA en el tema de explosivos, muestra los instrumentos jurídicos que rigen el uso de explosivos de manera general en sector minero-energético del país.

INSTITUCIÓN/TEMA	MARCO LEGAL
MINENERGIA	<p><b>Decreto No 035 de 1994.</b> Disposiciones en materia de seguridad minera, medidas y procedimientos de aplicación.</p> <p><b>Ley 685 de 2001.</b> Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones</p> <p><b>Ley 1382 de 2010.</b> Modificación de la Ley 685 de 2001.</p> <p><b>Decreto 1335 de 1987.</b> Reglamento de seguridad en labores subterráneas.</p> <p><b>Resolución 180398.</b> del Ministerio de Minas y Energía, del 7 de abril de 2004.</p> <p>Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE</p>

*Tabla 53. Normatividad asociada a las disposiciones del Ministerio de Minas y Energía - MINENERGIA en el tema de explosivos*

*Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

La Tabla 54. Normatividad asociada a las disposiciones de la Agencia Nacional de Minería ANM en el tema de explosivos, muestra las disposiciones que regulan la actividad minera en el país, así como las funciones y actuaciones de la propia ANM en relación con la administración y aprovechamiento de los recursos minerales del Estado, en donde se debe usar explosivo para su extracción.

INSTITUCIÓN/TEMA	MARCO LEGAL
ANM	<p><b>Resolución 428 de 2013,</b> términos de referencia para elaborar PTO.</p> <p><b>Resolución 40599 del 27</b> de mayo de 2015 . Adopta el glosario técnico minero</p>

*Tabla 54. Normatividad asociada a las disposiciones de la Agencia Nacional de Minería ANM en el tema de explosivos*

*Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

La Tabla 55. Normatividad asociada a la Escuela de Ingenieros Militares ESING en el tema de explosivos, muestra la resolución que rige la adquisición del certificado para uso de explosivos en Colombia.

INSTITUCIÓN/TEMA	MARCO LEGAL
ESING	<p><b>Resolución Rectoral No. 008 de 2012 o Sustituya.</b> Normas para la expedición del certificado de manejo básico y elemental de explosivos en minería y obras civiles</p>

*Tabla 55. Normatividad asociada a la Escuela de Ingenieros Militares ESING en el tema de explosivos*

*Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

La Tabla 56. Normatividad asociada a Departamento Control Comercio de Armas -DCCA en el tema de explosivos, muestra las normas por las que se establece el control total de los explosivos en Colombia por parte del Ejercito Nacional de Colombia.

INSTITUCIÓN/TEMA	MARCO LEGAL
DCCA	<p><b>Decreto 2535 de 1993.</b> Normas sobre armas, municiones y explosivos.</p> <p><b>Decreto 334 de 2002.</b> Por la cual se establecen normas en materia de explosivos. Ejerce control sobre todas las personas naturales o jurídicas nacionales o extranjeras de derecho privado o público que importen, produzcan, comercialicen, distribuyan, almacenen, transporten, usen o vendan productos o insumos o materias primas que sin serlo individualmente, en conjunto, conforman sustancias explosivas y sobre los elementos que sin serlo de manera original, mediante un proceso pueden transformarse en explosivos</p> <p><b>Decreto 1070 de 2015.</b> Por la cual se expide el Decreto único reglamentario del sector administrativo de defensa</p> <p><b>Ley 1119 de 2006.</b> Por el cual se actualizan los registros y permisos vencidos para el control al porte y tenencia de las armas de fuego y se dictan otras disposiciones. (Tramites explosivos)</p> <p><b>Decretos 2535 de 1993.</b> Por el cual se expiden normas sobre armas, municiones y explosivos</p>

*Tabla 56. Normatividad asociada a Departamento Control Comercio de Armas -DCCA en el tema de explosivos.  
Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

Tabla 57. Normatividad asociada a la Industria Militar Colombiana - INDUMIL en el tema de explosivos, muestra el conjunto de disposiciones legales mediante las que los civiles y empresas pueden adquirir y manipular explosivo dependiendo de su actividad.

INSTITUCIÓN/TEMA	MARCO LEGAL
INDUMIL	<p><b>Resolución 081 de 2002.</b> De la Industria Militar establece las materias primas o insumos que sin ser explosivos individualmente, en conjunto conforman una sustancia explosiva, teniendo en cuenta que en su comunicación no indica las materias primas que se importan, este acto administrativo, además informa sobre los trámites que se deberá realizar para la inscripción ante el Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE.</p> <p><b>IM FE GIN IF 021 –Informativo.</b> Aspectos técnicos para el almacenamiento de explosivos.</p> <p><b>IM FE DVP PR 005 -</b> Procedimiento de destrucción de explosivos comerciales</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fichas de características técnicas de los explosivos que fabrica INDUMIL.</li> <li>• Fichas de almacenamiento de los explosivos que fabrica INDUMIL</li> <li>• Hojas de seguridad de los de los explosivos que fabrica INDUMIL.</li> <li>• Instructivos de uso de los explosivos que fabrica INDUMIL</li> </ul>
--	--

*Tabla 57. Normatividad asociada a la Industria Militar Colombiana - INDUMIL en el tema de explosivos  
Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

La Tabla 58. Normatividad asociada a la capacitación dada por el SENA en el tema de explosivos, muestra los alcances de la capacitación de mano de obra calificada, que brinda la institución en materia de explosivos.

INSTITUCIÓN/TEMA	MARCO LEGAL
SENA	<p><b>Norma de competencia laboral F2-015</b> Ejecutar voladuras de rocas en minería a cielo abierto con cargue manual de barrenos.</p> <p><b>Norma de competencia laboral F2-015.</b> Perforar frentes en explotaciones mineras con equipo manual según diseño establecido</p> <p><b>Norma de competencia laboral F2-015</b> - Ejecutar voladura en rocas a cielo abierto con cargue de pozos con agente explosivo</p>

*Tabla 58. Normatividad asociada a la capacitación dada por el SENA en el tema de explosivos  
Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

La Tabla 59. Normatividad Técnica asociada al ICONTEC en el tema de explosivos, muestra el conjunto de normas técnicas colombianas (NTC) y otros documentos normativos desarrollados por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), que establecen los estándares y requisitos para los conductores, vehículos y proceso de transporte terrestre de material peligroso incluyendo explosivos.

INSTITUCIÓN/TEMA	MARCO LEGAL
ICONTEC	<p><b>NTC 3966.</b> Transporte de Mercancías Peligrosas Clase 1. Explosivos. Transporte Terrestre por Carretera</p> <p><b>NTC 1692.</b> Transporte de mercancías peligrosas. Clasificación. Etiquetado y Rotulado.</p> <p><b>NTC 3966.</b> Transporte de mercancías peligrosas. Clase 1. Explosivos.</p> <p><b>NTC 4435.</b> Transporte de mercancías. Hojas de Seguridad para materiales. Preparación.</p> <p><b>NTC 4702-1.</b> Embalajes y Envases para Transporte de Mercancías peligrosas clase 1. Explosivos.</p> <p><b>NTC 4532.</b> Transporte de mercancías peligrosas, tarjetas de emergencia para transporte de materiales. Elaboración.</p>

	<b>GTC 45.</b> Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional
--	--

*Tabla 59. Normatividad Técnica asociada al ICONTEC en el tema de explosivos  
Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

La Tabla 60. Normatividad internacional aplicada en Colombia asociada al tema de explosivos, muestra la normatividad internacional adoptada por algunas empresas para mantener un estándar a causa de la falta de normatividad en los procedimientos y regulación en el tema en el territorio colombiano.

<b>INSTITUCIÓN/TEMA</b>	<b>MARCO LEGAL</b>
NORMAS INTERNACIONALES	<p><b>NFPA 495</b> Explosive Materials Code.</p> <p><b>NFPA 704</b> National Fire Code.</p> <p><b>NFPA 497</b> Recommended Practice for the Classification of Flammable Liquids, Gases, or Vapors and of Hazardous.</p> <p><b>NFPA 5000</b> Building Construction and Safety Code.</p> <p>Recomendaciones Relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas de las Naciones Unidas - Libro Naranja - Volumen I.</p> <p>Título 27 Code of Federal Regulations (CFR), parte 555 - USA.</p> <p><b>Manual de la OSCE</b> (Organization for Security and Co- operation in Europe) de mejores prácticas sobre munición convencional.</p>

*Tabla 60. Normatividad internacional aplicada en Colombia asociada al tema de explosivos  
Fuente: Positiva (2024) Modificado por el Autor (2025)*

### 6.1.1 Capacitación en uso y manejo de explosivos

En Colombia, dos entidades son las encargadas de formar, capacitar, acreditar y certificar en la actualidad las labores relacionadas con el uso y manejo de explosivos para el sector de la minería e infraestructura en Colombia. La Escuela de Ingenieros Militares, perteneciente al Comando General de las Fuerzas Militares, es la que expedirá los certificados de empleo básico y elemental de explosivos comerciales en minería y obras civiles. De otro lado, el SENA se encargará de formar y acreditar la idoneidad y las competencias de las personas que ejecutan estas labores, mediante el programa de Actualización en Manipulación de Sustancias Explosivas que se creó bajo el convenio marco entre el Ministerio de Defensa Nacional y el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), para contribuir en el desarrollo técnico del personal en las diferentes empresas legalmente constituidas que utilicen material explosivo dentro de sus procesos, capacitando personal a nivel operativo y

técnico en la Manipulación de Sustancias Explosivas, así como en procesos de actualización continua acorde a los desarrollos y requerimientos técnicos y tecnológicos del país.

El Diagrama 13. Capacitación en uso y manejo de explosivos, muestra las entidades autorizadas por el Ministerio de Defensa, mediante el Comando General de las Fuerzas Militares, para que se expida certificado en el empleo de explosivos

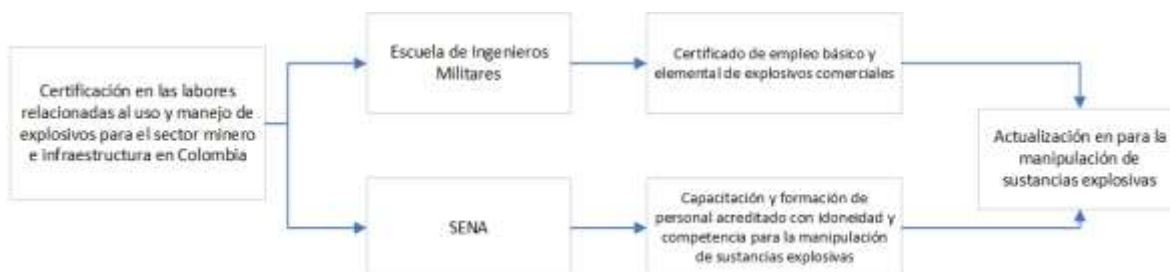


Diagrama 13. Capacitación en uso y manejo de explosivos  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

## 6.2. Protocolo

Acorde a lo anterior y demás razones expuestas a lo largo de esta tesis titulada «MÉTODOS PARA LA MITIGACIÓN TEMPRANA DE IMPACTOS POR DESLIZAMIENTOS DE ROCAS EN CORREDORES VIALES, MEDIANTE TÉCNICAS DE VOLADURA», se establece una propuesta de un protocolo, para el uso de explosivos, la cual es aplicable a cualquier explosivo y/o agente de voladura y está contemplando aspectos fundamentales en toda la operación como lo es el proceso de transporte, almacenamiento y manipulación del material explosivo y sus accesorios, para el desarrollo de esta propuesta se tuvo en cuenta la normatividad vigente a 2024 fecha de entrega de la presente tesis así como el reglamento y disposiciones establecidos por las fuerzas militares - Ejército Nacional de Colombia, la Industria Militar Colombiana - INDUMIL y el ministerio de transporte, en cuanto al uso que le es permitido a la industria minera, hidrocarburos y civil en cuanto al uso y manipulación de sustancias explosivas, además de los conocimientos y experticia del autor en este tema.

### 6.2.1. Compra de explosivo

Los trámites de autorización para la compra de Explosivo se deben adelantar ante el «Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE», que es el ente rector a nivel nacional del control de las armas de fuego y sus municiones, explosivos y sus accesorios y de las materias

primas cuyos permisos y licencias son expedidos a los particulares y a organismos estatales. Esta dependencia orgánica del Comando General de las Fuerzas Militares, en su Estado Mayor Conjunto, que tiene como función principal asesorar al Comandante y Jefe de Estado Mayor Conjunto de las Fuerzas Militares en el control del comercio de armas, municiones, explosivos y sus accesorios, elementos e insumos controlados por el Estado, coleccionistas de armas, clubes de tiro y caza en todo el territorio nacional, talleres de armería, polígonos, fábricas y expendios de artículos pirotécnicos, velando por el cumplimiento de las normas vigentes.

Se realizará el «registro e inscripción para usuario de explosivos». La empresa o profesional encargado de realizar los trámites de compra de explosivos lo realizará mediante la «INSCRIPCIÓN DE USUARIO DE EXPLOSIVOS» y será responsable de:

- Diligenciar el Formulario de inscripción de usuario de explosivos, formulario que debe ser solicitado por el Representante Legal ante el Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE.
- Diligenciar la Solicitud dirigida al Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos DCCAE, en la que se solicite la inscripción como usuario de explosivos; acá debe especificar la actividad, forma, seguridad en el control y el empleo del explosivo. \* Ver **ANEXO 7.** Formulario de registro e inscripción para usuario de explosivos
- Adjuntar el Certificado de Cámara y Comercio con una vigencia no mayor de sesenta (60) días.
- Adjuntar la fotocopia de la cédula de ciudadanía y pasado judicial del representante legal de la empresa.
- Adjuntar Carta de autorización para la investigación de antecedentes judiciales y disciplinarios dirigida al jefe del Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE.

Realizar la solicitud de cupo, la empresa o profesional encargado de realizar los trámites de solicitud de cupo, donde para obtener cupo de material explosivo, el usuario debe estar inscrito ante el Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE; la vigencia del cupo empieza a contar a partir del 1 de enero hasta el 31 de diciembre de cada año o por la duración del contrato, sin que supere la anualidad. En caso de que el usuario haya solicitado el cupo en una fecha

diferente dentro del lapso descrito, se autorizarán las cantidades justificadas para el tiempo restante, con previo concepto favorable firmado por el Jefe de Estado Mayor de la Brigada encargada de la jurisdicción donde se almacenarán y utilizarán los explosivos y accesorios de voladura y será responsable de:

- Emitir informe anexo al concepto que incluya la cantidad anual solicitada de los explosivos y sus accesorios.
- Custodia de la copia de informe de la revista de inspección efectuada por la brigada encargada que otorgó el concepto favorable para la utilización y manejo de explosivos en su jurisdicción.
- Tramitar la Solicitud dirigida al Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE para la autorización en la que se especifique: clase, cantidad de explosivos y accesorios que necesitan, actividad para la cual requieren el explosivo, forma y seguridad del almacenamiento, lugar y ubicación exacta donde se utilizarán los explosivos.
- Adjuntar Certificado de Cámara y Comercio con una vigencia no mayor de sesenta (60) días.
- Adjuntar Fotocopia de la cédula de ciudadanía y pasado judicial del representante legal de la empresa.
- Adjuntar Fotocopia de la cédula de ciudadanía y pasado judicial del personal que manipulara los explosivos y sus accesorios en cualquiera de las etapas del proceso (almacenistas, explosivistas, etc.).
- Adjuntar Carta de autorización para la investigación de antecedentes judiciales y disciplinarios dirigida al jefe del Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE.
- Demostrar la legalidad de la actividad con explosivos; para ello se tiene uno de los dos casos siguientes:
  - Registro minero y certificado de uso de explosivos expedido por autoridad minera.
  - Copia del contrato debidamente firmado y sellado para contratistas de obras civiles, empresas de exploración sísmica o petrolera o de cañoneo de pozos.
- Adjuntar el Certificado de idoneidad otorgado por una unidad de Ingenieros Militares al personal encargado del material explosivo.
- Adjuntar el Plan anual de consumo, de compras de explosivos y accesorios de voladura y el plan de producción o uso del explosivo.

- Justificación técnica para el uso del material explosivo y accesorios de voladura solicitado. El estudio debe contar con las especificaciones de perforación, características del material, volúmenes a explotar, realizar análisis por cada una de las labores con explosivo y todo aquello que sustente las cantidades de material explosivo; el estudio debe ser realizado, en original, avalado y firmado por un ingeniero que acredite conocimiento en diseño y ejecución de voladuras.
- Adjuntar la Ubicación exacta donde serán utilizados y almacenados los explosivos y sus accesorios (anexar en medio magnético o digital fotos y video de las instalaciones)
- Si la persona encargada de realizar el trámite no es el representante legal de la empresa, se deberá anexar una carta en la que se autorice a la persona correspondiente para el trámite ante el Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos DCCAE.

En el caso de requerir una adición de material explosivo, la empresa o profesional encargado de realizar los trámites de compra de explosivo adicional será responsable de:

- Realizar la Solicitud dirigida al Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, para la autorización de adición, en la que se especifiquen los motivos por los cuales requiere más material explosivo y accesorios de voladura.
- Realizar la Justificación técnica del material explosivo y accesorios de voladura solicitados y/o sustancias químicas controladas. El estudio debe contar con las especificaciones de perforación, características del material, volúmenes a explotar, realizar análisis por cada una de las labores con explosivo y todo aquello que sustente las cantidades de material explosivo. El estudio debe ser realizado, en original, avalado y firmado por un ingeniero que acredite conocimiento en diseño y ejecución de voladuras.

En el caso de recibir material por «CESIÓN DE MATERIAL EXPLOSIVO», Para este caso es necesario que la empresa que recibe tenga cupo de material vigente y la capacidad en cantidad y referencia, donde la empresa o profesional encargado de realizar los trámites será responsable de:

- Realizar la Solicitud dirigida al Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, para la autorización de cesión, en la que se especifiquen los motivos

por los cuales se requiere la adición de material explosivo. El documento debe ser avalado por la empresa que entrega y por la que recibe.

### **6.2.2. Autorización para compra de explosivo**

Este procedimiento debe adelantarse en las seccionales del Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE; para aquellos proyectos donde no hay almacén de INDUMIL y la autorización de venta será emitida por el DCCAE, en donde la empresa o profesional encargado de realizar los trámites de compra de explosivo será responsable de:

- Realizar la solicitud dirigida al Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE o JEM, según el caso, en la que se para la autorización de compra se especifiquen: clase, cantidad de explosivos y accesorios que se necesitan.
- Diligenciar el formulario de autorización para la venta de explosivos y accesorios.
- Solicitar la emisión de orden de compra o pedido.
- Pago de pedido.

\* Ver **ANEXO 8**. Presencia de INDUMIL en Colombia para compra de Explosivo.

\* Ver **ANEXO 9**. Orden de compra de Explosivo.

### **6.2.3. Autorización para la movilización de material explosivo (salvoconducto de transporte)**

El permiso de movilización tendrá vigencia de noventa (90) días a partir de la fecha de expedición, para el traslado del material explosivo desde el sitio de origen hasta su destino final. Este movimiento será bajo estrictas medidas de seguridad previa coordinación con la Unidad Militar correspondiente de la jurisdicción, el transporte debe estar bajo vigilancia de la escolta militar, en donde la empresa o profesional encargado de realizar los trámites de movilización de explosivo será responsable de:

- Realizar la Solicitud de transporte y escolta dirigida al Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE o JEM, según el caso, para la autorización de

transporte se anexa la certificación de compra en la que se especifiquen clase, cantidad de explosivos y accesorios que se necesitan.

#### **6.2.4. Facturación y entrega del material solicitado**

Se debe tener en cuenta que antes de retirar el material adquirido, se debe haber efectuado el pago correspondiente del pedido, el servicio de transporte y la escolta en los casos que se aplique, en donde la empresa o profesional encargado de realizar los trámites de retiro del de explosivo será responsable de:

- Presentar el recibo de caja y el formulario de autorización entregado por el Departamento Control Comercio Armas Municiones y Explosivos - DCCAE.

Una vez cumplido con este ítem, se realizará la facturación por parte del almacén, en donde la empresa o profesional encargado de realizar los trámites de retiro del de explosivo será responsable de:

- Retiro del material, donde una vez retirado el material de los almacenes de INDUMIL, la movilización y seguridad de los productos explosivos y accesorios de voladura estarán bajo la responsabilidad de la empresa solicitante hasta el destino final.

#### **6.2.5. Transporte interno y externo en vehículos**

La empresa o profesional encargado de realizar el transporte desde la zona de almacenamiento y entrega del agente explosivo hacia la zona de voladura es responsable de:

- Garantizar que se cuente con el salvoconducto de retiro de materia explosivo, documento expedido por la oficina de control comercio de armas y explosivos de la jurisdicción, tener acompañamiento de la unidad militar y demás permisos y/o documentación exigida por el comando general de las fuerzas militares.
- Verificar que se realice el diligenciamiento de los formatos y la lista de verificación de las condiciones de seguridad – transporte de explosivos

La empresa o personal encargado de realizar la voladura de fragmentación, dispondrá de un profesional que estará encargado del proceso de seguridad y salud en el trabajo profesional SST o tecnólogo SST, el que será responsable de:

- Diligenciar y verificar el cumplimiento del formato «lista de verificación de condiciones de seguridad - transporte de explosivos».
- Verificar que para el transporte externo el conductor cuente con el certificado del curso básico obligatorio de capacitación para conductores de vehículos que transportan sustancias o mercancías peligrosas según lo establecido en la Resolución 1223/2014 - Capacitación para los conductores de vehículos de carga que transportan mercancías peligrosas.
- Verificar que el conductor y/o transportador cuente con la autorización expedida por parte de la empresa para el vehículo asignado y a su vez tenga una capacitación para realizar el procedimiento de transporte de explosivos o sus accesorios.
- Verificar que el transporte de los explosivos y sus accesorios de voladura, sea realizado en vehículos separados. En caso de que el transporte se realice en el mismo vehículo, se debe asegurar que estos vayan en compartimientos diferentes. Todo lo anterior según las recomendaciones de compatibilidad que se establecen por el fabricante.
- Verificar que la carga de explosivos y/o accesorios de voladura, no exceda el ochenta por ciento (80 %) de la capacidad total del vehículo.
- Verificar que NO se lleve el vehículo mientras esté cargado con explosivos o accesorios de voladura a garajes, talleres o estacionamientos ubicados en áreas pobladas, mientras esté cargado con explosivos o accesorios de voladura.
- Verificar que NO sean transportadas sustancias corrosivas o inflamables junto con los explosivos o accesorios de voladura.
- Programar paradas cada 2 horas durante el recorrido para revisar las condiciones de la carga dentro del vehículo, así como la condición del vehículo.
- Verificar que el conductor del vehículo no ha ingerido bebidas alcohólicas y/o sustancias alucinógenas.
- Garantizar que nunca se transportara material explosivo cuando las condiciones del clima presenten posibilidades de presentar tormenta eléctrica.

El personal encargado de autorizar la salida del transporte con explosivos y/o accesorios de voladura debe ser responsable de:

- Gestionar las medidas necesarias para dar cumplimiento con el llenado del formato «lista de verificación de condiciones de seguridad – transporte de explosivos».
- Designar el número de vehículos necesarios para realizar el transporte interno de los explosivos de manera que el peso transportado no exceda el 80 % de su capacidad y que los explosivos y accesorios de voladura se transporten de forma independiente.
- Planear el recorrido de manera conjunta con el encargado de la escolta, a fin de evitar que el vehículo cargado con explosivos y/o accesorios de voladura, cruce por zonas pobladas o urbanas; por ningún motivo, se debe detener la caravana en estas zonas.
- Tener la opción de un vehículo auxiliar o de respaldo en el caso de ser necesario.
- Verificar en cuanto esté cargado el vehículo, se realice el inventario del material cargado en el vehículo, al igual que al momento del descargue se verifique el material descargado, según este registrado en la «factura de compra o el acta de solicitud de retiro de explosivos y/o accesorios de voladura».
- Controlar que los explosivos y/o accesorios de voladura sean descargados directamente en el polvorín o zona de almacenamiento de explosivos designada, ya sea que vengan de otros polvorines o de INDUMIL o simplemente sea producto de devoluciones de voladura, debe estar siempre bajo la vigilancia y supervisión de personas autorizadas.
- Verificar que nunca se transporte material cuando hay posibilidad de que se presente tormenta eléctrica.

El coordinador de seguridad física es responsable de:

- Realizar acompañamiento durante el transporte interno y externo de material explosivo y accesorios de voladura, desde y hacia los polvorines, implementando las medidas de seguridad necesarias para dicho procedimiento.
- Realizar inventario del material cargado en cada vehículo y su correspondiente verificación en su descarga, según «acta de solicitud de retiro o factura de compra».

El almacenista de la zona de voladura es responsable de:

- Verificar que los materiales salgan del polvorín o la zona de almacenamiento con «acta de solicitud de retiro» en presencia del encargado de la voladura y del coordinador de seguridad física.
- Verificar que NO se transporten explosivos cebados.
- Garantizar que los elementos utilizados para la voladura se transporten en recipientes de madera, caucho o plástico, de varios compartimientos, garantizando el aislamiento.

#### **6.2.6. Requisitos de vehículos y transportadores**

El profesional en seguridad y salud en el trabajo SST o tecnólogo SST es responsable de:

- Garantizar que los vehículos utilizados de forma habitual u ocasional para el transporte de explosivos y accesorios cumplan con los siguientes criterios:
- El vehículo debe portar el certificado de revisión técnico - mecánica exigida por el departamento de tránsito de la ciudad.
- El vehículo debe contar con carrocería sólida, resistente y con características específicas de aislamiento interno. Se debe evitar que la superficie metálica de la zona de carga esté en contacto con el explosivo, para lo cual se debe poner algún recubrimiento en pasta, cartón o caucho.
- El vehículo debe estar marcado con logos o tener los pictogramas de seguridad según lo establecido en el decreto 1609/2013 con la información de los explosivos a transportar. (Esto es a criterio de las condiciones de seguridad física de la zona)
- El vehículo debe contar con un mínimo de dos (2) extintores del tipo ABC de 20 kg, con sus certificados de carga vigente. Uno de los extintores debe estar en cabina.
- El material explosivo y/o accesorios de voladura, deben estar siempre protegidos contra el sol y la lluvia durante el proceso de transporte.
- El vehículo debe contar con dos sistemas de frenos independientes en sus mandos y aplicación.

El transportador y/o conductor del vehículo encargado de transportar los explosivos y/o accesorios de voladura son responsables de:

- Mantener una distancia mínima entre vehículos de cien (100 m) metros y su velocidad máxima será aquella que permita al conductor mantener siempre en control el vehículo ante cualquier contingencia; esta velocidad no debe superar los 20 Km/h para transportes internos o dentro del área de voladura y 45 Km/h y para los transportes externos.
- El vehículo debe obedecer y acatar todas las leyes y reglamentos establecidos para la circulación de tránsito nacional, departamental y municipal.
- Llevar la carga debidamente acomodada, estibada, apilada, sujeta y cubierta de tal forma que no represente ningún tipo de peligro para la vida de las personas y el ambiente, que no oculte de ninguna forma las luces, ni comprometa la estabilidad o conducción del vehículo.
- Asegurarse que el vehículo esté marcado con los pictogramas de seguridad, según lo establecido en el decreto 1609/2013, con la información de los explosivos a transportar. (Esto es a criterio de las condiciones de seguridad física de la zona)
- Cuando el automotor se encuentre estacionado, este debe estar en todo momento con los frenos aplicados, el motor apagado y perfectamente bloqueadas las llantas para evitar su deslizamiento.
- Respetar las prohibiciones de: No fumar, No llevar fósforos, No llevar encendedores, No llevar cigarrillos encendidos, No llevar materiales inflamables o cualquier elemento o sustancia que pueda ocasionar la ignición de aquellos.
- No abandonar en ningún momento el vehículo durante el recorrido.
- No transportar nunca personal en el mismo vehículo diferente al personal capacitado y personal de seguridad.
- No se debe reabastecer nunca el vehículo de combustible mientras este cargado de materiales explosivos y/o accesorios de voladura.
- No transportar nunca material explosivo y/o accesorios de voladura, cuando el clima presente posibilidades de tener tormenta eléctrica.

- NO se debe llevar el vehículo mientras esté cargado con explosivos o accesorios de voladura a garajes, talleres o estacionamientos ubicados en áreas pobladas mientras este cargado con los explosivos o accesorios de voladura.
- El vehículo debe contar con una carrocería sólida, resistente y con características específicas de aislamiento interno. Se debe evitar que la superficie metálica de la zona de carga esté en contacto con el explosivo, para lo cual se debe poner algún recubrimiento en pasta, cartón o caucho.
- NO se deben transportar sustancias corrosivas o inflamables junto con los explosivos o accesorios de voladura.
- Garantizar que las superficies de cargue y descargue de los vehículos cuenten con aislamiento en pasta, cartón o madera para superficies metálicas.
- Verificar que el material explosivo y/o accesorios de voladura, deben estar siempre protegidos con una lona gruesa que proteja contra el sol, humedad, lluvia y chispas al material transportado durante el proceso.

#### **6.2.7. Transporte manual**

El profesional SST o tecnólogo SST es responsable de:

- Inspeccionar y verificar que todo el personal que transporte explosivo y/o accesorios de voladura, de forma manual, cuente con la capacitación pertinente y tengan el «certificado de idoneidad» vigente, el cual es otorgado por la escuela de ingenieros militares o la autoridad competente autorizada para su expedición y/o emisión.
- Verificar que los explosivos y/o accesorios de voladura se lleven por separado en las bolsas destinadas para tal fin (bolsas de lona o cuero) y que nunca una persona transporte de manera conjunta elementos de ignición u accesorios de voladura con el explosivo.
- Inspeccionar y verificar que la cantidad máxima a transportar por una persona y por cada contenedor sea máximo de 25 kilogramos.
- Controlar e inspeccionar que el transporte peatonal de explosivos y accesorios de voladura sea realizado en distintos periodos de tiempo y no conjuntamente. En caso de ser necesario realizarlo al mismo tiempo, este transporte debe ser realizado por dos personas; estas

deberán mantener entre sí la distancia de seguridad mínima recomendada de quince (15 m) metros.

#### **6.2.8. Almacenamiento de explosivo y accesorios**

El encargado de la voladura y/o jefe o director de la voladura es responsable de:

- Gestionar las medidas necesarias para dar cumplimiento del formato «lista de verificación de condiciones de seguridad – almacenamiento de explosivos».
- Coordinar las reparaciones o modificaciones en los polvorines o áreas de almacenamiento permanentes o temporales, que sean necesarias para cumplir los requerimientos de las autoridades competentes.

El profesional SST o tecnólogo SST es responsable de:

- Verificar que se dé cumplimiento a través del formato «lista de verificación de condiciones de seguridad – almacenamiento de explosivos», generando los reportes acorde a la directriz de la voladura, diarios o semanales o mensuales, en compañía del almacenista y reportar hallazgos al encargado de los explosivos (jefe de voladura) para que se gestionen las medidas de cumplimiento.
- El polvorín debe estar acondicionado y provisto de avisos de peligro según lo establece la norma NTC 1692 y según las recomendaciones adicionales del Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE, y tener los avisos de prohibición a fumar, el uso de celulares y radios, además de garantizar la permanencia de un puesto de control y seguridad en las instalaciones.
- Cada elemento almacenado dentro del polvorín o áreas de almacenamiento permanentes o temporales debe contener su «hoja de seguridad» y por fuera del polvorín o áreas de almacenamiento permanentes o temporales se debe realizar la señalización según UN (Naciones Unidas) y NFPA (siglas del inglés National Fire Protection Association - Asociación Nacional de Protección contra el Fuego), esto de acuerdo al procedimiento de manejo de sustancias.

- Verificar estrictamente se dé cumplimiento a la prohibición de almacenar en los polvorines materiales diferentes a los establecidos en el diseño (explosivos y/o accesorios de voladura), ni de manera transitoria, no se permite el almacenamiento de pinturas, maderas, basuras, cartones, cables u objetos metálicos que puedan interactuar u ocasionar explosiones por impacto o fricción sobre los explosivos.
- Instalar los equipos de primeros auxilios en la zona de almacenamiento de explosivos y/o accesorios de voladura.
- El polvorín debe contar con los elementos mínimos para el control de incendios, tales como extintores tipo ABC multipropósito.
- Si por alguna causa la Nitroglicerina o algún elemento o compuesto del explosivo ha escurrido al piso del polvorín, se debe consultar de manera inmediata la directriz contemplada en el instructivo o manual de uso de sustancias explosivas para la atención de derrames, además de informar al fabricante, para que de la solución aprobada para el fin de insensibilización del elemento.
- Verificar que, en un radio de 15,25 metros del polvorín o área de almacenamiento de explosivos temporal o permanente, no se puede almacenar ningún tipo de material inflamables, hacer trabajos que generen chispas como soldadura o reparaciones eléctricas.
- Se debe contar con Kit para la atención de incendios y derrames.
- Se debe contar con botiquín y camilla.
- Garantizar que las lámparas de seguridad e instalaciones eléctricas en el polvorín o área de almacenamiento de explosivos temporal o permanente, no estén a una distancia menor de 15,25 metros de los polvorines, cumpliendo con la normatividad RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE)

El almacenista o el encargado de seguridad, es responsable de:

- Dar cumplimiento de que las condiciones del lugar de almacenamiento de material explosivo y/o accesorios de voladura, cumplan con el formato «lista de verificación de condiciones de seguridad – almacenamiento de explosivos».
- Verificar y asegurar que cada puerta tenga 3 candados de seguridad con sistema de apertura triclave, según lo recomendado por la norma.

- En caso de almacenar diferentes lotes de explosivo, se debe realizar el almacenamiento de estos por orden de vencimiento, permitiendo siempre realizar primero el retiro del material explosivo más antiguo.
- Verificar que en la ficha de almacenamiento figure información mínima de cada elemento (fabricante, nombre del explosivo, lote, marca, unidad de medida, cantidad, fecha de fabricación, fecha de vencimiento y fecha de almacenamiento en el polvorín).
- Verificar y asegurarse de que las cajas de explosivo almacenado, queden hacia arriba de forma que se pueda leer fácilmente sus rótulos de identificación e información pertinente.
- Verificar que NO se almacenen explosivos en lugares húmedos, ni cerca de aceite, combustibles, materiales inflamables o artefactos que generen calor.
- Inspeccionar que no se permita la acumulación de hojas, hierbas, matorrales o basura dentro de un radio de 75 metros alrededor del polvorín o área de almacenamiento de explosivos temporal o permanente.
- Llevar el registro de personal, manejando dos libros, el libro de ingreso de personal y el libro foliado de actas de entradas y salidas de explosivo y/o accesorios de voladura.
- Inspeccionar que el área máxima de almacenamiento utilizada, dentro del polvorín o área de almacenamiento de explosivos temporal o permanente, sea máximo del 60 %. El 40 % restante será utilizado para las actividades de movilidad y tránsito de materiales.
- No se permite el empaquetar, envasar, reenvasar, ni manipular ningún tipo de explosivo, diferente a su almacenamiento y retiro en los polvorines o área de almacenamiento de explosivos temporal o permanente, ni a un radio menor de 25 metros, según lo recomendado por la norma.
- Verificar e inspeccionar que se dé cumplimiento a las prohibiciones de: no fumar, el uso de celulares y radios dentro de los polvorines.
- Diligenciar el formato «lista de verificación de vehículos con productos químicos peligrosos» cuando se dé entrega (ingreso) o retiro (salida) del material explosivo y/o accesorios de voladura, por parte de los vehículos transportadores.
- Nunca está permitido el almacenar explosivos y/o accesorios de voladura en lugares diferentes a los polvorines o área de almacenamiento de explosivos temporal o permanente autorizados por el Departamento Control Comercio de Armas Municiones y Explosivos – DCCAE, de la jurisdicción.

- Marcar cada uno de los elementos con su hoja de seguridad y por fuera del polvorín, realizar la señalización según lo establecido en UN y NFPA, y de acuerdo con el procedimiento de manejo de sustancias químicas peligrosas.
- Realizar inventario e inspección física a los polvorines al inicio y al final de la operación en caso de ser transitoria y de forma diaria en compañía del coordinador de seguridad física y encargado del explosivo, verificando las cantidades reportadas en los libros y el sistema.
- Realizar de manera permanente un control del consumo de explosivos y los accesorios de voladura con el libro foliado de actas de entradas y salidas.
- No almacenar explosivo ni accesorio de voladura, a una altura superior a los 1.60 metros para garantizar las condiciones de seguridad y comodidad en su manipulación y manejo al personal.
- Ubicar los explosivos y los accesorios de voladura sobre una plataforma de madera, plástica o similar, la que debe tener una altura entre 10 a 30 centímetros, sobre el nivel del piso, para proteger el material explosivo de la humedad, vibraciones, sacudidas y así garantizar su correcta ventilación.
- No se permite almacenar los explosivos y los detonadores en el mismo polvorín.
- Mantener los explosivos en los empaques originales.
- No permitir el ingreso al polvorín, ningún elemento electrónico que pueda producir ondas electromagnéticas.
- Verificar inspeccionar que nunca se almacenen explosivos cebados dentro de los polvorines.
- Verificar que el material almacenado en el polvorín o área de almacenamiento de material explosivo y/o accesorios de voladura, cumplan con el formato «lista de verificación de condiciones de seguridad – almacenamiento de explosivos» y que se transportó mediante «salvoconducto de retiro» diligenciado con Factura correspondiente y Certificado de Escolta, emitido por el jefe de explosivos de la jurisdicción del Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE.
- Contar dentro del polvorín o área de almacenamiento temporal o permanente, de material explosivo y/o accesorios de voladura, cuente con un sistema de medición para temperatura y humedad y verificar que estas condiciones están dentro de los parámetros permitidos para cada material explosivo

El Coordinador de voladura es responsable de:

- Garantizar que los diseños y planos de los polvorines o área de almacenamiento temporal o permanente, cuenten con el visto bueno de la oficina de CCA (Control Comercio de Armas) de la jurisdicción, esto realizado mediante la revista de inspección y listas de chequeo, previo a la construcción de la estructura.
- Controlar que los explosivos y accesorios de voladura sean almacenados en polvorines o área de almacenamiento temporal o permanente con secciones independientes para cada material y destinados exclusivamente para tal fin.
- Verificar que los polvorines o área de almacenamiento temporal o permanente sean sólidos, a prueba de incendios, a prueba de balas, además de estar provistos de adecuada iluminación y óptima ventilación natural, situados a un mínimo de 100 metros de la zona de voladura, edificaciones, vías férreas, torres eléctricas o carreteras, como está establecido en las recomendaciones, salvo que lo autorice la autoridad competente y estén provistos de cámaras de amortiguación y resonancia, tener puertas de hierro con cerraduras seguras, contar con pararrayos y no tener más aberturas que las necesarias para la entrada de material y el paso de ventilación.
- Controlar el stock de materiales de forma que el área máxima de almacenamiento del polvorín sea del sesenta por ciento (60 %) del área total de la instalación y el cuarenta por ciento (40 %) restante sea para tránsito y movimiento de material.
- Verificar que el polvorín cuente con un sistema de candados triclave para su apertura, en la cual debe estar presente el encargado de voladura y/o jefe de voladura, el coordinador de seguridad física y el almacenista de explosivos.
- Garantizar que se destruyan, así no hayan sido consumidos, los explosivos, cebos y todo material de ignición, cuando de estos se sospeche sea material defectuoso, estén cumplidas las fechas de vencimiento o hayan ocurrido explosiones o tiros fallidos.
- Diligenciar y presentar las «actas de reporte de uso de explosivo» a la oficina del Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, de la jurisdicción donde se presentan todos los movimientos, especificando su numeración, tipo, cantidad y fecha.
- Verificar y garantizar que se realice el diligenciamiento del formato lista de «verificación de condiciones de seguridad - almacenamiento de explosivos».

El Coordinador de Seguridad Física es responsable de:

- Realizar acompañamiento durante el ingreso y retiro de materiales explosivos y accesorios de voladura en los polvorines o área de almacenamiento temporal o permanente, siendo parte del sistema triclave para la apertura del mismo.
- Realizar llenado de la «minuta del centinela de verificación de condiciones de seguridad de los polvorines» o área de almacenamiento temporal o permanente.
- Realizar el acompañamiento para la apertura del polvorín o área de almacenamiento temporal o permanente, para actividades de aseo, inventario y demás que sean necesarios.

### **6.2.9. Operaciones y uso de explosivos**

#### 6.2.9.1. Antes de la voladura

El encargado de los explosivos y/o jefe de voladura es responsable de:

- Garantizar que los materiales explosivos no sean vendidos, enviados o transferidos a una persona o organización, que no tenga el permiso para utilización de los mismos; para el caso de realizar una sección debe ser mediante la documentación y aprobación del Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE.
- Se debe garantizar que los explosivos a utilizados en la voladura y/o fragmentación, sean explosivos convencionales, fabricados, importados y comercializados por la Industria Militar Colombiana – INDUMIL
- Está prohibido el uso de cualquier sustancia química para la fabricación artesanal de sustancias explosivas.
- Para el caso de realizar una compra a una empresa diferente a INDUMIL, se debe realizar el trámite de autorización de compra y solo mediante su aprobación, se realizará la compra.
- Realizar diseño de perforación, para la voladura en donde se define el tipo de voladura, numero de barrenos, la distancia entre barrenos (Burden y espaciamiento), inclinación, cantidad de barrenos, diámetro y longitud.
- Realizar el diseño de la voladura, en donde se especifique el tipo y longitud de retacado, tipo de explosivo y accesorios a utilizar, la forma de cargue y su cantidad. Para lo anterior

se debe tener en cuenta la granulometría necesaria, la amenaza ante proyecciones y la posibilidad de vibración del terreno.

- Verificar que el manejo y utilización de los explosivos y accesorios de voladura, sea responsabilidad sólo del almacenista, el encargado de voladura y el personal debidamente capacitado y autorizado para ello.

El operador del perforador es responsable de:

- Realizar la barrenación de acuerdo al formato de perforación entregado por el encargado de la voladura.
- Registrar las anomalías geológicas, como cambios de roca u diferentes estratos en los bloques, agrietamiento, cantidad de agua en cada barreno (de presentarse), pérdida de aire, posibles cavernas o vacíos, entre otros.

El encargado de la voladura y/o jefe de voladura es responsable de:

- Verificar en campo la zona a perforar con base en las necesidades del proyecto.
- Verificar en campo los alrededores de la zona a perforar y fragmentar y con base en las necesidades del proyecto, reportar cambios en el diseño.
- Inspeccionar piso y caras libre desde diferentes posiciones, lo cual le debe permitir tener claro el Burden efectivo, condiciones generales y anomalías geológicas.
- En el caso zonas escarpadas y de ser necesario realizar levantamiento topográfico al detalle y adecuar el terreno o la fragmentación.
- Realizar marcación de las perforaciones, en el bloque, en donde se define la distancia entre barrenos (burden y espaciamiento).
- Verificar que se realice la marcación de los barrenos y se ingresen todos los datos obtenidos al «formato de perforación» en el cual se incluye el número de barrenos, su ubicación, la inclinación y longitud, además de los parámetros previamente definidos.
- Verificar que las operaciones de perforación se realizan según las directrices y los parámetros definidos en el «formato de perforación» entregado al operador y a las indicaciones y marcaciones de campo, para lo cual debe revisar número y ubicación de los barrenos, inclinación, profundidad y estado general de la perforación. Todas las

observaciones deben quedar registradas en el formato, el cual debe ser enviado al coordinador de voladura para que realice diseño de la fragmentación.

- Realizar la programación de la voladura al menos mínimo 2 días antes, e informar mediante correo electrónico al personal que hace parte del procedimiento o quien tenga personal a cargo que se requiera en la programación de retiro, transporte, cargue y cierre del área de fragmentación Este personal es el Personal de SST, ayudantes, dinamiteros, conductor, almacenista de obra, coordinador de seguridad física y director de proyecto y de ser necesario personal de la cruz roja, defensa civil, policía nacional, alcaldía local, junta de acción comunal, hospital local.
- Revisar los elementos de iniciación, detonadores, conectores y cables en general para descartar posibles defectos de fábrica o deterioro. Para los cables de conexión de los detonadores electrónicos debe verificarse su continuidad y pérdidas antes de iniciar el amarre y a medida que se conectan los detonadores.

El profesional SST o tecnólogo SST es responsable de:

- Incluir el procedimiento de almacenamiento, transporte y uso de explosivos en la matriz de identificación de peligros, evaluación y valoración de riesgos.
- Divulgar el procedimiento de uso de explosivos desde los procesos de inducción, capacitación, entrenamiento y reentrenamiento con el apoyo del encargado de voladura o especialista en explosivos
- Tener un protocolo para la atención de emergencias acorde a la ubicación y tipo de voladura o fragmentación a desarrollar.
- Verificar y asegurar que el personal que vaya a ejecutar el trabajo esté certificado para la manipulación de explosivos.

#### **6.2.9.2. Durante la voladura**

El encargado de la voladura y/o jefe de voladuras es responsable de:

- Verificar que se diligencie el formato «lista de verificación de condiciones de seguridad - manipulación y uso de explosivos».

- Verificar que no se realicen conexiones para voladura o realizar detonación de éstas, si hay tormenta eléctrica.
- Verificar que se realice en los alrededores a la zona de voladura, registro en video y registro fotografías de las condiciones previas a la voladura o fragmentación.
- Verificar que se realice el registro de vibraciones, registro de la fragmentación en video y registro fotográfico de los procedimientos de voladura.
- De acuerdo con la «lista de chequeo de cargue de voladura», tomar las medidas preventivas adicionales necesarias, para minimizar los riesgos de proyección y el incremento de vibración durante la fragmentación.
- Realizar la configuración del equipo de detonación - explosor (blatbox) para el caso de que se implementen detonadores electrónicos, y para detonación con exeles, manipulará línea de inicio y pistola de tiro.
- Dar cumplimiento a las actividades realizadas según el formato «lista de verificación de condiciones de seguridad - manipulación y uso de explosivos».
- El día programado para la fragmentación y/o voladura, para los explosivos y accesorios de voladura, se debe diligenciar el «Acta de Solicitud de Retiro», para realizar el retiro de los polvorines o área de almacenamiento temporal o permanente de los explosivos y accesorios, se debe contar con la compañía del Coordinador de Seguridad Física y almacenista.
- Realizar procesos de capacitación al personal que participa en el procedimiento, donde se comparten las lesiones aprendidas en la voladura anteriores y se dan instrucciones puntuales, se asignan tareas y responsabilidades de acuerdo a la fragmentación o voladura que se ejecutará.
- Verificar que las operaciones de cargue de explosivo y retacado de los barrenos sean realizadas por personal idóneo previamente capacitado para cada actividad, esto cumpliendo las normas de seguridad industrial e higiene en el trabajo.
- Verificar y garantizar que los barrenos sean cargados según lo especificado en el diseño de fragmentación y/o voladura definida, autorizando e indicando al personal el uso y cargue adecuado en cada barreno.
- En caso de presentarse solo con su autorización, se pueden cargar los barrenos críticos como son los siguientes: (barrenos en lodos, en picos, con grietas, con longitud inadecuada, tapados, etc.).

- Durante la operación de cargue, tacado y amarre, se debe ir realizando de manera simultánea la verificación para cada uno de los barrenos de su cargue (cantidad y condiciones), tacado (longitud, calidad del material, y condiciones), amarre (diseño definido y calidad) y escaneo para el caso de realizarse la operación con detonadores electrónicos (calidad, tiempos de retardo, continuidad y pérdidas). Lo anterior con el apoyo y registro en el «formato de voladura».
- Realizar la medición de vibración (mm/s) y de ruido (db) para todas las voladuras realizadas en cercanías de una población civil, infraestructura de interés o edificaciones internas. Para el desarrollo de estas mediciones se deben tener puntos de control, de manera preferencial, en las cercanías de una de las viviendas más cercanas en los alrededores del área de voladura o fragmentación.
- Realizar registro fotográfico y realizar video antes y durante el proceso de detonación, de manera preferencial en cámara rápida y desde varios puntos
- Garantizar que no se realicen perforaciones ni en el frente ni en los alrededores, cuando se ha iniciado el cargue de los barrenos con explosivo, o realizar algún proceso de ensanchamiento de un barreno próximo o junto a otro cargado con explosivos.
- Prohibir que se realice la apertura de las cajas que contengan material explosivo, con herramientas metálicas o cualquier otro material que produzcan chispas.
- Para el desarrollo de operaciones o trabajos con cordón detonante, siempre se debe cortar este del carrete acorde a la longitud que se va a utilizar, antes de cebar la carga explosiva.
- Está prohibido el aprovechar elementos que se hayan mojado aun después de haberse secado. Esto aplica para elementos que pueden ser afectados, alterados o insensibilizados por condiciones de humedad como la mecha de seguridad, cordones, detonadores comunes, entre otros.
- Controlar que de ninguna manera los explosivos y accesorios de voladura, sean golpeados, alterados o se modifique el empaque o contenido original.
- Garantizar que cuando se empleen fulminantes y mechas de seguridad para efectuar la voladura o fragmentación, se cumplan las siguientes normas:
  - La mecha de seguridad siempre debe cortarse inmediatamente antes de insertarle el fulminante, eliminando de 2 a 4 centímetros de la punta para garantizar que el extremo esté seco.

- Se deben usar únicamente punzones de madera, aluminio, cobre, bronce, o berilio para hacer orificios en los explosivos encartuchados.
- El fulminante siempre se debe asegurar a la mecha utilizando alicates de ojo o engargoladora, diseñados especialmente para este fin.
- Se prohíbe el empalme utilizando los dientes, alicates comunes, tenazas o pinzas.
- La longitud mínima que se debe dejar a la mecha de seguridad es de 1.50 metros.
- El extremo de la mecha destinado al encendido se debe cortar de manera oblicua, esto para obtener una mayor superficie desnuda de pólvora.
- Nunca se debe disparar o iniciar una voladura sin una señal positiva de la persona encargada, quien debe garantizar las condiciones óptimas de seguridad dentro y los alrededores de la zona de fragmentación y/o voladura.

El profesional SST o tecnólogo SST es responsable de:

- Realizar seguimiento al proceso de cargue de fragmentación y/o voladura, verificando que se cumpla con lo estipulado en el formato «lista de verificación de condiciones de seguridad - manipulación y uso de explosivos».
- Realizar el «acta de asistencia del personal» que participa en cada uno de los procedimientos de la fragmentación y/o voladura, su cargo y su responsabilidad en la operación.
- Realizar pruebas de alcoholemia de manera aleatoria al personal, con el apoyo del profesional o auxiliar SST.
- Garantizar que en el momento del cargue de los barrenos, solo permanezca en el sitio de la fragmentación y/o voladura el personal autorizado y capacitado para dicha actividad, para lo que se debe realizar un cordón de seguridad, con la demarcación del área de operación.
- Definir un punto de encuentro y evacuar a todo el personal y tomar todas las precauciones necesarias para poner a salvo la vida de las personas que puedan estar en los alrededores, antes, durante y después de realizar la detonación del explosivo.
- Las operaciones de fragmentación y/o voladura se deben realizar a la luz del día, pero en el caso de que sea necesario efectuar una voladura en ausencia de luz solar, para esta se debe realizar una evaluación de riesgos, de tal forma que se garanticen al máximo todas las condiciones de seguridad.

- Impedir el paso a personal no autorizado a la zona cargada, señalar la zona y advertir del peligro cuando se suspenda una voladura y de ser necesario, se debe dejar seguridad física en el área durante todo el tiempo que sea necesario.
- Garantizar que se realice la quema de los residuos y empaques relacionados al uso de explosivos y accesorios de voladura utilizados durante la operación a una distancia mínima de 200 metros.
- Antes de realizar la destrucción de los residuos y empaques, se debe verificar que estén completamente vacíos.
- Realizar registro fotográfico y/o de video de la operación de quema de los residuos y empaques relacionados al uso de explosivos y accesorios de voladura.
- Verificar que no se tengan celulares o radios encendidos durante la operación de cargue de explosivos.
- Realizar el toque de la alerta sonora y cierra de vías, caminos y accesos al área de voladura y/o fragmentación, garantizando que todo el personal esté a salvo de cualquier proyección que se pueda generar al momento de la detonación.
- Para el personal que hace parte del procedimiento, se debe definir un sector que ofrezca cubierta y visibilidad con protección como mínimo a 500 metros. En el caso de no contar con esta distancia, se debe proveer de una cabina de protección metálica en lámina de espesor mínimo de ½”.
- Verificar que no exista presencia de personal inexperto, personal civil y animales en la zona de cargue y voladura.

### **6.2.9.3 Después de la voladura**

El encargado de la voladura y/o jefe de voladura es responsable de:

- Garantizar que, en todos los casos en los que debe ser necesaria una repetición de voladura, esta se debe realizar de manera inmediata al término de la primera.
- Revisar que, luego de hacerse la voladura, la línea de tiro sea desconectada del explosor y en el caso de los detonadores eléctricos, estos se deben dejar en corto circuito.
- Cuando una carga no detone, realizar lo indicado en el instructivo para Tiros Quedados - Dañados - P.

- Verificar con el almacenista el diligenciamiento y firma del «libro de actas» foliado de entradas y salidas y el «libro de ingreso de personal».
- Verificar que sea diligenciada la solicitud de «acta de solicitud de retiro», por parte del almacenista, coordinador de seguridad y encargado de explotación.
- Luego de realizada la detonación, esta se debe verificar tras una espera de tiempo mínimo de 5 minutos, si la voladura es con detonadores electrónicos o exeles y la espera será de un periodo de 30 minutos cuando la voladura se realiza con mecha lenta, para verificar que todos los detonadores hayan trabajado y que no hay peligro alguno.
- Si una carga no detona, se debe esperar un tiempo mínimo de 30 minutos y hacer la inspección. Esta labor la debe hacer una persona capacitada para tiros quedados y/o cargas sin detonar.
- Se debe solicitar y garantizar que se realice la destrucción de los explosivos alterados en un lugar alejado de polvorines y al aire libre, con la supervisión directa del coordinador de voladura.
- Revisar y firmar del libro foliado de actas de entradas y salidas según acta de «solicitud de retiro o compra de explosivos y accesorios».
- Realizar de manera conjunta con el coordinador de seguridad física y almacenista de obra, el diligenciamiento definitivo y cierre con firmas del «acta de solicitud de retiro», incluyendo las devoluciones de material explosivo sobrante.

El profesional SST o el tecnólogo SST será el responsable de:

- Comunicar a todo el personal involucrado en la operación, el restablecimiento de la normalidad y culmino de las labores de fragmentación y/o voladura.
- Revisar de manera cuidadosa la zona de fragmentación y/o voladura, para verificar la existencia de explosivos sin detonar.
- Verificar que se realice la quema de los residuos y empaques de los explosivos y accesorios utilizados en la operación.

El coordinador de seguridad física es responsable de:

- Realizar acompañamiento durante el retiro, transporte y utilización de los explosivos y accesorios, garantizando un control físico de los materiales desde que son retirados de los polvorines o áreas de almacenamiento permanentes o temporales hasta su quema y/o devolución.
- Realizar el conteo en compañía del encargado de la fragmentación o voladura de los elementos sobrantes y retirarlos antes de la voladura a una distancia mínima recomendada de 200 metros.
- Realizar posterior al conteo y el proceso de fragmentación y/o voladura, la entrega conjunta al almacenista de los elementos sobrantes.
- Pasar revista al personal que hace parte del procedimiento para que se retire de la zona de voladura y retire el material sobrante que no haya sido utilizados en la voladura.

#### **6.10 Elementos de protección personal generales para el trabajo**

Dentro de los elementos mínimos recomendados para mantener las condiciones de seguridad de los operadores y personal relacionado con el uso de explosivos se encuentran el uso de: gafas, guantes, casco, barbuquejo, botas dieléctricas, chaleco reflectivo, entre otros)

El profesional SST es responsable de:

- Realizar entrega de los elementos de protección de acuerdo a sus funciones y necesidades dentro de las actividades de fragmentación y/o voladura.
- Diligenciar el formato de «autorización de entrega de materiales – P».
- Realizar lo indicado en el procedimiento entrega, manejo y control de elementos de protección personal – P.

El almacenista de obra es responsable de:

- Entregar lo solicitado en el formato de autorización de entrega de materiales - P por el personal, previa autorización del profesional SST.

### **6.11. Señalamiento en los alrededores de la zona de fragmentación, corte y/o voladura**

El profesional SST es responsable de:

- Hacer entrega de los elementos de señalamiento y encerramiento del área de voladura y/o fragmentación a los operarios encargados del perímetro de seguridad
- Hacer entrega de los elementos de protección a los operarios encargados del perímetro de seguridad

El operario de seguridad es responsable de:

- Realizar el encerramiento acorde a lo indicado por el jefe de voladura y los protocolos de seguridad establecidos para cada caso
- Diligenciar el formato de observaciones adicionales y formato de personal auxiliar y/o de contingencia complementario
- No permitir el paso de personal no autorizado al área de operaciones ni antes, durante y ni después de las operaciones de voladura y fragmentación.
- Realizar labores de observación, vigilancia y control del tránsito del personal no autorizado que pudiese llegar a observar las operaciones de fragmentación y/o voladura.
- En caso de detectarse el ingreso de personal no autorizado al área de operaciones, realizar uso de silbato para persuadirlo y hacer uso del radioteléfono para informar al jefe de voladura.
- Retirar el material de señalamiento y encerramiento posterior a la operación de fragmentación y/o voladura, previo visto bueno del jefe de voladura
- Posterior al retiro de la señalización y encerramiento, hacer entrega del material sobrante al profesional SST auxiliar SS, según lo indicado en el procedimiento de entrega, manejo y control de elementos de protección personal - P.

### **6.12. Manejo de material post voladura y/o fragmentación**

En caso de contratarse un servicio de recolección de escombros para realizar la disposición de los materiales post voladura y/o fragmentación en una escombrera.

El operario de seguridad es responsable de:

- Posterior a la operación de fragmentación y/o voladura, previo visto bueno del jefe de voladura, permitir el ingreso y salida del vehículo de carga que transportara los materiales resultantes del proceso de fragmentación y/o voladura.
- Revisar los formatos de verificación del vehículo transportador y del conductor de acuerdo a lo reportado por la empresa contratada para esta operación y reportarlo en el formato de servicio de transporte y recolección de materiales post voladura y/o fragmentación.
- No permitir el paso de personal no autorizado al área de post fragmentación y/o voladura, ni antes, ni durante las operaciones de recolección de material post voladura y/o fragmentación.
- En caso de detectarse el ingreso de personal no autorizado al área de operaciones, realizar uso de silbato para persuadirlo y hacer uso del radioteléfono para informar al jefe de voladura.

El operario de maquinaria es responsable de:

- Realizar el retiro del material generado post voladura, de la zona de fragmentación mediante la operación de maquinaria amarilla como bulldozer o pala excavadora y acumularlo en el lugar destinado para la recolección, según las disposiciones establecidas para este fin.
- Realizar la carga del material acumulado en los vehículos transportadores, mediante la operación de maquinaria como bulldozer o pala excavadora.

### **6.13. Impactos a manejar**

Antes de ejecutar cualquiera de las actividades que se describen en el protocolo y la matriz presentada a continuación el encargado de las operaciones de voladura y/o fragmentación, deberá verificar las características del lugar de trabajo, identificando y controlando los peligros asociados (ruido, proyecciones, cercanía a zanjas, desniveles, talud, rocas cercanas al bloque a volar y/o

fracturar, palos, alambres, latas, botellas entre otros), a los que pueden estar expuestos trabajadores antes y durante la operación.

La Tabla 61. Matriz de Identificación de Aspectos e Impactos Ambientales en operación de voladura y/o fragmentación, muestra los aspectos e impactos identificados para la operación de voladura y/o fragmentación, los que se destacan el transporte, el almacenamiento, las operaciones y uso de explosivos, el señalamiento en los alrededores de la zona de fragmentación, corte y/o voladura, el manejo de material post voladura y/o fragmentación

AREA	ACTIVIDAD	ASPECTO	CLASIFICACION DEL IMPACTO	IMPACTO
Transporte	Transporte externo en vehículos	Movilización del explosivo a zona de almacenamiento	Derrame de sustancias al suelo	Medio
	Transporte interno manual	Movilización del explosivo zona de almacenamiento a zona de voladura	Derrame de sustancias al suelo	Medio
Almacenamiento	Almacenamiento de explosivo y accesorios	Clasificación del explosivo	Derrame de sustancias al suelo	Bajo
		Bodegaje y almacenamiento del explosivo	Derrame de sustancias al suelo	Bajo
		Bodegaje y almacenamiento de accesorios de voladura	Derrame de sustancias al suelo	Bajo
Operaciones y uso de Explosivos	Antes de la voladura	Inspección zona de voladura	Generación de ruido	Bajo
		Inspección alrededores de zona de voladura	Generación de ruido	Bajo
		Barrenado	Generación de ruido	Bajo
		Cargue del barreno	Derrame de sustancias al suelo	Medio
		Ubicación plasta	Derrame de sustancias al suelo	Bajo
		Puesta mecha y/o detonador	Caída de residuos al suelo	Bajo
	Durante la voladura	Detonación	Generación de ruido Generación de humos Generación de vibraciones	Alto Alto Bajo
		Control vibraciones	Generación de ruido	Bajo
	Después de la Voladura	Inspección zona de voladura	Generación de ruido	Bajo
		Inspección alrededores de zona de voladura	Generación de ruido	Bajo

Señalamiento en los alrededores de la zona de fragmentación, corte y/o voladura	Antes de la voladura	Puesta de encerramiento y señalización	Generación de ruido Contaminación visual Caída residuos de plástico al suelo	Bajo
	Durante la voladura	Vigilancia del área de encerramiento y señalización	Generación de ruido Contaminación visual Caída residuos de plástico al suelo	Bajo
	Después de la voladura	Retiro de encerramiento y señalización	Generación de ruido Contaminación visual Caída residuos de plástico al suelo	Medio
Manejo de material Post voladura y/o fragmentación	Acumulación de material con maquinaria	Acumulación de material	Generación de ruido Derrame de combustible Derrame de aceites Generación de humos y material particulado	Medio
		Carga de material	Generación de ruido Derrame de combustible Derrame de aceites Generación de humos y material particulado	Medio

*Tabla 61. Matriz de Identificación de Aspectos e Impactos Ambientales en operación de voladura y/o fragmentación  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).*

#### **6.14. Diagrama de procesos**

Los reglamentos y disposiciones establecidos para el trámite del permiso, referente a la adquisición de material explosivo, fijada por el Ministerio de Defensa Nacional, estipulan se debe realizar por medio del Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, dependencia de las fuerzas militares - Ejército Nacional de Colombia, organismo que a su vez es una dependencia de la Industria Militar Colombiana – INDUMIL, el que ejerce función de vigilancia, el Ministerio de transporte, en cuanto al uso y comercialización que es permitido de sustancias y accesorios explosivos, en donde se resalta que en Colombia existe un monopolio, en el cual el control total sobre estas sustancias y los accesorios explosivos, es ejercido por el Ministerio de Defensa Nacional.

El permiso es un documento mediante el cual se autoriza la adquisición y uso de explosivos en un periodo determinado, detallando el tipo, la cantidad y el sitio donde se hará el empleo de estos, por norma general para obtener el permiso el usuario debe estar inscrito ante el DCCAE; la vigencia del permiso empieza a contar a partir del 1 de enero hasta el 31 de diciembre de cada año. En caso de que el usuario haya solicitado el permiso en una fecha diferente dentro del lapso descrito, se autorizarán las cantidades justificadas del tiempo restante hasta el 31 de diciembre, durante este periodo las compras están determinadas y sujetas al cupo, actividad desarrollada y la duración del contrato sin que este vaya a superar la anualidad, en donde para realizar la ampliación del tiempo de vigencia del cupo debe presentarse un otrosí donde se especifique dicha modificación temporal; sí para la continuación del trabajo desarrollado se suscribe nuevo contrato, se expedirá un nuevo registro de cupo. Los requisitos deben ser presentados ante la seccional de la jurisdicción respectiva para la verificación del cumplimiento total de los mismos y posteriormente presentados en la seccional principal.

Se destaca de los protocolos de seguridad, establecidos para la verificación de antecedentes, trámites de registro, proceso de cotización, entrega y escolta militar, son adecuados, pero los tiempos de respuesta del Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, dependencia de las fuerzas militares, están sujetos a trámites con demasiada demora, lo que reduce la participación de la empresa privada en este aspecto, permitiendo él solo se pueda desarrollar esta actividad por empresas que cuentan con un stop de agente explosivo y accesorios

de voladura y las desarrolladas por el mismo Ejército Nacional de Colombia, se resalta además que esta demora en los procesos de trámite asociados a explosivos, es producto de las condiciones de seguridad y el conflicto armado interno que vive el país hasta la actualidad, lo que dificulta la flexibilización del mercado en el país, además esta es una de las razones que justifican el monopolio del mercado por parte de las fuerzas militares en el país y que además esté prohibida la importación al país de material explosivo, salvo en los casos que el explosivo no se produzca en el país y se cuente con la justificación adecuada en los requerimientos de dicho material y se cuente con el aval de las fuerzas militares para su importación.

Si se tienen en cuenta los tiempos requeridos desde el momento de la inscripción ante el DCCAE hasta el momento de la entrega del material explosivo con los accesorios necesarios para el desarrollo de la voladura, pueden transcurrir hasta 235 días hábiles (11 meses) para los usuarios registrados y aproximadamente 377 días hábiles (18 meses) para usuarios no registrados, teniendo en cuenta que un año tiene 260 días hábiles

La Tabla 62. Tiempo estimado en trámites para la adquisición de agentes explosivos y accesorios. Muestra los tiempos establecidos por la normatividad para dicho trámite, resaltando que la mayoría de los trámites se hacen en la misma entidad el Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, en donde se destaca además que la aprobación de esta documentación y procesos se encuentra centralizada en la Jefatura del comando central de la ciudad de Bogotá.

El Diagrama de flujo general para la identificación de zonas de alerta en el proceso de adquisición de explosivos y desarrollo de la voladura. Nos muestra las zonas de alerta en donde se pueden presentar las mayores demoras en tiempo en los trámites, que corresponde a zonas que se podría optimizar el proceso para hacer este proceso más ágil en lo referente a la expedición de y autorización de permisos en explosivos para la atención de eventos de voladura de bloque, tendientes a la recuperación de la movilidad.

La Tabla 62. Tiempo estimado en trámites para la adquisición de agentes explosivos y accesorios. Muestra un resumen de los procesos y tiempos aproximados en el trámite para la adquisición de

explosivos. Se destaca que estos tiempos son los reportados por las entidades involucradas en el proceso.

Ítem	TRAMITE	ENTIDAD	TIEMPO ESTIMADO
1	Inscripción solicitud de usuario y registro	Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE	3 a 7 días hábiles
2	Solicitud de trámite del permiso para la adquisición de material explosivo	Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE	15 a 45 días hábiles
3	Investigación de antecedentes. (Carta autorización)	Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE	15 a 30 días hábiles
4	Revisión de contrato y documentación 1. Copia del contrato que evidencie el vínculo entre las empresas de sísmica y cañoneo y las empresas operadoras y la certificación de los operadores con la Agencia Nacional de Hidrocarburos 2. En caso de ser un tercero adicionar Copia del contrato debidamente firmado por las partes (contratante y contratista), con el fin de demostrar la legalidad de la actividad con explosivos. 3. Certificado de idoneidad vigente para la manipulación de material explosivo y sus accesorios otorgado por una unidad de Ingenieros Militares.	Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE	15 a 60 días hábiles
5	Solicitud ampliación de vigencia (Formato de solicitud)	Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE	15 a 45 días hábiles
6	Solicitud para la autorización de cupo	Jefatura del Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE	15 a 60 días hábiles
7	Solicitud de inspección polvorines y zonas de almacenamiento * Copia de la solicitud a la Jefatura del Estado Mayor de la Unidad Operativa Menor o al Ejecutivo y Segundo comandante de Unidad Táctica en el Ejército Nacional, o sus equivalentes en la Armada Nacional o la Fuerza Aérea Colombiana	Jefatura del Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE	15 a 60 días hábiles
8	Cotización de material explosivo y accesorios	Industria Militar Colombiana - INDUMIL	3 a 15 días hábiles
9	Autorización de venta de material explosivo y accesorios	Industria Militar Colombiana - INDUMIL Jefatura del Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE	15 a 60 días hábiles
10	Registro y verificación del pago	Industria Militar Colombiana – INDUMIL Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE	3 a 15 días hábiles
11	Revisión y autorización de transporte y escolta militar	Jefatura del Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE	15 a 30 días hábiles

12	Entrega y despacho de material explosivo y accesorios	Industria Militar Colombiana - INDUMIL	3 a 10 días hábiles
----	---	--	---------------------

*Tabla 62. Tiempo estimado en trámites para la adquisición de agentes explosivos y accesorios*

*Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).*

De manera general desde el momento en el que se desarrolla un evento que potencialmente puede ser resuelto con una voladura de corte o fragmentación, en el presente documento se propone una división en 6 etapas, para el desarrollo y proceso de la voladura, etapas van desde la caracterización de los materiales directamente en el lugar de los hechos hasta el momento de cierre de la voladura, lo que permiten realizar una evaluación y análisis adecuado, así como establecer una correlación con los procesos anteriores y posteriores, permitiendo tener un conocimiento y control total de las actividades a desarrollar, las etapas en las que se divide el proceso y propuestas en el presente protocolo son las siguientes:

- Etapa 1. Caracterización de materiales
- Etapa 2. Solicitud y compra de explosivo
- Etapa 3. Transporte y almacenamiento de explosivos
- Etapa 4. Desarrollo de la voladura
- Etapa 5. Procesos postvoladura
- Etapa 6. Cierre de la voladura

El Diagrama 14. Diagrama de flujo general para el desarrollo de una voladura, presenta las etapas en las cuales se ha dividido la explicación para proceso de trámite y desarrollo de la voladura en el presente protocolo.

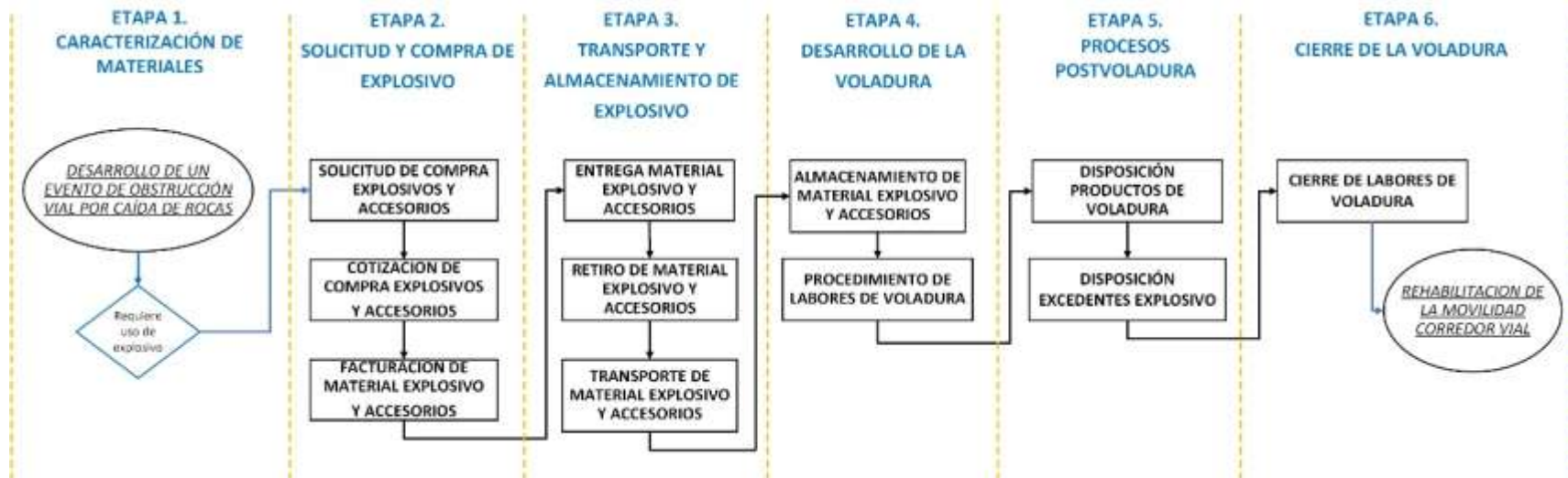


Diagrama 14. Diagrama de flujo general para el desarrollo de una voladura  
 Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

El diagrama anterior parte de la idea que al desarrollarse un evento de obstrucción vial, en éste es caracterizado su material por características mecánicas, resistencia y tamaño, se ha establecido que se debe realizar un proceso de voladura, a fin de rehabilitar el sector, desde esta condición el diagrama nos muestra la combinación de procesos que hacen parte de las diferentes etapas para el desarrollo de una voladura, es de destacar que este combina etapas relacionadas a los aspectos técnicos como lo puede ser el proceso de transporte o almacenamiento de explosivos y/o accesorios, etapas de tipo administrativo como lo son los procesos de solicitud y cotización del material explosivo y/o accesorios, y la etapa de cierre donde encontramos los procesos de reapertura y rehabilitación de la zona intervenida, aspectos que son fundamentales en el desarrollo adecuado en el desarrollo de una voladura.

Es de destacar que en algunas de estas etapas se requieren la participación de otras entidades, en especial de orden territorial, las cuales deben dar apoyo de tipo logístico en el control del comportamiento de la población en cuanto a la dinámica vial o curiosos que pueden intentar acceder al área de control por procesos de voladura, esto a fin de realizar una operación de tipo complementario entre los entes partícipes en el proceso.

A continuación, para su mejor entendimiento, se presentan una breve descripción de cada una de las seis etapas en las que se ha dividido el proceso:

**Etapas 1. Caracterización de materiales:** ante la manifestación de un evento que potencialmente puede ser solucionado mediante el uso de una voladura, en etapa se identifica y caracteriza el material que genera la obstrucción, posterior a la identificación y evaluación del material para definir el uso de explosivos, se establece como fundamento el establecer la resistencia del bloque de roca a la compresión, en donde la resistencia de la roca y el volumen de esta son los parámetros claves para establecer el tipo de explosivo y la cantidad necesaria para realizar la voladura o fragmentación del bloque de roca.

**Etapas 2. Solicitud y compra de explosivo:** de manera general acá se encuentran todos los pasos y procesos necesario para la adquisición de explosivos, en donde es fundamental el informe anexo de cantidad solicitud de explosivos, básicamente es un esquema general del diseño de la voladura en

donde se establece las características de la voladura y se describe cantidades aproximadas y como se utilizará el explosivo y accesorios durante el desarrollo de la voladura, los formatos de esta solicitud y presentación del informe ante el Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE solo puede ser realizada por empresas o personas registradas ante esta entidad.

El Diagrama 15. Solicitud de compra de material explosivo y accesorios, el diagrama nos presenta de manera general las etapas y los aspectos a tener en cuenta y que se deben cumplir en los procesos de adquisición de explosivos destacando: a. solicitud de compra explosivos y accesorios, b. cotización de compra explosivos y accesorios, c. facturación de material explosivo y accesorios, d. entrega material explosivo y accesorios; es de tener en cuenta que el ítem a. solicitud de compra explosivos y accesorios solo debe ser realizado por una empresa o persona registrada ante el Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE, de no estar registrado ante esta entidad se debe realizar el proceso de registro ante este organismo, o toda solicitud será rechazada, además este organismo es quien autoriza el cupo respectivo para las operaciones a desarrollar, nos muestra además el ítem b. cotización de compra explosivos y accesorios las etapas previas al proceso de cotización en donde se resalta la presentación de un informe técnico el cual debe especificar las características del polvorín es decir donde se almacenara el material explosivo y los accesorios previo a la operación de voladura y las especificaciones de los camiones para el transporte y escolta del material explosivo y accesorios de voladura, es de resaltar que el servicio de transporte puede ser solicitado y cotizado ante INDUMIL en cuyo caso se realizara con el apoyo del Ejército Nacional de Colombia la cual dará apoyo militar para la escolta o con una empresa de seguridad especializada en el sector en cuyo caso contara con escolta privada, el ítem c. facturación de material explosivo y accesorios, está sujeto a la aprobación de los informes de almacenamiento y transporte del material, aprobados estos se entra a verificar las existencias del material solicitado en las instalaciones de la jurisdicción y de no estar este material en las está jurisdicción, se procede a realiza la solicitud de pedido y envió de material explosivo y/o accesorios a otra jurisdicción presente en el país a fin de dar cumplimiento a la entrega de este insumo, el ítem d. entrega material explosivo y accesorios, está sujeto a la realización del pago de los montos de este insumo y verificación de dicho pago por parte de INDUMIL, realizada la verificación se expide la autorización para el retiro del insumo mediante la expedición del salvoconducto de retiro de materia explosivo, documento expedido por la oficina de control comercio de armas y explosivos de la jurisdicción.

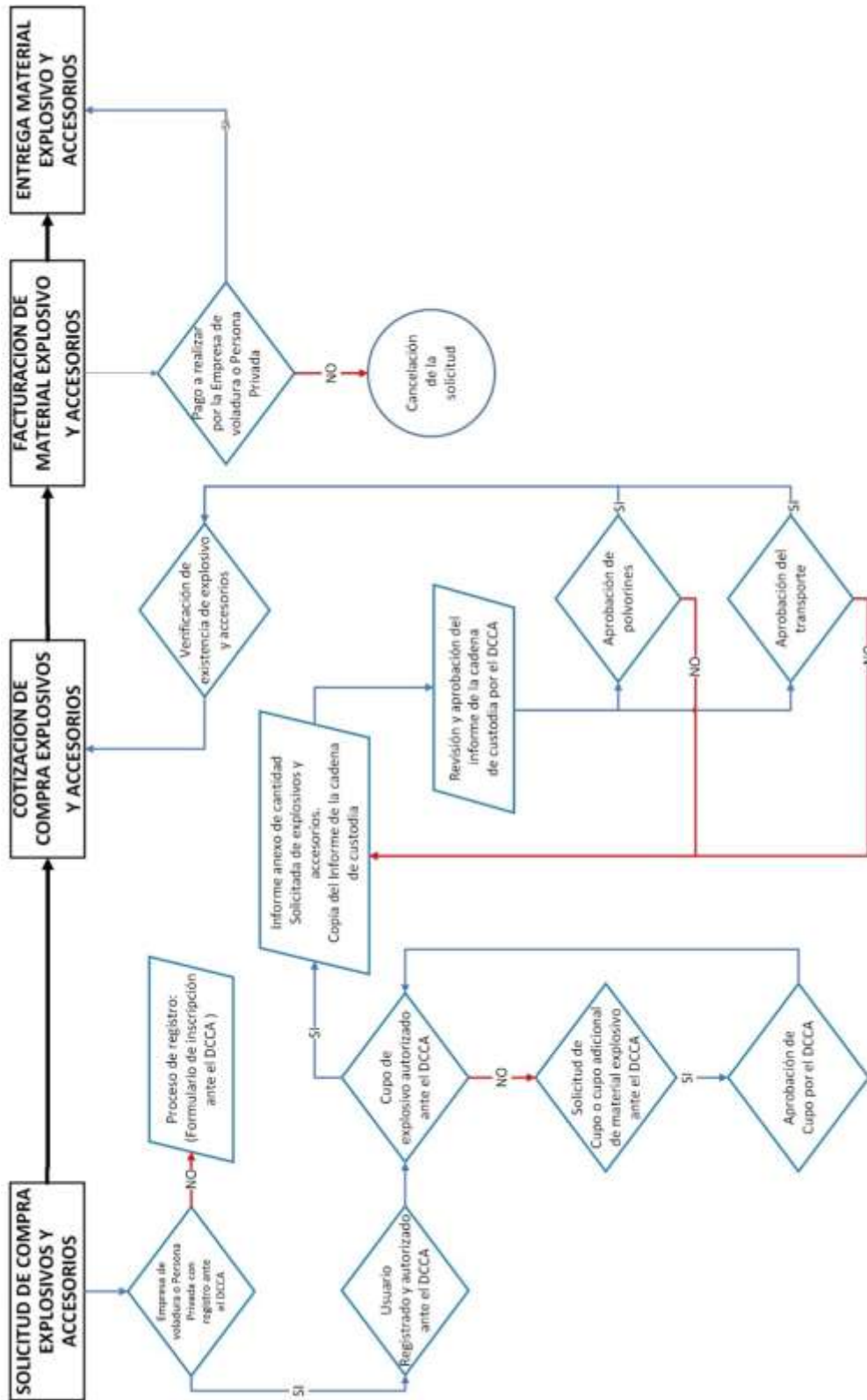


Diagrama 15. Solicitud de compra de material explosivo y accesorios  
 Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

**Etapa 3. Transporte y almacenamiento de explosivo:** en la etapa que comprende el proceso de transporte se divide en 2 el transporte manual que hace referencia a la carga y descarga del material explosivo y sus accesorios en donde por protocolo a fin de evitar accidentes se establece que estos deben ser transportados por separado, por zonas en donde no se presente influencia de campos eléctricos o magnéticos amplios, hay que tener en cuenta que el transporte manual se realiza a velocidad constante y evitando el mínimo de impactos y vibraciones a los materiales transportados. Por otra parte, el transporte vehicular usado para trasladar el material explosivo y sus accesorios de manera general debe ser un vehículo con carrocería sólida y contar con las características específicas de aislamiento interno, marcado con logos o tener los pictogramas de seguridad respectivos, garantizar la protección del material explosivo y/o accesorios de voladura, en caso de que se requiera de varios vehículos se debe mantener la distancia mínima entre vehículos y mantenerse por debajo de los permisibles de velocidad. Respecto al almacenamiento de explosivos el polvorín debe dar cumplimiento a las condiciones de seguridad durante los periodos de almacenamiento de explosivos, dicho polvorín debe cumplir además con los acondicionamientos y avisos de peligro según lo establece la normatividad vigente y las recomendaciones adicionales del Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos - DCCAE

El Diagrama 16. Retiro de material, transporte y almacenamiento de materia explosivo y accesorios, se muestra el proceso de retiro de material explosivo, el cual se realiza presentando en las instalaciones de INDUMIL los formatos de retiro y la autorización expedida por la jurisdicción del DCCAE, en las instalaciones se realizará verificación e inspección al transporte, en cuanto a sus características técnicas y mecánicas, así como a la zona de almacenaje la cual debe garantizar que tanto el material explosivo y los accesorios deben ser transportados por separado. En cuanto al polvorín en donde se realizará el proceso de almacenamiento del material explosivo y los accesorios de voladura, este debe garantizar que el almacenamiento se debe realizar por separado garantizando que se puedan realizar los procesos de salida del material sin interrupciones además de que el polvorín debe estar ubicado en una zona cercana al desarrollo de la voladura pero teniendo atención y garantizando que no se generen procesos de simpatía que puedan generar una detonación del material almacenado.

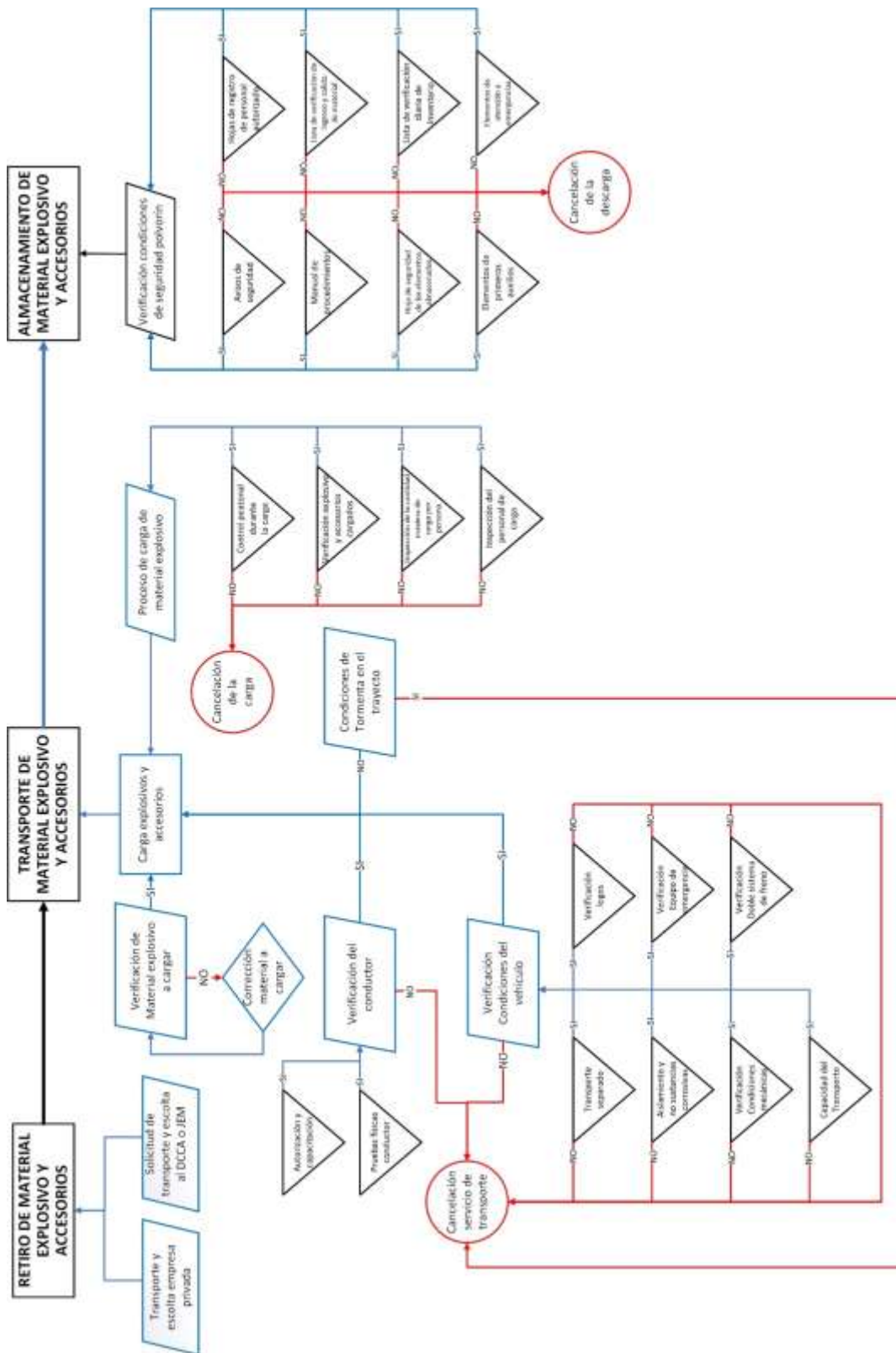


Diagrama 16. Retiro de material, transporte y almacenamiento de materia explosivo y accesorios  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

**Etapas 4. Desarrollo de la voladura:** el desarrollo de las actividades de voladura no solo comprende el desarrollo y ejecución del tipo de voladura seleccionada para realizar la fragmentación del bloque de roca, encontramos voladura de plasteo las que requieren un sistema de cubierta para garantizar el confinamiento del explosivo y voladura de cachorro la cual requiere incurrir en procesos de perforación, la selección del método de voladura depende del tamaño del bloque de roca a fragmentar y de las características mecánicas, resistencia y ubicación del mismo, además involucra acciones de seguridad, estas no solo están encaminadas a garantizar la seguridad del personal involucrado en el desarrollo de la operación, también incorpora medidas de tipo social para los habitantes y demás personas que se encuentren en los alrededores del área de la operación, se incorporan labores seguridad como el desarrollo de demarcación del área a afectar, cierres de tipo preventivo y de seguridad, así como inspecciones al área, desarrollo de perifoneo y activación de alarmas antes de la operación, es de resaltar que estas actividades se realizan con el acompañamiento de instituciones como la Policía Nacional, Defensa Civil, Cruz Roja y la Junta de Acción Local.

**Etapas 5. Procesos postvoladura:** el proceso de postvoladura de manera general consiste en el desarrollo de actividades tendientes a la disposición final de los productos postvoladura, estos materiales pueden ser dispuestos en una escombrera o dependiendo de las características del bloque, pueden pasar a hacer parte del material de afirmado vial, con un previo proceso manual de reducción de tamaño.

El Diagrama 17. Proceso de voladura y manejo de productos postvoladura, se muestran en el proceso de voladura, cuyas actividades dependen netamente de la evaluación geológica y la caracterización del bloque a fragmentar, el diagrama nos muestra las actividades previas referentes al proceso de evaluación del método y selección de técnica de fragmentación, además de aspectos de seguridad posteriores a la voladura, además de mostrar que se debe tener en cuenta para el proceso de disposición de los productos de voladura, en donde el manejo de estos depende netamente de las características del material y del tamaño que estos adquieran después de la voladura, tradicionalmente se llevan estos materiales para ser dispuestos en una escombrera, pero se encuentran casos donde se disponen de otras maneras.

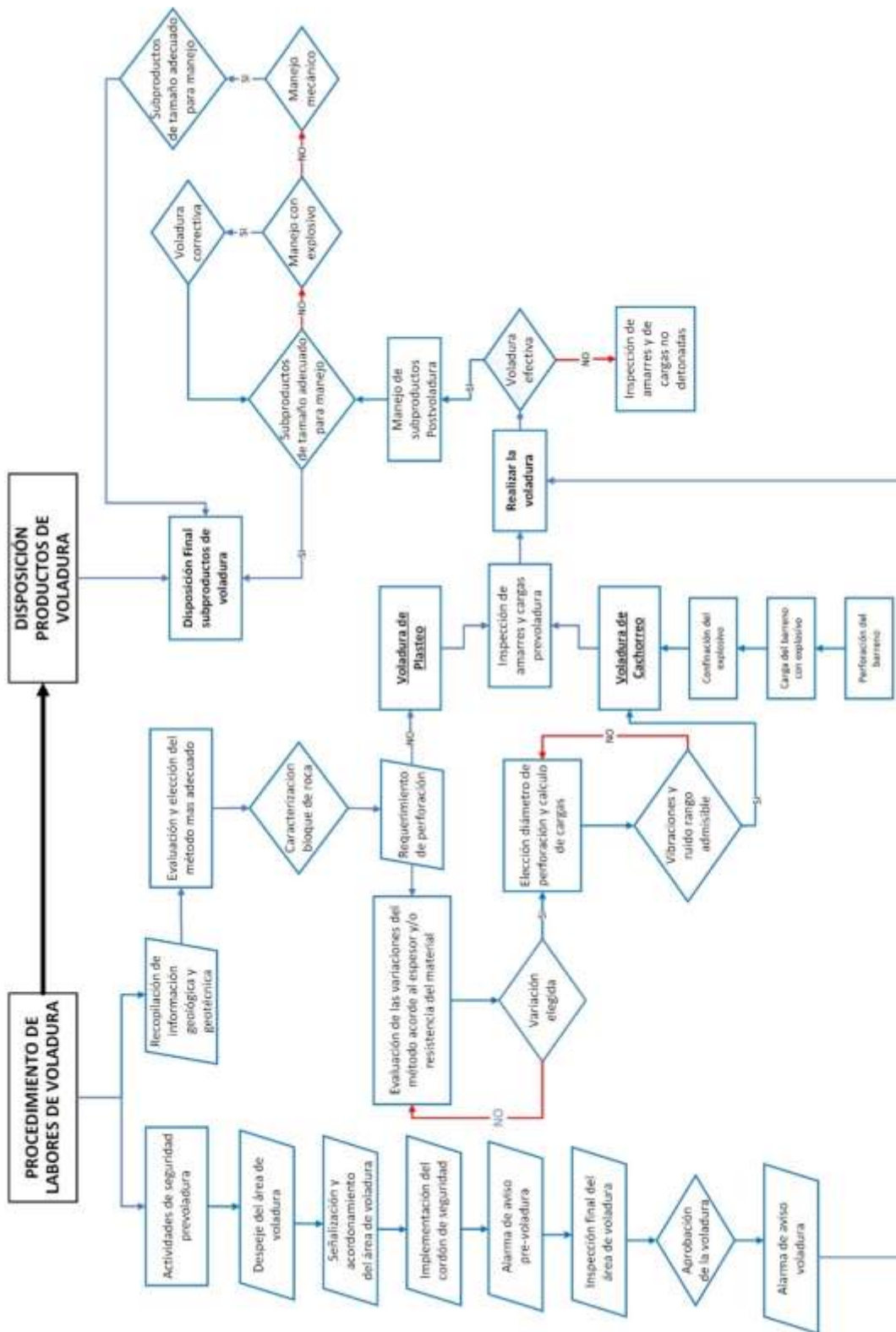


Diagrama 17. Proceso de voladura y manejo de productos postvoladura  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

**Etapa 6. Cierre de la voladura:** el proceso de cierre de la voladura es el proceso que comprende la rehabilitación del sector donde se desarrollo la voladura, previamente a la apertura del sector se debe realizar inspección al área para garantizar que todas las cargas detonaron con éxito, garantizado esto se procede a realizar la disposición final del explosivo sobrante, el cual puede ser transportado a un centro de almacenamiento, es enterrado o es incinerado, garantizando su degradación, posteriormente se realizar inspección de posibles efectos o afectaciones y finalmente se procede al retiro del encerramiento y rehabilitación del área intervenida

El Diagrama 18. Cierre de la voladura, nos muestra los procesos asociados a la disposición final de excedentes de explosivos y cierre de la misma a fin de dar finalización del proceso con la rehabilitación del corredor vial.

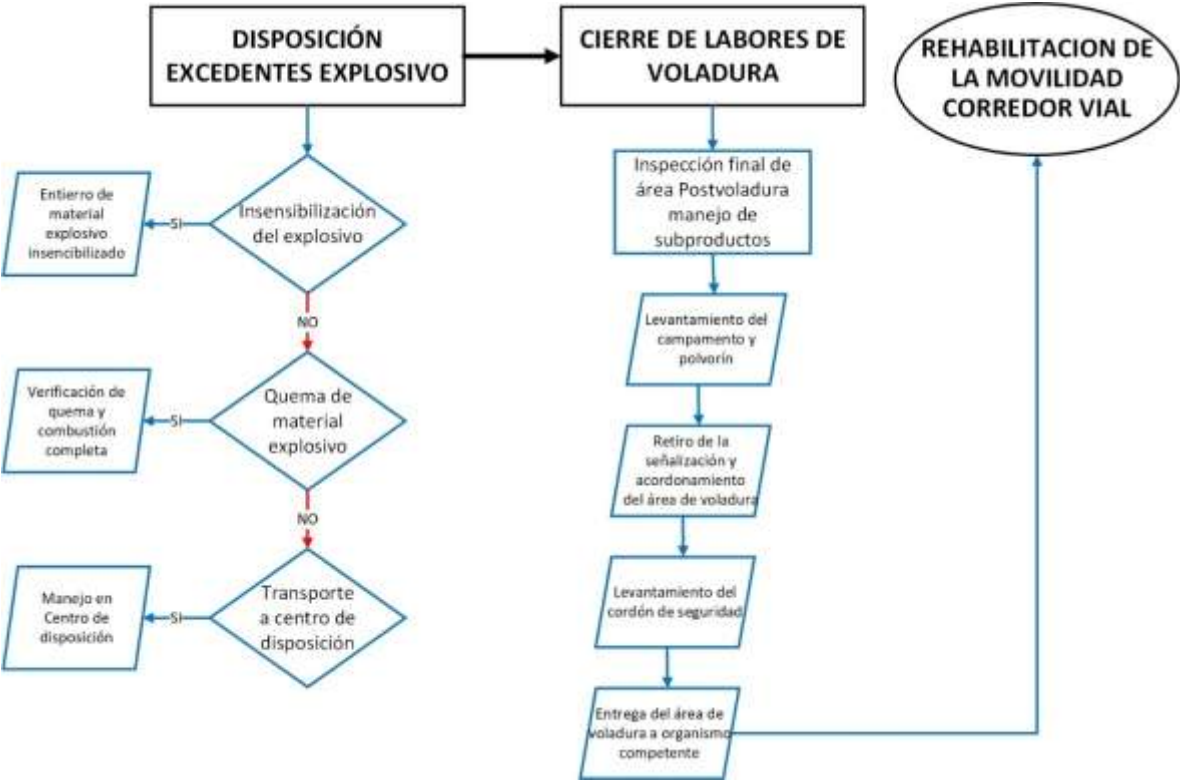


Diagrama 18. Cierre de la voladura  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

## RECOMENDACIONES

Uno de los objetivos que se pretende cumplir con el desarrollo del presente proyecto es la elaboración de una propuesta de protocolo con la metodología para la mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura, dicho protocolo es un procedimiento normalizado y estandarizado a la estructura formal y legal dispuesta en la normatividad colombiana, el cual sigue todos los procesos y documentos establecidos como requisito hasta la fecha para la adquisición de explosivos y accesorios de voladura.

Desde este aspecto al hacer la revisión de los procesos, procedimiento y documentos necesarios para la adquisición de explosivos y accesorios de voladura, se identifican algunos puntos críticos basados en la evidencia práctica y documental, los que deben ser revisados a fin de garantizar y asegurar un nivel de calidad en el proceso en la adquisición de este insumo.

### Identificación de puntos críticos

De manera general los puntos críticos están asociados a las demoras en los trámites asociado a la verificación de documentos, formularios e informes para el uso del explosivo y los accesorios de voladura, aspectos que están relacionados con el monopolio del estado en esta industria, lo que se encuentra amparado en el artículo 223 de la Constitución Política de Colombia la que indica «Sólo el Gobierno puede introducir y fabricar armas, municiones de guerra y explosivos. Nadie podrá poseerlos ni portarlos sin permiso de la autoridad competente», y lo establecido en el Decreto 334 de 2002 mediante el cual se establecen normas en materia de explosivos en Colombia respecto a: Importación, Fabricación, Distribución, Distribución, Transporte y Consumidor final; Campo de aplicación; Materias primas y sustancias que sin ser individualmente explosivas, en conjunto, conforman sustancias explosivas y elementos que sin serlo de manera original, mediante un proceso pueden transformarse en explosivos; Adquisición y pérdida de la calidad de usuario de explosivos y restricciones al explosivo, con estas condiciones establecidas de manera permanente en el territorio nacional dadas las características del conflicto armado en Colombia y dadas las características propias del explosivo y que este puede ser usado como insumo de guerra, en atentados terroristas, desde esta perspectiva el estado ha mantenido el control en la fabricación, distribución, comercialización e importación de este insumo para obras civiles y minería.

Partiendo de la idea de que el monopolio de esta industria continuará en manos del estado, se han establecido recomendaciones para optimizar y reducir los tiempos de entrega de este insumo a los operadores privados y estatales que estén interesados en participar de esta actividad.

A continuación, se presentan los puntos críticos identificados y las recomendaciones establecidas para cada uno de ellos:

**Punto crítico N. 1. Identificación del preliminar del evento y caracterización de los materiales (Etapa 1)**

Al presentarse un evento, se realiza una identificación y caracterización preliminar de los materiales involucrados en el evento, por parte del administrador de la vía, con el cual se realiza la solicitud al comando militar de la jurisdicción o a un operador privado autorizado a realizar voladuras, en el caso de que esta voladura sea realizada por el Ejército Nacional de Colombia, esta es sometida a procesos de verificación por parte de la Comitiva Militar y con este reporte se autoriza el desplazamiento del personal de voladura, este proceso involucra más tiempo en la atención del evento, los cuales se pueden extender hasta 45 días dependiendo de las características de la vía y la disponibilidad de personal militar en la jurisdicción del evento; por otra parte, si se realiza con una empresa privada se depende de los tiempos en que esta realice la inspección al lugar de los hechos, lo que ya depende de las negociaciones entre el operador vial y la empresa. Los cuales se pueden extender hasta 30 días con los operadores privados y hasta un año con los municipios, dependiendo de disponibilidad presupuestal del ente territorial.

**Recomendación al punto crítico N. 1 (Etapa 1)**

Se recomienda que, al hacer la solicitud de voladura a la Jurisdicción militar, esta se realice con un informe con fines de voladura detallando las características del material (resistencia, volumen del bloque) y registro fotográfico y videos del área afectada, el cual debe ser realizado por personal calificado. Esto dado que algunas solicitudes solo se limitan a indicar el lugar del evento.

## **Punto crítico N. 2. Voladura realizada por el Ejército Nacional de Colombia (Etapa 1)**

Muchas de las atenciones a eventos de despeje vial, que requieren explosivos son atendidas por el Ejército Nacional de Colombia y dado que no todas las jurisdicciones cuentan con personal experto en explosivos, se debe esperar a que el personal experto esté en la zona, razón por la que no todas las jurisdicciones cuentan con personal disponible para esta labor, lo que involucra que se deba esperar a que el comando a cargo de este material este en la jurisdicción, lo que puede presentar demoras en la atención a los eventos.

### **Recomendación al punto crítico N. 2. (Etapa 1)**

Ante la necesidad de atención a eventos en especial en los periodos invernales y dado que ya hay áreas críticas identificadas en el territorio nacional, se puede considerar el tener personal militar disponible para estas labores en las diferentes jurisdicciones, los cuales estén en la capacidad y posibilidad de atender eventos de baja a mediana magnitudes en las diferentes regiones del país, a fin de evitar reducir tiempos de desplazamiento, lo que permitiría el agilizar las autorizaciones de intervención y operación desde el comando central.

El Diagrama 19. Identificación de puntos críticos. Etapa 1. Muestra los puntos donde se pueden generar puntos alertas o problemas asociados a la etapa 1 del proceso, correspondiente a la caracterización del material y la entidad que realizará la operación de voladura.



*Diagrama 19. Identificación de puntos críticos. Etapa 1.  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).*

**Punto crítico N. 3. Proceso de registro ante el Departamento Control Comercio de Armas y Explosivos -DCCAE (Formulario de inscripción ante el DCCAE) (Etapa 2)**

Los procesos de registro ante el Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, pueden ser demorados debido a que la verificación de antecedentes los que solo son realizados por el comando central del Ejército Nacional de Colombia, en donde la Inscripción solicitud de usuario y registro, puede tardar de 3 a 7 días hábiles; la Solicitud de trámite del permiso para la adquisición de material explosivo puede tardar de 15 a 45 días hábiles; la Investigación de antecedentes puede tardas de 15 a 30 días hábiles; y la Revisión de contrato y documentación puede tardar de 30 a 60 días hábiles, lo que significa un total de 142 días hábiles para obtener la autorización y el registro de cupo para poder adquirir y operar explosivos

### **Recomendación al punto crítico N. 3. (Etapa 2)**

Al ser esta etapa de trámites de tipo administrativo, se pueden adelantar en las distintas jurisdicciones, los que pueden adelantar procesos de verificación y registro en las diferentes zonas del país y no depender únicamente del comando central, optar por procesos de descentralización de los trámites e identificar los puntos en los cuales podría participar cada uno de los comandos.

### **Punto crítico N. 4. Aprobación de cupo por el Departamento Control Comercio de Armas y Explosivos - DCCAE (Etapa 2)**

La solicitud para la aprobación y autorización del cupo de explosivos por parte del Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, puede tardar de 15 a 60 días hábiles

### **Recomendación al punto crítico N. 4. (Etapa 2)**

Se recomienda que las distintas jurisdicciones puedan realizar aprobación de cupo, a fin de realizar la descongestión del comando central y optimizar los tiempos de aprobación.

### **Punto crítico N. 5. Solicitud de Cupo o cupo adicional de material explosivo ante el Departamento Control Comercio de Armas y Explosivos - DCCAE (Etapa 2)**

La solicitud para la aprobación y autorización de cupo adicional de explosivos, por parte del Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, puede tardar de 15 a 60 días hábiles, además dependiendo del cupo que haya sido asignado con anterioridad el cupo adicional puede ser negado o demorado hasta que se realice inspección de verificación.

### **Recomendación al punto crítico N. 5. (Etapa 2)**

Se recomienda que las distintas jurisdicciones puedan realizar aprobación de cupo adicional, a fin de realizar la descongestión del comando central y optimizar los tiempos de aprobación.

### **Punto crítico N. 6. Revisión y aprobación del informe de la cadena de custodia por el Departamento Control Comercio de Armas y Explosivos - DCCAE (Etapa 2)**

Los informes son revisados únicamente por la jurisdicción del comando central del Ejército Nacional de Colombia, en donde residen todos los informes para su revisión y aprobación, en donde dado el número de solicitudes puede tardar de 15 a 60 días hábiles, después de haber sido asignado el inspector para revisor

#### **Recomendación al punto crítico N. 6. (Etapa 2)**

Se recomienda que las distintas jurisdicciones puedan realizar la aprobación del informe de la cadena de custodia, a fin de realizar la descongestión del comando central y optimizar los tiempos de aprobación, exceptuando los casos considerados especiales en donde se requiera una logística particular.

### **Punto crítico N. 7. Verificación de existencia de explosivo y accesorios (Etapa 2)**

La revisión de existencias de material explosivo y accesorio pueden demorar entre 3 y 15 días hábiles, una vez verificada la existencia de del material, se inicia los trámites de Autorización de venta de material explosivo y accesorios ante la Industria Militar Colombiana – INDUMIL, con el previo aval de la Jefatura del Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, tramite que puede demorar de 15 a 60 días hábiles.

Por otra parte, de no existir el material en las bodegas de la jurisdicción, se solicita hacer revisión del inventario en las demás jurisdicciones (Sibaté, Sogamoso y Cerrejón), lo que implica tiempos de retraso en este proceso.

#### **Recomendación al punto crítico N. 7. (Etapa 2)**

Dada la rotación del personal de bodega por protocolo militar de seguridad y que no se encuentran estos familiarizados con los procesos de inventario y verificación, los procesos de inspección suelen

ser demorados, a lo que se recomienda generar bases de datos con protocolos de seguridad y no realizar la rotación de personal de una forma tan cercana.

El Diagrama 20. Identificación de puntos críticos Etapa 2. Nos presenta los puntos donde se pueden generar puntos alertas o problemas asociados a la etapa 2 del proceso, correspondiente al registro ante el DCCAE (Formulario de inscripción ante el DCCAE); la Aprobación de Cupo por el DCCAE; la Solicitud de Cupo o cupo adicional de material explosivo ante el DCCAE; la Revisión y aprobación del informe de la cadena de custodia por el DCCAE y la Verificación de existencia de explosivo y accesorios.

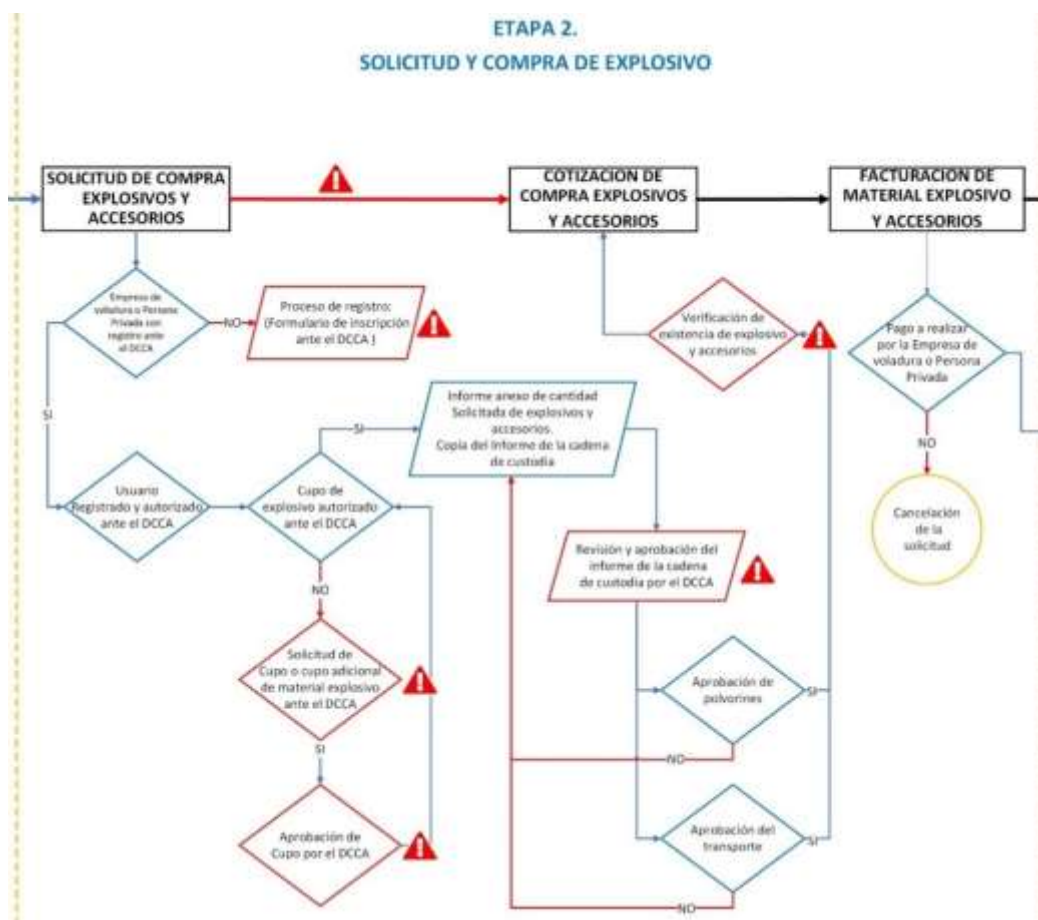


Diagrama 20. Identificación de puntos críticos Etapa 2.  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

### Punto crítico N. 8. Solicitud de retiro de material (Etapa 3)

Dadas las características del explosivo los sistemas de verificación de los vehículos en algunos casos son sobredimensionados, lo que permite un amplio factor de seguridad, pero reduce la participación de vehículos que podrían cumplir con esta tarea, ejemplo la exigencia de doble conductor lo cual no es necesario en trayectos cortos.

### Recomendación al punto crítico N. 8. (Etapa 3)

Revisar los procesos de entrega y verificación y adaptarlos a la cantidad de material a transportar y las distancias de recorrido

El Diagrama 21. Identificación de puntos críticos Etapa 3. Nos presenta el punto donde se puede generar punto alerta o problemas asociados a la etapa 3 del proceso, correspondiente a la solicitud de retiro de material



Diagrama 21. Identificación de puntos críticos Etapa 3.  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

#### **Punto crítico N. 9. Verificación de condiciones de seguridad polvorín (Etapa 4)**

Los procesos de verificación del polvorín por parte de la Jefatura del Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, puede demorar entre 15 y 60 días hábiles, a pesar de que en algunos casos el polvorín será usado solo de manera temporal, los tiempos de inspección y verificación pueden demorar más que el uso de esta instalación.

#### **Recomendación al punto crítico N. 9. (Etapa 4)**

Verificar y clasificar los tiempos de las labores de voladura y acorde al tiempo de estas, mejorará los procesos a aquellas voladuras que se pueden realizar en menos de un día o cuyo proceso tarde pocos días, al dar prioridad a estas voladuras, se puede garantizar procesos de despeje vial en especial en vías secundarias y terciarias donde se presentan eventos de menor tamaño.

#### **Punto crítico N. 10. Almacenamiento de material explosivo y accesorios. (Etapa 4)**

Para el desarrollo de una voladura se exige que este deba ser almacenado en un polvorín, el que debe cumplir con las especificaciones técnicas establecidas por INDUMIL, en donde en algunos casos las especificaciones del polvorín pueden incurrir en la construcción de una estructura que solo se va a usar un par de días.

#### **Recomendación al punto crítico N. 10. (Etapa 4)**

Tener en cuenta que hay voladuras que no requieren la instalación de un polvorín, dado que su duración no excede un par de días por lo que se puede adecuar un lugar temporal, desde que se mantenga el agente explosivo separado de los accesorios de voladura y no se almacene explosivo al cual ya se le haya realizado la mezcla, se pueden usar incluso modificar containers y adaptarlos a los requerimientos de un polvorín, los que pueden ser suministrados y alquilados por INDUMIL para estas labores de corta duración.

El Diagrama 22. Identificación de puntos críticos. (Etapa 4). Nos presenta el punto donde se puede generar punto alerta o problemas asociados a la etapa 4 del proceso, correspondiente al almacenamiento de material explosivo y accesorios.

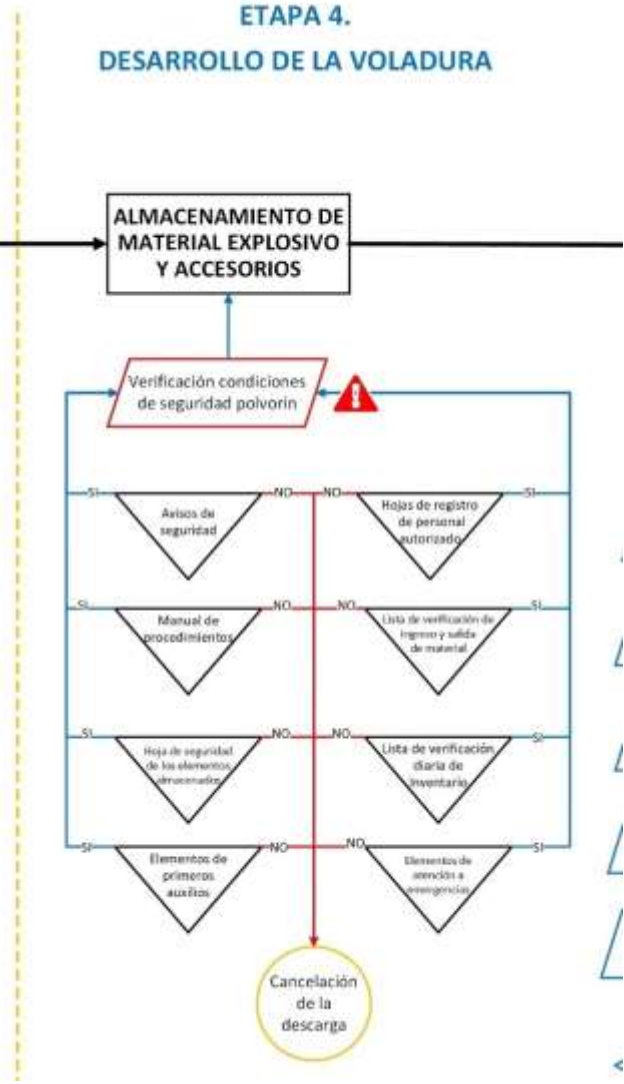


Diagrama 22. Identificación de puntos críticos. (Etapa 4).  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

**Punto crítico N. 11. Disposición final subproductos de voladura. (Etapa 5)**

El desarrollo de voladuras genera subproductos que de manera tradicional son dejados a borde de carretera, en especial en las zonas rurales. En vías principales se contrata un servicio de volquetas para disponer los subproductos en una escombrera.

#### **Recomendación al punto crítico N. 11. (Etapa 5)**

Garantizar que en todos los procesos de voladura, se realice algún proceso para el manejo de subproductos.

#### **Punto crítico N. 12. Manejo de subproductos postvoladura. (Etapa 5)**

En el desarrollo de voladuras, de manera tradicional los subproductos son dejados a borde de carretera, en las zonas rurales con ayuda de la comunidad se realiza un proceso de retritución del material de forma manual y este se usa como material de afirmado de la carretera veredal y caminos de herradura y caminos de algunas fincas.

#### **Recomendación al punto crítico N. 12. (Etapa 5)**

Garantizar que en todo proceso de voladura sin importar donde se realice, involucre un proceso de manejo de subproductos, el cual debe estar contemplado en el informe de las labores realizadas.

#### **Punto crítico N. 13. Insensibilización del explosivo. (Entierro de material explosivo insensibilizado) (Etapa 5)**

Teniendo en cuenta que una de las formas para el manejo de los excedentes de explosivo, posterior al desarrollo de una voladura, es el entierro de esta sustancia y partiendo del principio de que el componente fundamental del explosivo es nitrato de amonio, en donde el nitrato de amonio es un compuesto químico formado por dos unidades, el ion nitrato y el ion amonio, y que se usa principalmente como fertilizante, porque tiene un alto contenido de nitrógeno. Tanto el nitrato como el amonio son utilizados por las plantas; el nitrato es aprovechado en forma directa, mientras que el amonio es convertido en abono. Este proceso resulta ser la mejor forma de manejo en zonas rurales.

### **Recomendación al punto crítico N. 13. (Etapa 5)**

Utilizar abundante agua para insensibilizar el explosivo, lo que se puede garantizar por medio de inspección visual, observando las esferas (prill) las cuales se deterioran al ser hidratadas, garantizando la pérdida de su propiedad explosiva.

En los procesos de entierro de material con sobre saturación de agua, se debe tener en cuenta el no estar cerca de cuerpos hídricos de tipo lagunas o humedales, dado que se puede favorecer el proceso de eutrofización.

### **Punto crítico N. 14. Quema de material explosivo. (Etapa 5)**

Cuando no se puede transportar para disponerlo en otro lugar o enterrarlo, se recurre a la quema de este material, cuando se realiza quema del nitrato de amonio, este se descompone y emite óxido nitroso y vapor de agua, dadas estas características hay que realizar la quema al aire libre, ya que si se encuentra en un espacio cerrado, puede explotar, por otra parte, el nitrato de amonio es un agente oxidante que no se quema fácilmente por sí solo, pero se puede acelerar la combustión agregando algo de materiales combustible

### **Recomendación al Punto crítico N. 14. (Etapa 5)**

La quema del nitrato de amonio se debe realizar al aire libre en un espacio abierto a fin de evitar que explote, dado que las explosiones se generan únicamente cuando este material se encuentra en un espacio confinado.

El Diagrama 23. Identificación de puntos críticos. (Etapa 5)

ETAPA 5.  
PROCESOS POSTVOLADURA

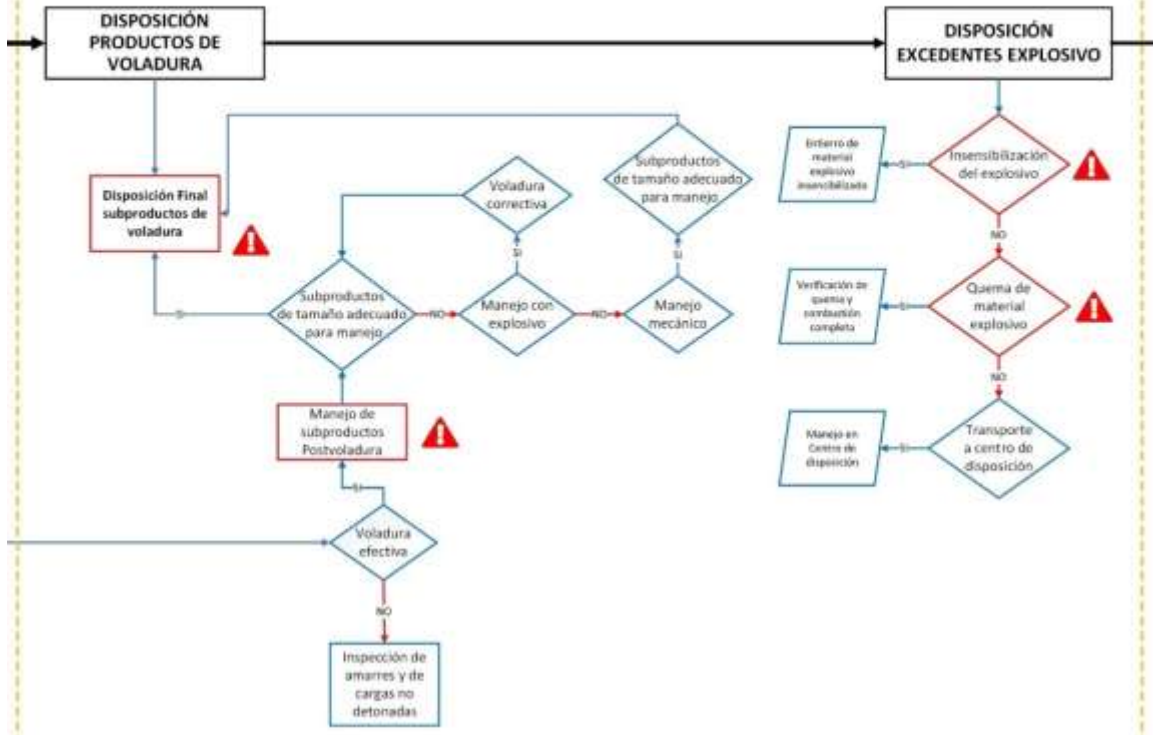


Diagrama 23. Identificación de puntos críticos. (Etapa 5)  
Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE ALERTA PROCEDIMIENTO ASOCIADOS AL DESARROLLO DE VOLADURAS PARA DESPEJE VIAL

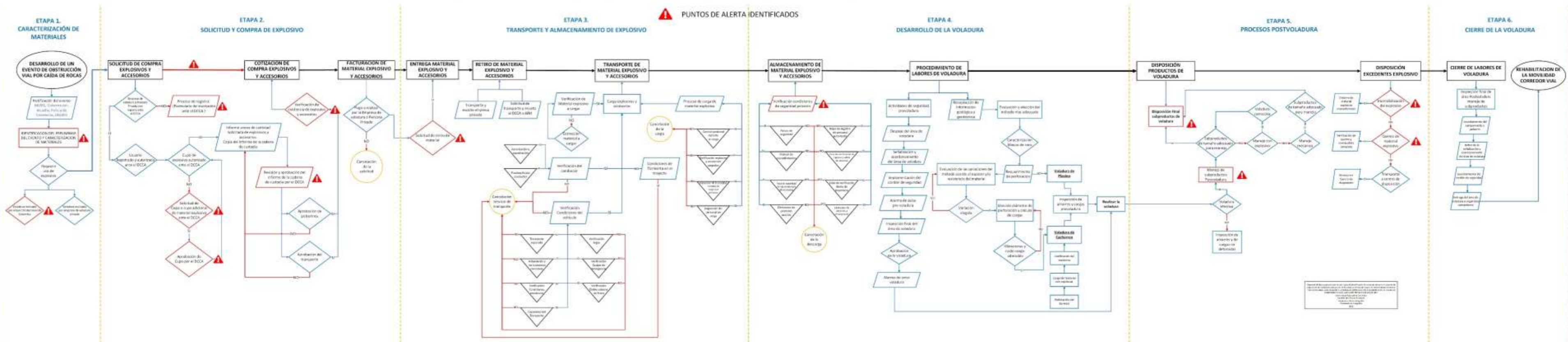


Diagrama 24. Diagrama de flujo general para la identificación de zonas de alerta en el proceso de adquisición de explosivos y desarrollo de la voladura. Fuente: El autor (2025) (Elaboración propia).

## CONCLUSIONES

A partir de la evaluación y análisis de los aspectos teóricos, aspectos técnicos, consultados que se relacionaron para el desarrollo de esta tesis doctoral, se puede concluir que:

- Se concluye y resalta de la revisión bibliográfica que actualmente este es el primer protocolo en Colombia y Latinoamérica, desarrollado con el fin de enfocar el uso de explosivos con fines civiles en el desarrollo de despejes de corredores viales en un «Método para la mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura», en donde además de incorporar aspectos de la legislación colombiana, se fundamenta en aspectos técnicos y desarrollo de voladuras en proyectos reales, en los que se establece que los efectos de una voladura diseñada bajo los parámetros técnicos adecuados, no genera impactos en términos de vibraciones, las que se controlan de manera estricta para minimizar daño en los alrededores, garantizando la protección de las obras civiles, la protección del ambiente y la población.
- El desarrollo teórico de la fragmentación y los productos de voladura son un tema activo, discutido y controversial, en la actualidad, aclarando que al no existir hoy en día un concepto que explique la fragmentación considerando todas las variables, sin embargo, se considera de manera recurrente por los autores que hay un estado de choque que es el producto del impacto violento asociado a la repentina aplicación de presión de detonación de la columna explosiva y la consecuente presión sobre el pozo, y un estado de explosión el cual es generado por el efecto retardado de los empujes asociados a la expansión de los gases a alta presión y temperatura, citando una de las primeras teorías que explica la fragmentación la Teoría de la Onda de Choque (Hino & Moria, 1956), se establece que la detonación de una carga explosiva crea una onda de choque de tipo compresivo que es transferida a la roca o bloque, producto del impacto violento, este impacto la fracciona y provoca una onda de compresión que es propaga por el medio sólido hasta alcanzar una superficie libre, donde se verá reflejada como una onda de tracción, que actualmente es lo que se asume en la mayoría de los modelos de mecanismos de fractura por tracción de (Djordjevic, 1999), además de la expansión y abertura de fracturas preexistentes debido a la penetración rápida de gases.

- De la evaluación de los diferentes criterios teóricos y empíricos se establece que en el desarrollo de un diseño o la ejecución de una malla de voladura, es fundamental realizar una caracterización detallada a nivel geológico y geotécnico del área a volar, en donde es fundamental tener en cuenta que los criterios de clasificación como el de Lilly, que aunque presenta grandes limitaciones, presenta la posibilidad de ser modificado y adecuado a diferentes condiciones añadiendo variables ya consideradas como: el estado y condición de las discontinuidades, la alteración del macizo rocoso, la presencia de agua, relleno, entre otras y ajustado este parámetro de clasificación da la zona que se va a intervenir, evaluar los criterios de optimización en los resultados de la voladura, desde esta condición es recomendable hacer la caracterización geológica y geotécnica en tiempo real antes de iniciar la detonación para poder predecir o al menos informar sobre los posibles efectos por parámetros no considerados.
- De acuerdo al análisis realizado los diferentes métodos de cálculo en operaciones con explosivos, se considera que el método de López Jimeno (2006) es el que más se aproxima al patrón de voladura tradicional, pero los métodos más adecuados y efectivos para la fragmentación y/o corte de bloques de roca en corredores viales, son los de voladura secundaria.
- El uso de material explosivo en el despeje y apertura de corredores viales ofrece una gran oportunidad para el sector público y privado, la cual debe ser debidamente evaluada, dado que desde el comportamiento de las sustancias explosivas, los procesos de despeje en corredores viales asociados a materiales consolidados brinda múltiples beneficios desde la perspectiva ingenieril, dada su relación costo – beneficio, el bajo costo del explosivo y su capacidad para fragmentar y remover grandes volúmenes de roca, junto a la facilidad operativa, las condiciones de seguridad en cuanto a su manejo y manipulación, condiciones de eficiencia y rapidez en el trabajo realizado, hacen que presente grandes ventajas respecto a los procesos de despeje tradicionales realizados mediante maquinaria amarilla.
- Se establece que la tecnología y desarrollo de explosivos, tiene inmersa un alto desarrollo técnico y científico, con alta noción de responsabilidad sustentable y sostenibilidad, en donde sus avances están enfocados en la optimización de la fragmentación con el mínimo

de vibraciones, bajo esta perspectiva se debe generar una nueva cultura política y estrategias, que respondan no solo a los procesos de caídas de rocas sino a las necesidades y proyección presentes y a futuro de nuestra sociedad.

A partir de la evaluación y análisis de los resultados de las operaciones de fragmentación, corte y voladura realizadas, los aspectos que se relacionan con el desarrollo de esta tesis doctoral se puede concluir que:

- En todos los casos de voladura se analizó el tamaño medio del bloque, en tales casos se observó que en la voladura de plasteo normalmente el uso de las cargas se encuentran entre los 0.3 a 0.6 Kg de explosivo por metro cúbico de roca, lo que guarda relación con la función de la capa protectora, que ayuda al confinamiento de los gases, mejorando el proceso de fragmentación, ejerciendo una fuerza sobre la piedra, además en la voladura secundaria por cachorro o plasteo, se evidenció que al realizar perforaciones de pequeño diámetro, usualmente de 20 mm a 50 mm (7/8" a 2" de diámetro), en el centro de gravedad del bloque, perforados a una profundidad de 1/2 a 2/3 de su espesor y disparados con cargas pequeñas de explosivo, se genera un plano de fractura adecuado.
- En todos los casos de voladura realizados, se observó que los mejores resultados en fragmentación, los más altos rendimientos de explosivo y la mayor eficiencia energética, se obtenían al realizar el taponamiento del barreno con arcilla, la cual garantiza las mejores condiciones de confinamiento, maximizando las condiciones de tracción, reduciendo las cantidades de explosivo utilizado, evitando el escape de los gases, como ocurre al taponar con arena, fragmentos de la perforación o material mixto, en donde se debe incurrir en el uso de una mayor cantidad de explosivo aproximadamente entre un 15 % a 20 % adicional, con el fin de garantizar unas condiciones de presión similares a las que se genera con el taponamiento con arcilla, dado el escape de gas a causa de las características de poca adhesión de estos materiales.
- Partiendo de los resultados obtenidos, estos conocimientos derivarán a proyecciones de nuevos desarrollos de conocimiento en el aspecto de técnicas para mitigación de impactos por cierres viales por caídas de rocas y/u otros fenómenos de remoción en masa en los que pueda aplicar, beneficiando la movilidad así como al sector económico y productivo del país,

es decir, a través de este proceso se pueden emplear investigaciones posteriores que lleven a la innovación de la mano de la tecnología, la que ofrece oportunidades en la gestión ingenieril y operativa acorde a los estándares y desarrollo de nuevas técnicas de voladura y desarrollo de explosivos, destacando el desarrollo de nuevas investigaciones en aspectos como el estudio de voladuras con diferentes diámetros de barrenación o el desarrollo de nuevas mezclas para voladura.

- Dadas las características de la topografía del territorio colombiano, se ha dificultado el afianzamiento de un sistema vial terrestre, que permanezca en total funcionamiento, donde los deslizamientos son los principales causantes de cierre vial, sin embargo, con la ayuda de los explosivos se han hecho grandes avances en las vías colombianas, dada su efectividad, precio asequible, la facilidad operativa, la seguridad en el manejo y manipulación, lo que representa la mayor ventaja en el desarrollo de operaciones rápidas de despeje vial en casos de caídas de rocas, en donde contar con explosivos facilita el trabajo de corte y fragmentación, permitiendo acortar los tiempos de operación hasta en un 80 %, respecto a la ejecución de obras mediante el uso de maquinaria amarilla y procedimientos manuales.
  
- En la planificación de una voladura es crítico el control y minimización de daños producto de vibraciones, en donde es fundamental la evaluación del en campo cercano y en el campo lejano, siendo este ultimo la única zona que es posible intervenir, de manera confiable, dado que la energía que se generará por la detonación estará en función de los parámetros de diseño y ejecución de la voladura, aspectos que pueden ser modificados por el explosivista a criterio, estableciendo durante la operación el pleno control en el tipo y cantidad de explosivo, número de cargas, espaciamiento y longitud entre los pozos, largo del taco, etc. Partiendo de este criterio, existen puntos críticos que se deben cuidar en los alrededores de la zona de voladura características del macizo rocoso, como lo puede ser el desarrollo de potenciales inestabilidades, la cercanía a vías, centros poblados, por lo que lo más favorable es relacionar esta ubicación y sus condiciones de vulnerabilidad, esto permite integrar estas condiciones al diseño y modificar la ejecución de la voladura, permitiendo modificar los frentes de ondas, acorde a las características geológicas y geotécnicas o antropicamente alteradas del entorno de la voladura, permitiendo el desarrollo e implementación de medidas adicionales de mitigación.

- En el proceso de disminución de daños, de manera particular en el campo lejano, se deben tener en cuenta las relaciones que actúan, las que están estrechamente relacionadas con las características del material, lo que se ve reflejado en vibraciones potenciales que pueden llegar a las zonas de interés, bajo esta premisa es recomendable medir de manera recurrente las vibraciones generadas por medio de geófonos en distintas zonas del área de interés a proteger, teniendo en cuenta las características de la carga explosiva, la ubicación de la carga, la heterogeneidad del bloque y ubicación de inestabilidades potenciales y críticas, así como de los centros poblados y obras civiles, para relacionar su registro con los mecanismos de atenuación establecidos en el modelo de voladura y/o fragmentación.
- El desarrollo del presente protocolo se fundamenta y han sido validados con distintas operaciones de campo y sus datos extrapolados desde las distintas operaciones registradas con lo que se busca plantear criterios de discusión, utilizándolo como punto de partida para futuras propuestas de investigación en criterios o método de medición, procesos de evaluación geométrica y/o geotécnica en donde se consideren otras condiciones, factores geológicos y geotécnicos, incorporando nuevos criterios para la evaluación de daños producidos por vibraciones generadas por la voladura y no que sean solo una adaptación de los aportes de Lilly (1986) o aplicación de voladuras secundarias, en donde el desarrollo de nuevos métodos se puedan convertir en criterios de evaluación general, válidos para este tipo de condiciones, sin que se desconozcan parámetros que deben ser evaluados en otro tipo de materiales rocosos o condiciones geológicas o antrópicas como el realizar una voladura en la cercanía o dentro de un centro poblado.
- Se concluye que el más común de los accidentes que ocurre durante la carga, es la detonación no intencional de un barreno individual, dado que se genera una iniciación involuntaria, la que puede ser por: daño mecánico, al explosivo, al detonador, o una iniciación involuntaria al detonador eléctrico.
- Se evidencia que un riesgo que existe en los procesos de carga mecanizada, tanto con cartuchos explosivos como con ANFO a través de mangueras, es que se producen cargas electrostáticas causadas por fricción en el transporte del material explosivo dentro de la

manguera. Esto puede producir una iniciación involuntaria, por lo cual se hace necesario utilizar una manguera no conductiva y aprobada para este tipo de operaciones.

- Debido a los bajos requerimientos de explosivo, para la fractura de bloques de roca, la precisión de los resultados de la fragmentación, recaen en el cálculo y evaluación adecuada de los factores y variables geológicas del bloque de roca, las características de densidad, la velocidad de detonación y la presión de detonación del explosivo.
- La decisión de poner en práctica una voladura de buena calidad, es el resultado de un esquema de trabajo integral en el que recae la participación de todos los departamentos involucrados, en muchas ocasiones las razones de no lograr buenos resultados, no está en el tipo de técnica usada, el diámetro de perforación, el explosivo y ni siquiera en el tipo de roca, sino en el poder disponer de los datos adecuados con relación al tiempo, calidad y datos requeridos, para así obtener los resultados correctos.
- El desarrollo de voladuras de manera controlada, permite realizar los trabajos con altos y adecuados estándares de seguridad, con el fin de asegurar que la seguridad dentro del entorno de voladura no se vea afectada y, en consecuencia, no se generen impactos no deseados al exterior de la misma.
- La aplicación de técnicas de voladuras controladas en los proyectos de despeje y remoción de material de caída de rocas en infraestructura vial, es en este momento la opción más rápida, rentable y sostenible en el tiempo, dadas sus características de eficiencia en el tiempo, los bajos costos de operación, requerimientos logísticos, con respecto a las operaciones con desarrolladas con maquinaria amarilla, las que implican una mayor temporalidad, logísticas más largas y complejas, además de costos más altos.
- De las actividades prácticas realizadas en relación con la fragmentación y/o voladura del material rocoso, se destaca que en ninguno de los casos se fue necesario realizar manejo y disposición técnica de los materiales producto de voladura, resaltando que si se realizó una disposición de dicho material, disposición realizada dado que los fragmentos resultado de la voladura fueron aprovechados desde la empresa o por la misma comunidad, los que realizaron fragmentación adicional al material de manera manual, para posteriormente disponerlo en la vía como material de recebo o soporte, usándolo como base granular para

dar soporte a la vía, de manera similar a como se realiza con el recebo B – 600, además de ser usado en el relleno de huecos y en otros casos para los caminos de entrada a diferentes predios, en otros casos se disponía de los materiales ubicándolos a un lado de la vía, destacando que en las zonas rurales no se requiere de procesos complejos de disposición y evidenciando que existe un interés por la disposición y manejo de los subproductos de la voladura, que no está contemplada dentro del proceso de manejo tradicional, que es su disposición en escombrera, permitiendo estos mecanismos locales el ahorro de costos de operación.

A partir de la evaluación y análisis de los aspectos normativos, de los aspectos que se relacionaron para el desarrollo de esta tesis doctoral, se puede concluir que:

- Dada la falta de una normatividad específica para la evaluación de impactos asociados a actividades que involucran el uso de explosivos, en donde de manera generalizada se toman los criterios de un experto como guía o se relacionan las actividades a diferentes estándares internacionales, que vienen siendo desarrollados desde el uso de explosivos en el sector minero, en donde se debe resaltar que la noción de este uso está fundamentada en la producción, aunque se manifieste respetar y fundamentar en la protección ambiental, en el territorio nacional se requiere una política en explosivos que involucre los aspectos técnicos junto a la responsabilidad, sustentabilidad y sostenibilidad del proceso, lo que se debe fundamentar en el desarrollo de una nueva cultura política y estratégica, que responda a una visión con proyección a futuro de los problemas y soluciones en el entorno vial. Es decir, que si se trabaja directamente desde un enfoque de calidad constructiva no solamente se deben desarrollar propuestas en campo, sino las directrices que permitan integrar las entidades administradoras de las vías, los entes gubernamentales, la empresa privada e Industria Militar Colombiana - INDUMIL, por medio de mecanismos que permitan una acción para la atención de forma inmediata ante la presentación de un evento.
  
- El diagnóstico de la situación actual de Colombia en normatividad, higiene y seguridad industrial, es adecuado a pesar de no existir una norma propia, por lo que según la bibliografía se cuenta cuentan con las herramientas necesarias para realizar un trabajo seguro, dadas las experiencias desde el Ejército Nacional de Colombia y la industria minera,

en donde está última aplica de manera reiterativa normas internacionales, permitiendo unas condiciones adecuadas en el avance y desarrollo de una normatividad adecuada a las condiciones y características del país, evitando con el desarrollo de una normatividad adecuada demandas por ambigüedades jurídicas asociadas a criterios no adecuados.

- Actualmente, la legislación colombiana, se fundamenta en la norma de sismo resistencia en la que se establecen los efectos de una voladura en términos de vibraciones deberán ser controlados para minimizar el daño a los edificios, estructuras u obras civiles, pero no existen criterios en esta legislación que establezcan los niveles de vibración permisibles, por lo que la mayoría de los estudios para el control de vibraciones se basan en las normas internacionales (USBM, Normal Española, Norma, Alemana, Normal Canadiense, Normal Australiana, etc.) y dado que hoy, los criterios internacionales de evaluación de daño por vibraciones o daño en campo lejano y campo cercano producto de una voladura se han desarrollado para garantizar la protección de las obras civiles y protección al ambiente estableciendo niveles permisibles de vibraciones, es el momento de iniciar el desarrollo de una normatividad propia que se ajuste a las características propias del entorno colombiano contemplando las características de los diferentes macizos, características ambientales, características hidrológicas e hidrogeológicas, procesos mineros y de obras civiles.

A partir de la identificación, evaluación y análisis de los procesos económicos y socioculturales identificados asociados con las operaciones que involucran el uso de explosivos en Colombia, en cuanto a los aspectos que se relacionaron para el desarrollo de esta tesis doctoral, se puede concluir que:

- El uso de explosivos con un enfoque técnico aplicado a solucionar problemas de infraestructura vial en Colombia, debe ser abordado tanto desde el Estado como desde el sector privado, en donde el gremio de la construcción vial, aplica y ha tenido la capacidad de haber evaluado el comportamiento de los explosivos desde diferentes ámbitos, desde las mismas consideraciones aplicadas al despeje vial, como las consideraciones ambientales, sociales y económicas, desde donde su incidencia con las comunidades y la sociedad en general, en donde se ven reflejados y articulados los perjuicios causados por las obstrucciones viales y asimismo al ser articuladas, al plantear soluciones, prácticas, rápidas

y efectivas contribuyen a la promoción del desarrollo local, desde un enfoque sustentable y sostenible, ofreciendo beneficios para todos colectivamente, al ser garantizada la movilidad, partiendo de lo anterior, estos procesos benefician y se articulan con el desarrollo económico y productivo del país, es decir, que garantizando despejes viales rápidos, se pueden concentrar los medios productivos a las diferentes escalas, evitando represamientos de productos, ofreciendo a la sociedad la oportunidad de mantener los procesos económicos en un estado operativo que garantice el abasto, así como el ingreso de bienes y servicios sin sobrecostos.

- Las exigencias de un mercado globalizado, exigen y hacen que los países deban mantener unos estándares de calidad en la movilidad, en donde los procesos de mantenimiento vial deben ser adaptados a las exigencias de los mercados globales, lo que genera beneficios no solo económicos, sino para la comunidad en general de manera multidimensional, es decir que genera espacios oportuno para recrear los contextos de necesidad económica y social, en donde un óptimo mantenimiento vial en relación con su circulación, aumentar las capacidades de respuesta en relación con las exigencias del mercado, así como el desarrollo y el crecimiento social.
- Al trabaja los procesos de despeje vial directamente desde un enfoque de funcionalidad y calidad de los sistemas de viales, fundamentado en los beneficios sociales asociados a la movilidad y el estado funcional de la infraestructura vial, en donde los entes territoriales puedan abordar esta problemática de manera rápida, los beneficios generados de la aplicación de esta metodología en pro de los efectos negativos asociados al bloqueo vial, que ya existen y las demoras de los sistemas tradicionales, brinda al ente territorial y las comunidades una oportunidad de mantener el desarrollo y crecimiento, que trae el mantener unas adecuadas condiciones de movilidad, así como el empoderamiento y mantenimiento sostenible en el tiempo de su red vial.
- Las pérdidas económicas generadas por los diferentes cierres en corredores viales, en nuestro país son altas, en donde se estima que para el año 2019, por cada día de cierre de la vía al llano se generaron perdidas para el departamento del Meta por \$43.000 millones de pesos, en donde aproximadamente 18.000 millones son pérdidas localizadas en sectores afectados de manera recurrente por estos eventos como el sector agropecuario, turismo, y

transporte, por lo que se hace indispensable la investigación y desarrollo de nuevas formas alternativas al proceso de despeje en corredores viales, a fin de mitigar estos impacto.

A partir de la identificación, evaluación y análisis de los rasgos y características geográficas del territorio colombiano, identificadas y que se relacionaron con las operaciones con explosivos en Colombia, para el desarrollo de esta tesis doctoral se puede concluir que:

- Las características climáticas, así como las condiciones del relieve del territorio colombiano hacen que se deba dar un nuevo enfoque a la atención de los procesos de despeje vial, en un país con alto nivel de atraso y limitada infraestructura vial, en donde los bloqueos generan grandes perjuicios a la movilidad y la economía, en el cual, desde el sector público y privado se debe evaluar el comportamiento de los explosivos desde diferentes ámbitos, considerando no solo los beneficios sociales y su incidencia directa e indirecta a las comunidades, temporales, las mínimas afectación al medio, estas condiciones hace que se puedan articular los diferentes entes con el fin de plantear soluciones que promuevan el desarrollo para procesos de despeje vial desde un enfoque de las relaciones de costo – beneficio dado su precio asequible, la facilidad operativa, las condiciones de seguridad en el manejo y manipulación, condiciones de eficiencia y rapidez en el trabajo realizado, condiciones de facilidad en el transporte, son algunas de las ventajas que ofrecen los explosivos comerciales modernos.
  
- Debido a las características topográficas con las que cuenta el territorio colombiano y el constante deterioro de la malla vial por acción de las condiciones climáticas se ha dificultado el fortalecimiento de un sistema de transporte vial terrestre, sin embargo, con la ayuda de los explosivos se han hecho grandes avances en los procesos de despeje en las vías colombianas, en donde para lograr el óptimo rendimiento de las cargas se requiere un análisis geológico rápido de las características de resistencia de la roca y al ser relacionadas con las características de velocidad de la onda generada por la acción explosiva, su poder fragmentador permite diseñara cargas acorde a las características del material y de cada una de las cordilleras, permitiendo el desarrollo de procesos rápidos para el acople de cargas y el fracturamiento de los bloques en los despejes viales.

A partir de la identificación, evaluación y análisis de los impactos identificados y que se relacionaron con las operaciones con explosivos en Colombia, para el desarrollo de esta tesis doctoral se puede concluir que:

- Dado que el transporte terrestre representa una de las variables determinantes en la evaluación de la economía nacional, los desastres naturales como los deslizamientos pueden afectar de forma directa la economía nacional, destacándose que asociado a la reducción del flujo de la carga, se desarrolla un aumento de los costos en bienes y servicios, aumento que es transferido al consumidor, lo que deja como premisa la necesidad de mantener en funcionamiento constante los corredores viales.
- La destrucción de la infraestructura de transporte obstaculiza las actividades económicas y la competitividad de los entes territoriales, lo que se ve reflejado en el aumento de los costos de los productos en las áreas afectadas, generando procesos de inflación local en los entes territoriales.
- Se concluye que ante la manifestación de un desastre, de manera general se incrementan los costos de transporte en un 41,1 %, a razón del incremento de los tiempos y mayor gasto de combustible, además del aumento de los fletes que en promedio tienen un aumento del 3,7%, aumentos transferidos al consumidor final del bien o servicio.

## BIBLIOGRAFÍA

- Rodríguez Pineda, C. E., & Jiménez Jara, D. Y. (2009). *Vulnerabilidad física ante deslizamientos*. Memorias V Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras., Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito Armero", Bogota, Bogota.
- Acosta Ariza, M. A., & Alarcón Romero, P. A. (2017). *Análisis de la cantidad y el estado de las vías terciarias en Colombia y la oportunidad de la ingeniería civil para su construcción y mantenimiento*. Bogota: Universidad Católica De Colombia.
- Acosta Ariza, M., & Alarcón Romero, P. (2017). *ANÁLISIS DE LA CANTIDAD Y EL ESTADO DE LAS VÍAS Terciarias en Colombia y la Oportunidad de la Ingeniería Civil para su Construcción y Mantenimiento*. Bogota, Colombia: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.
- Ames Lara, V. A. (2012). *Diseño de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas*. (U. N. Ingeniería, Ed.) Lima, Peru.  
doi:oai:cybertesis.uni.edu.pe:uni/635
- Asociacion de Transportadores de Carga (ATC). (2011). *ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES EN COLOMBIA*. *Revista del Banco Mundial*.
- Asociación Nacional de Instituciones Financieras (ANIF). (2017). *Resultados del informe de competitividad Global 2016-2017*. Bogota, Colombia.
- Avila Gutarra, K. J. (2020). *Diseño de perforación y voladura para mejorar fragmentación del mineral en mina Virgen del Rosario - U.P. Hualanyog - 2020*. Huancayo. Obtenido de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/6090>
- Baena Correa, S., Paz Muñoz, J. S., & Fernández Plaza, D. (2019). Reduccion del riesgo y amenaza de deslizamientos en vias principales de Colombia. *Congreso Latinoamericano de Ingenieria*.
- Banco Mundial. (2004). *Desarrollo económico reciente en infraestructura del sector transporte*. Bogota, Colombia.
- Banco Mundial. (2011). *Proyecto análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia*. *Bogotá*. Bogota, Bogota, Colombia.
- Banco Mundial. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: Un aporte para la construcción de políticas públicas*. Global Facility for Disaster Reduction and Recoveri - GFDRR. Bogota: Banco Mundial.
- Beltrán Moreno, L., Aya Rodriguez, J. E., & Camargo Chávez ', M. H. (01 de 05 de 1992). Elementos del Impacto Ambiental, Producido por los Deslizamientos de Taludes Viales Colombianos. (U. N. Colombia, Ed.) *Ingenieria e investigacion*, 38 - 57.  
doi:<https://doi.org/10.15446/inginvestig.v0n27.20763>

- Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. (J. Herrera Herbert, & J. Castilla Gómez, Edits.) Madrid, Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Bloom, A. L. (1998). *Geomorphology: A systematic Analysis of Late Cenozoic Landforms*. Nueva Jersey: Prentice-Hall.
- Brabb, E. E., & Hrod, B. L. (1989). *Landslides: Extent and economic significance*. Netherlands.
- Caguana Gutiérrez, A. F., & Tenorio Tupacyupanqui, M. P. (2013). *OPTIMIZACION DE LOS PARAMETROS DE PERFORACION Y VOLADURA EN LA CANTERA*. (U. d. Cuenca, Ed.) Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Cámara Colombiana de la Infraestructura. (2009). Bogota, Colombia.
- Carchuancho Leon, E. H. (2011). *Optimización de la fragmentación aplicando valores de energía en voladura al tajo vidal, Nivel 4190 Cantera De Caliza Cerro Palo Cemento Andino S. A.* Peru. doi:oai:172.16.0.151:UNCP/3161
- Carciente, J. (1965). *Carreteras estudio y proyectos*. Editores Vega s.r.l.
- Carciente, J. (1965). *Estudio y proyecto de carreteras* (Vol. Volumen 1). (U. C. Venezuela, Ed.) Venezuela: Ediciones Vega.
- Cárdenas Grisales, J. (2014). Diseño Geometrico de Carreteras. En J. C. Grisales, *Diseño Geometrico de Carreteras* (Vol. Segunda Edicion, pág. 520). Cartagena, Colombia: ECOE - Ecoediciones.
- Cárdenas, M., Escobar, A., & Gutiérrez, C. (2004). *La contribucion de la infraestructura a la actividad economica en Colombia*. Bogota.
- Carmona Pascuales, J. F., Cote Barón, J. P., & Pulido Mahecha, K. (2023). Algunos efectos de los últimos cierres en la vía al Llano sobre la actividad económica de la región. *Informe de Política Monetaria*, 49 - 53.
- Carrillo León, W. J. (2003). Uso de explosivos en demoliciones para voladuras controladas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 109 - 118.
- Carvajal Restrepo, E. (s.f.). Alerta roja por caída de rocas en derrumbe de la autopista Medellín-Bogotá. *El Colombiano*. Obtenido de <https://www.elcolombiano.com/antioquia/movilidad/alerta-roja-en-derrumbe-de-autopista-medellin-bogota-MX5752806>
- Castro, V. A., Parra, V. F., & Durán, G. G. (1974). Deslizamiento en el kilómetro 38 de la carretera Bogotá-Villavicencio. Investigación de algunos métodos de estudio. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Centro de Estudios Economicos - ANIF. (2014). *Costos de transporte, multimodalismo y la competitividad de Colombia*. Bogota: ANIF.
- Chiclla Dominguez, M. A., & Zegarra Ayquipa, I. (2019). *Aplicación de modelos matemáticos de fragmentación para la reducción de costos en perforación y voladura en el tajo jesica, mina*

aruntani S.A.C. Abancay, Perú. Obtenido de  
<http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/731>

- Cluster, M. d. (2022). *Colombia red de carreteras*. PMA. Clúster de Logística.  
doi:<https://dlca.logcluster.org/es/23-colombia-red-carretera#:~:text=Colombia%20cuenta%20con%20una%20red,69.46%25%20a%20la%20red%20terciaria>.
- Comisión Económica para América Latina (CEPAL). (2011). *Evaluación – Valoración de los daños y pérdidas ocasionados por la ola invernal (La niña) 2010 - 2011. Colombia*.
- CONCYTEC - Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica. (2011). Optimización de la fragmentación aplicando valores de energía en voladura al tajo vidal, Nivel 4190 Cantera De Caliza Cerro Palo Cemento Andino S. A. *CONCYTEC - Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica*.  
doi:172.16.0.151:UNCP/3161
- Congreso de la república de Colombia. (2019). *De todas las vías terciarias con las que cuenta Colombia, el 94% está en mal estado*. (S. d. Republica, Ed.) Bogota, Bogota, Colombia: Senado de la Republica. Obtenido de <https://www.senado.gov.co/index.php/prensa/lista-de-noticias/546-de-todas-las-vias-terciarias-con-las-que-cuenta-colombia-el-94-esta-en-mal-estado>
- Consejo Privado de Competitividad. (2017). *Índice Global de Competitividad 2017-2018*. Bogota: Consejo Privado de Competitividad.
- Contreras, J. L. (2010). *MANUAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS*. (U. C. Venezuela, Ed.) Caracas, Venezuela.
- Correa, P. L., & Martínez Díaz, A. D. (2017). *Diseño del sistema de perforación y voladura en los bancos d, e y f en la mina de caliza el tesoro, contrato de concesión ILI-16111 ubicada en la vereda las caleras del municipio de Nobsa - Boyacá*. Sogamoso, Boyaca, Colombia.
- Cruden, D. M. (1991). A simple Definition of a Landslide Bulletin of the International Association of Engineering Geology. *Engineering Geology*, 27 - 29.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslide Types and Processes*. Washington: National Academy Press.
- Cruz Montoya, N. M. (2018). *Evaluación del proceso de perforación y voladura en la explotación de yeso de la mina el toro, los santos- santander*. Sogamoso, Boyaca, Colombia: ESCUELA DE INGENIERÍA DE MINAS . Obtenido de <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2512/1/TGT-1098.pdf>
- De Freitas, M. H., & Watters, R. J. (1973). Some field examples of toppling failure. *Geotechnique*, 23(4).
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2014). *-Infraestructura Vial*. Bogota D.C., Colombia.

- Departamento Nacional de Planeación - DNP, Banco Interamericano de Desarrollo - BID. (2015). *Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Sector Transporte*. Bogota.
- DESINVENTAR. (2006). *Análisis del impacto de desastres menores y moderados a nivel local en Colombia*. DESINVENTAR. Prevention Consortium. Obtenido de <http://www.desinventar.org/sp/proyectos/articulos/>
- Dey, K., & Sen, P. (2003). Concept of Blastability – An Update. *The Indian Mining & Engineering Journal*, 42(8), 24 - 31.
- Díaz Martínez, J. C., & Guarin Aragón, M. A. (diciembre de 2012). Análisis y diseño de la operación de perforación y voladuras en minería de superficie empleando el enfoque de programación estructurada. *Boletín Ciencias de la Tierra*(32), 15 - 22. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n32/n32a02.pdf>
- Djordjevic, N. (1999). A two-component model of blast fragmentation. *AusIMM Proceedings*, 304(2), 9 - 13.
- DNP - Departamento Nacional de Planeación. (2010). *Prosperidad para todos” 2010-2014*. Bogota. Obtenido de [www.dnp.gov.co/PND/PND20102014.aspx](http://www.dnp.gov.co/PND/PND20102014.aspx).
- Donaires Soria , a., & Fernández Ampu, E. N. (2019). *Optimización del diseño de voladura primaria aplicando el uso de mezcla explosiva gasificada en el tajo ferrobamba en la unidad minera las bambas*. Anancay, Peru. doi:oai:172.16.0.151:UNAMBA/746
- Duarte Guterman y Cia Ltda. (2015). *Infraestructura vial V8 - Formulación del plan maestro de movilidad para Bogotá D.C., que incluye ordenamiento de estacionamientos*. Bogotá D.C.: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Duncan, C. W. (1999). Foundations on rock. *American Society for Testing Materials*.
- El cuarto mosquetero. (26 de 06 de 2023). La vía al Llano, una problemática de dos siglos. *El cuarto mosquetero*. Obtenido de <https://elcuartomosquetero.com/la-via-al-llano-una-problematika-de-dos-siglos/#:~:text=En%201759%20el%20Virrey%20Jos%C3%A9,le%20conoc%C3%ADa%20a%20la%20regi%C3%B3n>.
- EL NUEVO SIGLO. (20 de 07 de 2023). Pérdidas por \$50.000 millones diarios acarrea cierre de la vía al Llano. *EL NUEVO SIGLO*. Obtenido de <https://www.elnuevosiglo.com.co/nacion/perdidas-por-50-000-millones-diaris-acarrea-cierre-de-la-al-llano>
- El Tiempo. (26 de 10 de 1994). CIERRE DE VÍA AL LLANO, UN SACRIFICIO. *El Tiempo*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-241617>
- El Tiempo. (15 de 7 de 1997). DERRUMBE INCOMUNICA AL LLANO. *El Tiempo*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-604986>
- El Tiempo. (8 de 4 de 1997). DESDE HACE 238 AÑOS SE CONSTRUYE LA VÍA AL LLANO. *El Tiempo*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-520475>

- El Tiempo. (22 de 9 de 1998). Taponada la vía al Llano por derrumbe. *El Tiempo*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-821494>
- El Tiempo. (14 de Junio de 2019). \$ 18.000 millones pierde cada día el Llano por cierre de vía. (E. Tiempo, Ed.) *El Tiempo*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/economia/las-perdidas-economicas-que-dejan-los-cierres-de-la-via-al-llano-375646>
- El Tiempo. (9 de 1 de 2021). *El Tiempo*. Obtenido de El Tiempo: <https://www.eltiempo.com/unidad-investigativa/porte-de-armas-piden-acelerar-tramites-para-permisos-especiales-559724#:~:text=EL%20TIEMPO%20estableci%C3%B3%20que%20la%20Contralor%C3%ADa%20General,interesar:%20El%20futbolista%20clave%20en%20rastreo%20de>
- Española, R. A. (s.f.). *Diccionario de lengua española*. (A. d. Española, Editor) Recuperado el 17 de 10 de 2020, de <https://dle.rae.es/>
- Fainboim, I., & Rodríguez, J. (2000). *El desarrollo de la infraestructura en Colombia en la década de los noventa*. Medellín: ESUMER.
- FINDETER - Financiera del Desarrollo. (2021). *Estudio del sector transporte colombiano*. Coordinación de Inteligencia Externa.
- Fonseca, J. E., & López Orozco, L. M. (2011). *Guía práctica de maquinaria adecuada para la construcción de proyectos viales*. UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN, Antioquia. Medellín: FACULTAD DE INGENIERÍAS.
- Fundación para la Educación Superior y el Desarrollo - FEDESARROLLO. (2013). *Infraestructura de transporte en Colombia*. Bogota D.C.
- García, L. (2011). Diagnóstico de la infraestructura del transporte en Colombia.
- Garrido Rojas, C. (2020). *Aplicación de cámaras de aire en tronadura de producción de una mina de hierro*. Concepción: Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
- Goldsmith, W., & Edward, A. (2011). *Impact - The theory and physical behavior of colliding solids*. Londres. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/33412/20421-91572-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gonzales Troncoso, A. M., & Alba Acero, C. A. (2006). *Infraestructura vial en Colombia: un análisis económico como aporte al desarrollo de las regiones 1994 - 2004*. Bogota: Universidad de la Salle.
- Gonzales, A. M. (2006). *Infraestructura vial en Colombia: una análisis económico como aporte al desarrollo de las regiones 1994-2004*. Bogota: Universidad de la Salle.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Otelo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid, España, España: Pearson Educación.
- Goodman, R. E., & Bray, J. W. (1976). Poppling of rock slopes. *Rock Engineering for Foundations and Slopes*, 201-234.

- Hutchinson, J. N. (1988). *General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in relation to Geology and Hydrogeology*. Fifth International Symposium on Landslides. Balkema: Rotterdam.: C. Bonnard, edition.
- INVÍAS, I. N. (1998). *Manual de estabilidad de taludes*. Bogotá: INVÍAS.
- Jiménez, J. A., & Aristizábal, E. (2018). Propuesta metodológica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales: Caso de estudio Tramo 2, vía Medellín - Turbo. *Boletín de Ciencias de la Tierra*(43). doi:10.15446/rbct.n43.64683
- Kirkby, M. J., & Morgan, R. C. (1967). *Erosión de Suelos*. Limusa: México.
- Kuznetsov, V. M. (marzo de 1973). The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. (S. M. Science, Ed.) (9). doi:<https://doi.org/10.1007/BF02506177>
- La República. (17 de 09 de 2019). Las pérdidas por el cierre de la vía al Llano fueron de \$2 billones para el Meta. *La Republica*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/economia/las-perdidas-por-el-cierre-de-la-via-al-llano-fueron-de-2-billones-2909153>
- La República, L. (7 de Diciembre de 2019). El sector comercio reportó pérdidas por \$120.000 millones, los hoteles hablan de \$200.000 millones, mientras que los transportadores registran \$1 billón. *Desde junio, se perdieron \$2,5 billones por el cierre en la vía al Llano*. doi:<https://www.larepublica.co/economia/las-perdidas-por-el-cierre-de-la-via-al-llano-fueron-de-2-billones-2909153>
- Langefors, U., & Kihlstrom, B. (1976). *TECNICA MODERNA DE VOLADURA DE ROCA*. URMO S.A. de Ediciones.
- LEGISCOMEX. (2021). *El desarrollo de la infraestructura en Colombia*. Bogota, Bogota, Colombia: Legis. doi:ISSN 2027-8314
- León Castillo, J., & Giraldo, O. (2020). *Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia*. Bogota D.C., Colombia: Editores Academicos. doi:<https://doi.org/10.12804/tj9789587844887>
- Llacma Lllacachi, O. M. (2017). *Evaluación técnico económica con el uso de emulsión gasificada en voladura Mina Cuajone*. Arequipa, Peru: Universidad Nacional de San Agustín. doi:172.16.0.151:UNSA/2988
- Lopez Jimeno, C., Lopez Jimeno, E., Javier Ayala, C. F., & Visser de, R. Y. (2017). *Drilling and Blasting of Rocks*. Londres, Inglaterra. doi:<https://doi.org/10.1201/9781315141435>
- López Jimeno, C., López Jimeno, E., & García Bermúdez, P. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas*. (Mostoles, Ed.) Madrid: Graficas arias Montano.
- López Jimeno, E., López Jimeno, C., & Ayala Carcedo, F. J. (2006). *Drilling and Blasting of Rocks*. Londres, Inglaterra: Taylor & Francis Group.
- Makunina, S. G. (2011). Geography and Natural Resources. *Geophysical systems of landscapes*, 301–307. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1134/S1875372811040019>

- Marlon Edmer, T. C., & Pizarro Vilcatoma, E. (2015). *Optimización de la voladura mediante el uso de detonadores de microrretardo en explotaciones mineras subterráneas en consorcio minero Horizonte S.A.* doi:oi:172.16.0.151:UNCP/1348
- Marshall, M., & Oxley, J. (2008). *Aspects of Explosives Detection*. Kingston, Estados Unidos: Elsevier Science.
- Martínez Martínez, J. (1997). *Geomorfología Ambiental*. Servicio de Publicaciones Las Palmas de Gran Canaria.
- Mejía Salazar, W. E. (2009). *Influencia de la fragmentación por perforación y voladura en el Throughput de chancadora*. Lima, Peru: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Melieh, I., Mahmu, Y., & Adnan, K. (2009). Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 8. Obtenido de <https://wenku.baidu.com/view/7466911fb7360b4c2e3f6496.html>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente) y el Ministerio de Transporte (Mintransporte). (2020). *Lineamientos de Infraestructura*. Bogota.
- Ministerio de Transporte. (2011). *Infraestructura para la Prosperidad 2010 - 2014*. Bogota.
- Ministerio de Transporte e Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (2016). *Programa estratégico de obra pública, vías para la equidad*. (I. N. Vías, Ed.) Recuperado el 10 de 6 de 2020, de En Marcha: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/seguimiento-a-proyectos-2016/4691-magdalena-1/file>
- Ministerio de Transporte, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Departamento Nacional de Planeación - DNP, Instituto Nacional de Vías - INVIAS, Agencia Nacional de Infraestructura - ANI. (2014). *PLAN VÍAS-CC: vías compatibles con el clima. Plan de Adaptación de la Red Vial Primaria de Colombia*. Bogota.
- MITECO, M. p. (2017). *Guía de buenas prácticas en el diseño*. Madrid, Madrid, España: Dirección general de política energética y minas. Obtenido de [www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es)
- Montenegro Rivas, J. F. (2018). *Procedimiento técnico para la elaboración de voladuras en proyectos de infraestructura*. Medellin, Colombia.
- Montero, J. (1991). *Inventario de deslizamientos en Suramérica*. Conferencia especial del Comité Panamericano Movimientos en Masa, IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones de la ISSMGE, Viña del Mar.
- Montero, O. J., Beltrán, M. L., & Cortés, D. R. (1987). Inventario de deslizamientos en la red vial nacional. *VIII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones*, 3, 137 - 151.
- Moraga Hidalgo, G. N. (2018). *Características geológicas y geotécnicas generales que intervienen en la tronadura y el efecto de daño en el campo lejano en minería de rajo abierto*. Concepcion: UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN.

- Nader Rubio, N. (2018). *Implementación de parámetros de perforación y voladura en el nivel 70, frente 1 de la cantera planta Tolú Viejo de la empresa cementos ARGOS S.A.* (F. U. ANDINA, Ed.) Valledupar, Colombia. Obtenido de <https://digitk.areandina.edu.co/bitstream/handle/areandina/931/Implementaci%C3%B3n%20de%20par%C3%A1metro%20de%20perforaci%C3%B3n%20y%20voladura%20en%20el%20nivel%207.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Organisation for Economic Cooperation and Development - OECD. (15 de 6 de 2019). *OECD iLibrary*. Recuperado el 14 de 6 de 2022, de OECD iLibrary: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/2952b1fd-es/index.html?itemId=/content/component/2952b1fd-es>
- Ospina Ovalle, G. (2016). El papel de las vías secundarias y los caminos vecinales en el desarrollo de Colombia. (U. d. Andes, Ed.) *Revista de Ingeniería*(44), 9. doi:<http://dx.doi.org/10.16924%2Friua.v0i44.911>
- Ospina Ovalle, G. (2016). El papel de las vías secundarias y los caminos vecinales en el desarrollo de Colombia. (U. d. Andes, Ed.) *Revista de Ingeniería*(44), 20-27.
- Qualid Kherbash, M. L. (2015). A Review of Logistics and Transport Sector as a Factor of Globalization. *Procedia Economics and Finance*, 43 - 47.
- Pachón, A., & Ramírez, M. (2005). *La infraestructura de transporte en Colombia durante el siglo XX: una descripción desde el punto de vista económico*. Bogota: Banco de la Republica.
- Pérez, G. J. (2005). *ECONOMIA REGIONAL La infraestructura del transporte vial y la movilización de carga en Colombia*. Bogota: Banco de la Republica.
- Periódico del Meta. (18 de 06 de 2023). Estas son otras tragedias que ha dejado la via al Llano. *Periodico del Meta*. Obtenido de Periodico del Meta: <https://periodicodelmeta.com/estas-son-otras-tragedias-que-ha-dejado-la-via-al-llano/>
- Pomeroy, J. S. (1978). Isopleth Map of Landslide Deposits. (G. Survey, Ed.) *Geological Survey Field Studies Map*.
- Pontificia Universidad Javeriana. (2004). *Estudio de vulnerabilidad económica de la carretera Bogotá-Villavicencio*. Bogota, Colombia.
- Quispe Arenas, C. D. (2018). *Análisis de la fragmentación resultante de voladura para la evaluación de la expansión de las mallas de perforación aplicando sistema de iniciación electrónico en minera coimolache-2016*. Huaraz, Peru. Obtenido de [http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/2241/T033\\_47468249\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/2241/T033_47468249_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ramsay, J. G. (1967). *Folding and Fracturing of Rocks*. Nueva York: McGraw Hill.
- RCN. (1 de 4 de 2018). Vías cerradas en Santander por deslizamientos y caída de rocas.
- Rebolledo Espinoza, F. A. (2018). *DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE DISEÑO Y PLANIFICACIÓN DE TRONADURA CONTROLADA PARA ADMINISTRAR Y CONTROLAR RIESGOS GEOTÉCNICOS*. Santiago de Chile.

- (2017). *Red Internacional de Carreteras Mesoamericanas*. Proyecto Mesoamérica. Obtenido de <http://www.proyectomesoamerica.org/index.php>
- Revista Semana. (19 de 06 de 2019). Vía al Llano: implicaciones de un cierre indefinido. *Revista Semana*. Obtenido de <https://www.semana.com/nacion/articulo/via-al-llano-implicaciones-de-un-cierre-indefinido/619924/>
- Rojas Linares, L. (2018). Un nuevo enfoque predictivo de la fragmentación en la Voladura de Rocas. (L. R. Linares, Ed.) *Revista Industrial Data*, 17 - 26. doi:DOI: <http://dx.doi.org/10.15381/idata.v21i1.14907>
- Rojas Ramírez, H. J. (2013). *Optimización de la fragmentación de rocas empleando el sistema electrónico y métodos de predicción en lagunas norte - Minera Barrick Misquichilca*. Ayacucho, Peru. doi:oai:repositorio.unsch.edu.pe:UNSCH/2162
- Romero Naranjo, F. R. (2009). *Manual técnico para el uso de explosivos utilizados en voladuras a cielo abierto en vías terrestres*. Ambato, Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/2165/1/Maestr%C3%ADa%20V.%20T.%2037%20-%20Romero%20Naranjo%20Francisco%20Rub%C3%A9n.pdf>
- Romero Paúcar, R. (2016). *Voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho – Minera Chinalco Perú S.A.* doi:oai:172.16.0.151:UNCP/3897
- Ruiz Valencia, D., Otálora Sánchez, C., & Rodríguez Ordóñez, J. (9 de noviembre de 2007). •Efecto de las vibraciones generadas por voladuras en minas sobre edificaciones residenciales de mampostería simple en Colombia. (Pontificia Universidad Javeriana, Ed.) *Revista de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. , 7((2 - 3)), 259 - 273. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/296525986.pdf>
- Sánchez Barrera, A. M., Macías García, D., & Palacio Bedoya, K. (2015). *Análisis del retraso de la infraestructura vial y portuaria en Colombia y su impacto en la competitividad*. Medellín: ESUMER.
- Schultz, J. R., & Cleaves, A. B. (1955). *Geology in Engineering- Landslides and Related Phenomena*. New York: Columbia University Press.
- Scott, A., Cocker, A., Djordjevic, N., Higgins, M., La Rosa, D., Sarma, K. S., & Wedmaier, R. (1996). *Open Pit Blast Design: Analysis and Optimization*. Queensland, Queensland, Queensland: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.
- Semana, R. (2021). Video capta impresionante caída de una roca gigante sobre la vía al Llano. *Revista Semana*. Obtenido de <https://www.semana.com/nacion/articulo/video-capta-impresionante-caida-de-una-roca-gigante-sobre-la-via-al-llano/202157/>
- Servicio Geologico Colombiano - SGC. (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. Bogota: sgc.
- Servicio Geologico Colombiano - SGC. (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. Bogota: SGC.

- Servicio Nacional de Geología y Minería - SNGM. (2014). Guía de Operación para el Manejo de Explosivos. *GUÍAS DE OPERACIÓN PARA LA PEQUEÑA MINERÍA*.
- Sharpe, C. F. (1938). *Landslide and Related Phenomena*. New York: Columbia University Press.
- Sharpe, C. F., & Dosch, E. F. (1942). Relation of soil creep to earth flow in the Appalachian Plateaus. *Jour. Geomorph*, 5(1).
- Skempton, A. W., & Hutchinson, J. N. (1969). *Stability of natural slopes and embankment foundations*. State of the Art Report. 7th Int. Conf, Foundation Engenier Mexico, Mexico.
- Skempton, A. W., & Hutchinson, J. N. (1969). Stability of natural slopes and embankment foundations. *Soil mechanics and Foundation Engenier*, 291-340.
- SOCHAVA, V. B. (2015). EL OBJETO DE LA GEOGRAFÍA FÍSICA A LA LUZ DE LA TEORÍA SOBRE LOS GEOSISTEMAS. *GEOgraphia* -, 234 - 244. Obtenido de file:///C:/Users/JL/Downloads/13705-Texto%20do%20Artigo-53061-1-10-20150729%20(1).pdf
- Suarez, J. (2012). *Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico*. Bucaramanga.
- Swanson, F. J., & Dyrness, C. T. (1975). Impact of Clearcutting and Road Construction on Soil Erosion by Landslides in the Western Cascade Range - Oregon. *in Geology*, 3, 393 - 396.
- Tart, J. R. (1996). Landslides Investigation and Mitigation. *pecial Report 247 Landslides Investigation and Mitigation*.
- Terzaghi, K. (1950). Mechanism of Landslide. En Application of Geology to Engineering Practice. *the geological society of america*, 83 - 123.
- Tiktin, J. (1997). *Movimiento de tierras*. Madrid, Madrid, España: Servicio de Puhlicaciones.
- Turner, A. K., & Schuster , R. L. (1996). Colluvium and Talus. (TRB-NRC, Ed.) *Landslides Investigation and Mitigation(247)*, 525-554.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres-UNGRD. (2018). *Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes*. Bogota.
- Vargas Sánchez, R. (1999). *La maquinaria pesada en movimientos de tierras (descripción y rendimiento)*. ITC - INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA CONSTRUCCIÓN.
- Varnes, D. J. (1958). *Landslide Types and Processes* (Vol. Landslides and Engineering Practice ). (N. R. Council, Ed.) Washington D.C: HBR.
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. *Special Report 1976: Land slides Analysis and control* (29), 20-47.
- Wong, , H., & Pang, P. L. (1992). *Assessment of stability of slopes subjected to blasting vibration*. (C. E. Department, Ed.) Hong Kong, Hong Kong: Geotechnical Engineering Office.

Yahuana Berru, W. R. (2015). *Control de fragmentación, proyección y apilamiento de roca en voladuras de canteras en la cantera Cerro Negro*. Piura, Peru. Obtenido de <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/982>

Yepes, T., Ramírez, J. M., Villar, L., & Aguilar, J. (2013). *Infraestructura de transporte en Colombia* (Vol. 46). (C. Fedesarrollo, Ed.) Bogota, Colombia: Fedesarrollo.

Zamora Fandiño, N., & Barrera Reyes, O. L. (2012). *Diagnostico de la infraestructura vial actual en Colombia*. (U. EAN, Ed.) Bogota, Colombia.