

ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CORTE DE ÁRBOLES Y VIGAS DE  
MADERA CON EL USO DE EXPLOSIVOS



JUAN CARLOS RODRÍGUEZ VILLAMIL

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA FAEDIS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, D.C.  
2018

ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CORTE DE ÁRBOLES Y VIGAS DE  
MADERA CON EL USO DE EXPLOSIVOS

JUAN CARLOS RODRÍGUEZ VILLAMIL



Trabajo de grado para optar el título de  
Ingeniero Civil

Asesor  
Ing. CESAR AUGUSTO LÓPEZ

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA FAEDIS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, D.C.  
2018

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá, D.C., 12 de Julio de 2018

A Dios por permitirme este logro,  
A mis padres Rosa Marina y Dámaso por darme fortaleza.  
Y en especial a Sandra Patricia mi compañera, por su apoyo incondicional.

## Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos:

A el Ingeniero Cesar Augusto López Quintero, Especialista en Explosivos y Docente de la Facultad de Estudios a Distancia de la Universidad Militar Nueva Granada, Director del trabajo de grado.

A la Ingeniera Johanna Carolina Ruiz Acero, Docente Facultad de Estudios a Distancia, Universidad Militar Nueva Granada, Docente Opción de Grado.

A las Autoridades de la Universidad, a todos los Docentes que estuvieron involucrados a lo largo de la formación académica.

A todas aquellas personas que indirectamente colaboraron con la realización de este trabajo.

## Tabla de Contenido

<b>Lista de Tablas .....</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>xi</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Planteamiento del Problema.....</b>	<b>2</b>
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>4</b>
2.1 Objetivo General.....	4
2.2 Objetivos Específicos.....	4
<b>3. Justificación.....</b>	<b>5</b>
<b>4. Antecedentes .....</b>	<b>8</b>
<b>5. Marco Teórico y Estado del Arte .....</b>	<b>13</b>
5.1 La Madera y sus Características .....	14
5.2 Dureza de la Madera .....	16
5.3 Las Especies de Árboles usadas en la Industria Nacional .....	17
5.4 El Eucalipto ( <i>Eucalyptus Globulus</i> ).....	20
5.5 El Pino ( <i>Pinus Radiata</i> ).....	21
5.6 Agentes Explosivos.....	22
5.6.1. <i>ANFO (Amonium Nitrate and Fuel Oil)</i> .....	22
5.6.2. <i>Indugel Plus AP</i> .....	23
5.6.3. <i>Indugel AV 800</i> .....	24
5.6.4. <i>Indugel plus PM (permisible)</i> .....	26
5.6 Accesorios de Voladura .....	27
5.6.1. <i>Mecha de Seguridad</i> .....	27
5.6.2. <i>Cordón Detonante</i> .....	28
5.6.3. <i>Detonadores no eléctricos o fulminantes</i> .....	29
5.6.4. <i>Detonadores eléctricos</i> .....	31
5.6.5. <i>Capacitador – Explosor permisible</i> .....	33
<b>6. Métodos de Carga para Corte de Árboles con Explosivos .....</b>	<b>35</b>
6.1. Cargas Explosivas Internas .....	35
6.2. Cargas Explosivas Externas .....	36
6.3. Cargas para Cortar Árboles y Madera.....	38
6.3.1. Con cargas internas.....	39
6.3.2. Con cargas externas .....	46
<b>7. Método y Cálculo de Cargas Requeridas .....</b>	<b>48</b>

<b>8. Recursos .....</b>	<b>104</b>
<b>9. Elaboración de Pruebas.....</b>	<b>111</b>
<b>10. Análisis de Resultados y Método Óptimo .....</b>	<b>133</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>156</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>158</b>
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>159</b>

## Lista de Tablas

Tabla 1: Especies forestales más utilizadas en la Industria Nacional .....	19
Tabla 2: Características técnicas ANFO .....	23
Tabla 3: Características técnicas Indugel Plus AP.....	24
Tabla 4: Características técnicas Indugel AV 800 .....	25
Tabla 5: Características técnicas Indugel plus PM .....	27
Tabla 6: Características técnicas mecha de seguridad .....	28
Tabla 7: Características técnicas cordón detonante .....	29
Tabla 8: Características técnicas Capacitador – Explosor permisible .....	33
Tabla 9: Eficiencia relativa ( $\eta$ ) como carga.....	38
Tabla 10: Densidades de algunos explosivos.....	43
Tabla 11: Resumen Tanteo y Diámetro de Barrenos para Carga Interna .....	90
Tabla 12: Resumen Cálculos de Carga Explosiva en Kilogramos por Prueba .....	95
Tabla 13: Presentación Comercial Indugel .....	95
Tabla 14: Cantidad de Explosivo Presentación Comercial Tacos de 26 * 250 mm .....	103
Tabla 15: Cantidad de Explosivo Presentación Comercial Tacos de 32 * 250 mm .....	103
Tabla 16: Cantidad de Explosivo Indugel Plus PM Requerido por Prueba.....	108
Tabla 17: Comparativo Carga y Barrenos según Resultados Fórmula Internas y Prueba Realizada .....	141
Tabla 18: Comparativo Carga según Resultados Fórmulas Externas y Prueba Realizada .....	150

## Lista de Figuras

<b>Figura 1: Safe-T-Cut</b> .....	12
<b>Figura 2: Sección transversal del tronco de un árbol</b> .....	15
Figura 3: ANFO .....	22
Figura 4: Indugel Plus AP.....	24
Figura 5: Indugel AV 800.....	25
Figura 6: Indugel Plus PM .....	26
Figura 7: Mecha de seguridad.....	28
Figura 8: Cordón detonante .....	29
Figura 9: Detonador no eléctrico .....	30
Figura 10: Detonador eléctrico .....	32
Figura 11: Partes de un detonador eléctrico.....	32
Figura 12: Explosor permisible ZEB D/C 30-U .....	34
Figura 13: Colocación de carga explosiva interna.....	35
Figura 14: Colocación de carga explosiva externa .....	37
Figura 15: Entramado de corte de carga interna .....	40
Figura 16: Ubicación del explosivo con carga interna.....	41
Figura 17: Ubicación del explosivo con dos barrenos.....	42
Figura 18: Plantillas alternativas de disposición de barrenos .....	43
Figura 19: Entramado de corte de carga externa .....	47
Figura 20: Ubicación explosivo de prueba troza de Eucalipto .....	52
Figura 21: Ubicación explosivo de prueba troza de Pino .....	72
Figura 22: Ubicación Lugar Pruebas Simijaca Cundinamarca .....	104
Figura 23: Cantera La Esperanza - Simijaca Cundinamarca .....	105
Figura 24: Trozas de Eucalipto .....	106
Figura 25: Conduflex en PVC.....	107
Figura 26: Dispositivo de Montaje para Explosivo de Carga Externa.....	107
Figura 27: Muestra Explosivo Indugel Plus PM.....	109
Figura 28: Muestra Detonador Permisible Eléctrico Insensible de Cobre.....	109
Figura 29: Muestra Explosor ZEB D/C Utilizado .....	110
Figura 30: Diseño Montaje Primera Prueba para Carga Interna.....	114
Figura 31: Elaboración de Barrenos para Carga Interna.....	115
Figura 32: Colocación de la Carga.....	116
Figura 33: Retacado del Barreno para Carga Interna.....	117
Figura 34: Conexión con Explosor .....	118
Figura 35: Voladura Carga Interna .....	119
Figura 36: Diseño Montaje Segunda Prueba para Carga Interna.....	120
Figura 37: Diseño Montaje Tercera Prueba para Carga Interna .....	121
Figura 38: Diseño Montaje Cuarta Prueba para Carga Interna.....	122
Figura 39: Diseño Montaje Quinta Prueba para Carga Interna.....	123
Figura 40: Diseño Montaje Primera Prueba Carga Externa.....	124
Figura 41: Trozas para Pruebas Carga Externa.....	125

Figura 42: Dispositivo para Carga Externa.....	127
Figura 43: Montaje Colocación Dispositivo para Carga Externa .....	128
Figura 44: Conexión con Explosor para Prueba Externa.....	129
Figura 46: Voladura Carga Externa .....	130
Figura 47: Diseño Montaje Segunda Prueba Carga Externa .....	131
Figura 48: Diseño Montaje Tercera Prueba Carga Externa .....	132
Figura 48: Resultado Primera Prueba con Carga Interna.....	134
Figura 49: Resultado Segunda Prueba con Carga Interna .....	136
Figura 50: Resultado Tercera Prueba con Carga Interna .....	137
Figura 51: Resultado Cuarta Prueba con Carga Interna.....	139
Figura 52: Resultado Quinta Prueba con Carga Interna .....	143
Figura 53: Fragmentos Resultantes Quinta Prueba con Carga Interna .....	143
Figura 54: Resultado Primera Prueba con Carga Externa .....	145
Figura 55: Conformación Segunda Prueba con Carga Externa .....	146
Figura 56: Resultado Segunda Prueba con Carga Externa .....	148
Figura 57: Montaje Tercera Prueba Carga Externa .....	149
Figura 57: Resultado Tercera Prueba con Carga Externa.....	151

## Abstract

The aim of this work is to analyze the methods used to make wood cutting using explosives, a material that is little used for blasting of this nature since they are usually used in harder materials such as rock. In the field of engineering is presented as an option to take into account when it is required to clear large wooded areas for the execution of infrastructure works different from traditional methods.

The work is composed of three parts, the first one describes and explains basic concepts concerning wood, its main characteristics and its use within the industry, identify the species that predominate in the national territory. In the same way a brief description of the main characteristics of the explosive agents and accessories that are required in the research.

The second part deals with existing methods for cutting trees with explosives, is provided an explanation of the method of internal explosive charge and external explosive charge. After this, is given a clear explanation of the formulas investigated for the calculation of the explosive charge and is applied to obtain the amount of explosive needed to make the cut in wood.

In the final part the methods are analyzed and compared, the most efficient is determined for the cutting of trees and wooden beams with the use of explosives.

**Keywords:** Explosives, Wood, Tree cutting, Internal Explosive Load, External Explosive Load.

## **Introducción**

El presente trabajo investigativo tiene como finalidad analizar los métodos para corte de árboles y los diferentes métodos de carga con el uso de explosivos de los cuales se tenga conocimiento para lograr su utilización o adecuación a las necesidades de nuestro territorio.

El análisis de estos métodos es de suma importancia en el campo de los explosivos, ya que con ello se pretende tener un punto de partida en el ámbito nacional que permita su adecuado uso ya que se tienen muy pocos conocimientos de su utilización en la madera.

Para ello, se van a realizar diferentes actividades como recopilación de información, indagación de los métodos conocidos, aplicación de los métodos en campo, comparativos, conclusiones y presentación de las posibles soluciones a los problemas encontrados, que permitan determinar un método que sea eficiente cuando se vayan a realizar trabajos que requieran despejar rápidamente zonas para adelantar obras civiles como por ejemplo abrir una carretera en zonas boscosas.

## 1. Planteamiento del Problema

En las obras civiles cuando se requiere despejar zonas boscosas para poder adelantar obras de infraestructura, surge la necesidad de realizar labores de corte y remoción de árboles la cual se puede elaborar por medios manuales o con la utilización de maquinaria especializada cuando la topografía del terreno lo permita.

Esta tarea resulta relativamente sencilla cuando se trata de unos pocos elementos y las condiciones del terreno son adecuadas, es decir no se presentan relieves altamente pronunciados o zonas de difícil acceso que dificulten la labor, pero cuando lo que se requiere es elaborar el corte de bastantes árboles o acceder a zonas que pueden resultar peligrosas para los trabajadores por los riesgos de sufrir alguna lesión incluso la muerte, requieren de la utilización de un método alternativo que permita optimizar el tiempo y por supuesto los recursos evitando los riesgos presentes en los métodos tradicionales.

Es aquí cuando el uso de los explosivos se presenta como esa posible alternativa para realizar el corte de los árboles y vigas de madera como una manera ágil y segura.

Lamentablemente en Colombia los explosivos siguen siendo vistos como una herramienta del terrorismo debido al conflicto armado existente razón para que su uso sea restringido lo que ha generado su poco avance y limitado desarrollo para elaborar voladuras que contribuyan a facilitar que las obras de infraestructura se realicen con mayor celeridad.

A pesar de ello se ha venido masificando el uso de los explosivos en diferentes actividades mostrando las bondades que se pueden lograr. En el campo de la minería, cuando se requiere su extracción, los explosivos se han transformado en un mecanismo primordial para su desarrollo, igual sucede en el campo de la construcción cuando se busca la demolición de estructuras o la perforación de roca para la elaboración de túneles o carreteras.

Sin embargo, su uso ha estado ligado esencialmente a la perforación y rotura de roca en la cual ya se ha adquirido experiencia en su manejo a la vez que existe amplia literatura al respecto pero desafortunadamente no ocurre lo mismo cuando el material a utilizar es distinto a la roca como ocurre para el caso que atañe la presente propuesta, su uso en la madera.

Bajo este contexto, se plantea el siguiente problema:

Limitado conocimiento de un método adecuado para realizar el corte de árboles y vigas de madera con el uso de explosivos.

De acuerdo con esta situación, el interrogante principal del proyecto propuesto se define como:

*¿Cuál es el método más eficiente para realizar el corte de árboles y vigas de madera con el uso de explosivos?*

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Identificar el método más eficiente para realizar el corte de árboles y vigas de madera con el uso de explosivos.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Indagar sobre los diferentes métodos de corte de árboles y vigas de madera existentes con el uso de explosivos.
- Compilar la información preliminar obtenida acerca de los procedimientos de voladuras para el corte de árboles y vigas de madera.
- Identificar los tipos de árboles usados en la Industria Nacional.
- Aplicar los métodos indagados en trabajo de campo en dos de los tipos de árboles más utilizados para encontrar el método más eficiente o su adaptación a las necesidades nacionales.
- Describir el comportamiento de cada uno de los métodos identificando sus ventajas o desventajas.
- Consolidar los datos obtenidos, analizar la información y presentar el método más adecuado para la planeación y ejecución de trabajos de corte de árboles y vigas de madera con el uso de explosivos.

### 3. Justificación

Debido a que en muchas de las obras de infraestructura se requiere el vencer obstáculos naturales para poder realizarlas, con la elaboración del tema propuesto se pretende explorar dentro de los métodos existentes para el corte de árboles y vigas de madera, cuál de ellos es el más idóneo a la hora de utilizar explosivos ya que no son muy utilizados para tal fin, pero tienen mucha utilización en el campo de la minería y la construcción generalmente para destruir, romper o debilitar materiales de una dureza relevante como lo son las rocas pero sub-utilizado para otros tipos de trabajo como lo puede ser el lograr el corte de árboles que en muchas ocasiones requiere de un método diferente para poder realizar el trabajo evitando los riesgos inherentes como el no poder utilizar métodos tradicionales en zonas de difícil acceso debido a la topografía presente o que conllevan demasiado tiempo en horas de trabajo hombre para poder llevarlas a cabo.

En promedio se toma dos años para entrenar a un aserrador hasta el nivel básico necesario para trabajar en torno a los árboles más peligrosos, por ello se está optando por capacitar desintegradores para usar explosivos en estos ambientes. (Weimer, 2013)

Ahora bien en el sector forestal de Nueva Zelanda donde se presentan las tasas más altas de lesiones inherentes al trabajo de corte de árboles con herramientas tradicionales demuestran un elevado registro de lesiones incluyendo riesgos físicos y errores potenciales asociados al corte de árboles (Bentley, Parker, & Ashby, 2005)

Alvis, J., & Sotelo, M. (2009) indica que “existen factores que influyen en el rendimiento de los equipos de extracción forestal como son: La planeación, las condiciones topográficas, las condiciones climáticas, los aspectos técnicos, la calificación de la mano de obra, el mantenimiento de la maquinaria y equipos, las órdenes impuestas y los factores forestales entre otros”.

El uso de explosivos ha adquirido una relevancia importante ya que logran en menor tiempo trabajos que con otros medios tardarían mucho más generando costos y pérdidas innecesarias, es decir con su adecuado uso logran eficacia y economía además de poder ser utilizados a distancias prudenciales evitando los riesgos a que se ven expuestos los aserradores cuando realizan el trabajo en zonas de difícil acceso o que conlleven un riesgo elevado.

The National Park Service, (2007) indica que “la tala de árboles peligrosos con explosivos a menudo es más seguro que el corte con una sierra eléctrica porque el personal se encuentran a una distancia segura del árbol cuando el peligro es mayor”.

Weimer, (2013) cuando hace referencia a los riesgos de elaborar el trabajo a grandes alturas indica “las técnicas de voladura implican un simple uso de explosivos, que cuando se combina con un amplio conocimiento de la madera, se tienen muy buenas herramientas para hacer el trabajo y brindan al personal que trabaja en alturas una forma segura de volver a casa con sus familias.

Para lograr lo anterior, se requiere conocer las características y propiedades de los explosivos y del material en el que va a ser utilizado, conocer los métodos que han sido utilizados para tal fin, así como seleccionar la carga interna o externa adecuada de acuerdo a la labor que se va a realizar.

Desafortunadamente a nivel nacional es muy poca por no decir que nula su utilización y el único referente con que se cuenta es la utilidad que le dan las fuerzas militares a los explosivos cuando quieren despejar un área para aterrizaje temporal de aeronaves o simplemente quieren detener el avance de fuerzas enemigas por intermedio de obstáculos colocados en las vías de acceso o caminos comunes de tránsito.

Por tal razón con el análisis y aplicación de los métodos se presenta una excelente oportunidad para abordar un tema poco estudiado y que tendría mucha utilidad en el ámbito de la Ingeniería Civil así como en otros campos como lo puede ser la industria forestal de Colombia.

#### 4. Antecedentes

El uso de explosivos para el corte de árboles ha sido muy utilizado en otros países para evitar peligros inminentes que puedan significar un riesgo elevado para la vida de las personas al elaborar esta labor con técnicas tradicionales mediante el uso de herramientas mecánicas o manuales evitando de esta manera posibles lesiones y en muchos casos la muerte.

Para el caso de los Estados Unidos, el equipo del Servicio Forestal fue detrás de los árboles con explosivos de alto poder. “El interés en la voladura de árboles peligrosos se inició en Colorado, donde enormes extensiones de bosques han sucumbido a las infestaciones de escarabajos de pino de montaña. Esos árboles muertos amenazan campamentos, carreteras y otras instalaciones públicas” (Chaney, 2012).

Los árboles cuando son afectados por insectos, generalmente se pudren desde su interior causando roturas y caídas que pueden llegar a ser impredecibles lo que representa un riesgo potencial para un aserrador. Calculando la cantidad necesaria de explosivo y fijándola al árbol así como tratando de vincular la mayoría de árboles posibles se logra una voladura eficiente que puede llegar a derribar 50 árboles a la vez, contrarrestando los peligros inherentes a esta labor.

Por medio de una cantidad adecuada de explosivo y efectuando una perforación en el tronco para poder introducirlo, se reduce de forma notoria los daños causados a la madera

mientras que si se hace colocando la carga de forma externa el tronco va a presentar astillamiento similar al que se produce cuando éste es derribado por el viento.

En cuanto a Canadá, en la Columbia Británica, las condiciones del clima sumadas a lo escarpado del terreno crean condiciones suficientes para que los árboles se pudran y sufran caídas que se convierten en verdaderas trampas al tratar de elaborar cualquier trabajo en ellos lo que la convierte según estadísticas en una de las zonas con mayores tasas de mortalidad y lesiones ya que la gran parte de personas que se dedican al trabajo forestal sufren caídas con consecuencias fatales.

(Weimer, 2013) promueve “el aumento de la seguridad de los trabajadores que sufren caídas por medio del uso de explosivos”. En la Columbia Británica, el corte de los árboles ha evolucionado a partir de tronzadoras y hachas, sierras mecánicas y más recientemente a las máquinas grandes llamados atadoras Feller y procesadores que se utilizan en las zonas con menos terreno escarpado y con la madera más pequeña.

Teniendo en cuenta que la mayoría de terreno con que cuenta la Columbia Británica es geográficamente accidentado lo que impide el acceso y el acercamiento de maquinaria especializada y que la única manera de poder realizar el trabajo en dichas zonas es poniendo en riesgo la vida de los aserradores, los explosivos resultan una herramienta útil para estos casos ya que se puede efectuar la voladura con una distancia prudencial que evite cualquier accidente, aunque se requiere de una adecuada formación, evaluación y certificación para la manipulación de los mismos.

Aunque los expertos certificados en voladuras cuentan con un amplio conocimiento en la voladura de rocas, a menudo no saben mucho acerca de la voladura de la madera por eso se hace necesario la combinación de amplios conocimientos en la madera con los conocimientos en explosivos para elaborar el trabajo adecuadamente.

“La prevención de accidentes sólo ocurrirá cuando la gente elija a la explosión no sólo para el árbol peligroso obvio, sino también aquellos árboles que pueden *probablemente* ser talados de forma segura” (Weimer, 2013).

Aunque en Estados Unidos hay iniciativas en marcha para cambiar esto, van a enfrentar los mismos desafíos que tienen en la Columbia Británica, siendo el mayor obstáculo el acceso que se tiene a los explosivos para fines forestales.

Beckley, Bob. (2008) describe una “tecnología que se utiliza para el corte de árboles con explosivos que son demasiado peligrosos para ser talados con sierras. Árboles talados con explosivos tienen muñones irregulares en vez de los tocones artificialmente planos dejados por una sierra”. Esto hace que la apariencia del corte sea similar a una caída natural.

La extracción de árboles peligrosos con explosivos puede ser una alternativa segura para el corte de los árboles. Los explosivos y sistemas de encendido son seguros y fiables cuando se utiliza correctamente. En el Servicio Forestal de EE.UU. Departamento de Agricultura, el programa de explosivos es uno de los más seguros de la agencia.

Cuando un árbol presenta cicatrices en su tronco causadas por fracturas, grietas o la separación de parte del tronco, se convierten en señales de advertencia que pueden ser demasiado peligrosas para la mayoría de los aserradores pero a la vez son excelentes candidatos para el corte con explosivos.

Esta tecnología no identifica las condiciones que hacen que un árbol sea peligroso, a la vez reemplaza tecnología de 1994, "Peligro Tala de árboles con explosivos", producido por el Centro de Tecnología y Desarrollo Missoula (MTDC).

Otra forma de cortar árboles es a través de la Safe-T-Cut, una abrazadera con explosivos fabricada por la British Explosives Company (Brexco) quien es ahora el único importador oficial y distribuidor para el Reino Unido e Irlanda (Burke, 2011).

La empresa Brexco considera que el artefacto explosivo presenta múltiples beneficios para ofrecer a las compañías energéticas.

La Safe-T-Cut fue diseñada y patentada en Suecia hace más de 18 años es una abrazadera explosiva que se utiliza para la eliminación de la vegetación de las líneas eléctricas aéreas y ha tenido continuo servicio y éxito a lo largo de Escandinavia y Europa como único método de limpieza de obstrucciones asociados a problemas de árboles y líneas eléctricas, puede ser colocada a nivel del suelo y detonada desde una distancia segura para reducir los riesgos asociados a la arboricultura.

Bajo condiciones normales de uso la Safe-T-Cut es relativamente insensible a la iniciación accidental por choque, fricción o impacto mecánico. Safe-T-Cut puede detonar si se someten a temperaturas extremadamente altas pero se mantiene estable y seguro por debajo de 80° C. El explosivo utilizado es la pentrita (PETN) que es un explosivo rápido superando los 6500 m/s, se debe utilizar para la finalidad prevista solamente. Los intentos de manipulación para alterar o dañar la unidad pueden resultar en la detonación prematura.



***Figura 1: Safe-T-Cut***

Fuente: <http://www.brexco.co.uk>

## 5. Marco Teórico y Estado del Arte

La cantidad de explosivos necesarios para cortar un árbol depende de muchos factores, incluyendo el diámetro del árbol en el que se colocan los explosivos. Cargas internas y externas requieren diferentes cantidades de explosivos, árboles verdes y muertos del mismo diámetro pueden requerir diferentes cantidades de explosivos. Maderas blandas y duras requieren diferentes cantidades de explosivos.

Beckley (2008) afirma que “si se utilizan explosivos para derribar un árbol, la tarea se convierte en una operación de voladura, con sujeción a las normas y reglamentos de la Salud y el Manual de Código de Seguridad”. El desintegrador controla la operación, incluyendo la colocación de guardias y miradores, la delimitación de las zonas de seguridad, el acceso a la zona antes y después de la explosión, se encarga de la seguridad del personal a su cargo y es quien decide dónde y cómo colocar las cargas explosivas.

Martínez, (2005) indica que “de los 114 millones de hectáreas que abarca el territorio nacional, aproximadamente la mitad corresponden a la cubierta forestal, de las cuales unos 39 millones contienen especies maderables con dimensiones apropiadas para uso industrial” (p.15).

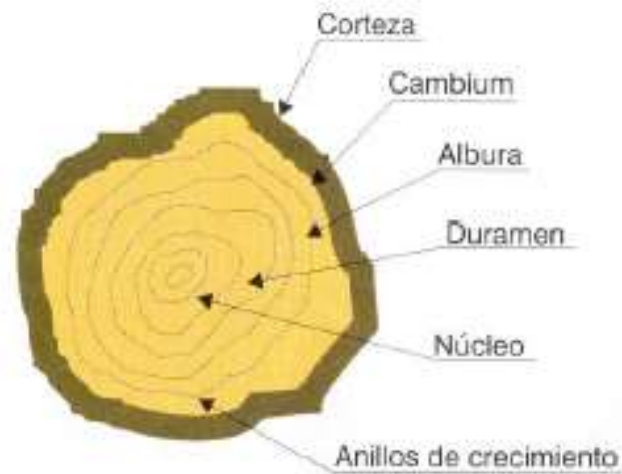
Para el adecuado desarrollo del trabajo de grado se hace necesario conocer aspectos generales sobre la madera. Es importante conocer aspectos sobre la estructura anatómica, las propiedades y características propias de cada especie en las cuales se analizarán los métodos de corte, de esta forma se logrará su adecuado uso.

## 5.1 La Madera y sus Características

La madera es un material que procede de la estructura vital de un árbol, que actúa como sostén y arraigo a la tierra. Es la parte sólida por debajo de la corteza, es decir, el conjunto de elementos lignificados, lo mismo tráqueas o traqueidas.

En un corte transversal del tronco de un árbol se puede observar la estructura interior, que está conformada por:

- *La corteza* que tiene como función el almacenamiento y conducción de nutrientes.
- *El líber o floema* por los cuales se transporta la savia, *el cambium* cuya función es el crecimiento diametral del tronco.
- *La albura* se encarga de conducir gran cantidad de agua y sales en solución desde la raíz a las hojas además de proveer la rigidez al tallo.
- *El duramen* que ocupa la porción del tronco entre la médula y la albura contiene depósitos de taninos, resinas, grasas y carbohidratos entre otras sustancias.
- *El núcleo* parte central del tronco.
- *Los anillos de crecimiento* que representan el incremento anual del árbol crecen a razón de uno al año.



**Figura 2: Sección transversal del tronco de un árbol**

Fuente: Oscar, C. R. (2015).

### *Propiedades de la madera*

En cuanto a sus propiedades estas pueden ser físicas o mecánicas.

#### *Propiedades físicas:*

- Anisotropía
- Higroscopicidad
- Densidad
- Hendibilidad
- Polaridad
- Flexibilidad
- Humedad
- Dureza
- Óptica

***Propiedades mecánicas:***

- Resistencia a la flexión
- Resistencia al cortante
- Resistencia a la tracción
- Resistencia a la compresión
- Fatiga
- Pandeo
- Propiedades elásticas

**5.2 Dureza de la Madera**

Pérez O, (2014) la define como “la resistencia al desgaste, rayado, clavado, corte con herramientas, etc. Varía según la especie del árbol. La madera del duramen es más dura que la de la albura. La madera seca es más dura que la verde” (p.14).

Se clasifican de acuerdo a su resistencia y densidad en maderas:

- ✓ *Duras*
- ✓ Blandas
- ✓ Semiduras

En términos generales, esta clasificación obedece a la facilidad o dificultad que presenta la madera a la hora de ser utilizada, es decir a su trabajabilidad ya sea mecánica o manual dada principalmente por su mayor o menor resistencia.

### **5.3 Las Especies de Árboles usadas en la Industria Nacional**

Colombia posee una amplia variedad de especies nativas e introducidas debido principalmente a su ubicación geográfica y a que cuenta con todos los pisos térmicos lo que ha contribuido a que cuente con una riqueza en su flora muy privilegiada otorgándole ventajas en cuanto a la calidad de sus suelos como en costos relacionados al valor de la tierra y mano de obra en comparación con otros países de la región.

Desafortunadamente estas ventajas han sido desaprovechadas por no contar con un adecuado manejo ya que la mayoría del territorio nacional cuenta con bosques naturales los cuales no pueden ser aprovechados por la necesidad de protección y conservación y a la poca presencia de plantaciones que permitan su crecimiento.

Según el Departamento Nacional de Planeación (2007), los bosques naturales se concentran en las zonas del Amazonas, Andina, la Orinoquía, Pacífica y el Caribe con porcentajes del 70, 12.8, 10.3, 6.5 y 0.6 respectivamente. Para el caso de su aprovechamiento industrial, éste se concentra en los departamentos de Antioquia, Cundinamarca, Valle y la ciudad capital Bogotá.

J. E. Austin Associates, Inc. (2008) indica en su estudio de competitividad forestal que “aunque en Colombia se comercializan alrededor de 300 especies identificadas, 35 especies abarcan el 90% del volumen movilizado y las 10 más movilizadas suman el 70% de ese mismo volumen”.

Teniendo en cuenta la industria de la madera, se hace necesario conocer las cadenas forestales que se han establecido para su aprovechamiento las cuales están conformadas principalmente por el sector primario que es el encargado de la producción forestal o la reforestación, el sector industrial el cual tiene por objeto la transformación de la madera y por último el sector comercial.

Con base a la información anterior, al diverso y gran número de especies forestales presentes en el Territorio Nacional, ésta se limitará a especificar aquellas especies que por su comercialización presentan una amplia demanda debido a su área de plantación, alto valor agregado, su rendimiento, su mejoramiento genético y al uso final por parte de empresas dedicadas a su transformación. Su extracción se dedica principalmente a nutrir procesos industriales referentes a obtención de pulpa de papel, tableros y madera aserrada.

A continuación se relacionan las especies más relevantes en la Industria Colombiana:

**Tabla 1: Especies forestales más utilizadas en la Industria Nacional**

<b>Nombre Común</b>	<b>Nombre Científico</b>
Abarco	Cariniana pyriformis
Acacia	Acacia magnium
Amarillo	Protium cf. grandifolium
Cedro	Cedrela odorata
Ceiba Tolua	Bombacopsis quinata
Cuángare *	Dialyanthera otobo
Eucalipto	Eucalyptus globulus
Eucalipto rosado	Eucalyptus grandis
Eucalipto	Eucalytus pellita
Eucalipto	Eucalytus tereticornis
Frijolito-Tambor	Schizolobium parahybum
Melina	Gmela arborea
Nogal Cafetero	Cordia alliadora
Pino Caribe	Pinus caribea
Pino pátula	Pinus patula
Pino tecunumanii	Pinus tecunumanii
Pino oocarpa	Pinus oocarpa
Roble	Tabebuia rosea
Sajo *	Camptosperma panamensis
Sande *	Brosimum utile
Sapán	Clathrotropis brachypetala
Teca	Tectona grandis
* Representan alrededor del 36% de toda la madera legal	

Fuente: PROEXPORT Colombia. Elaboración Propia

Las especies de Cuángare, Sajo y Sapán son originarias de la región pacífica, específicamente a los bosques inundables y colinas bajas las cuales son conocidas con el nombre de “revoltura” y se incluyen en la anterior tabla debido al alto porcentaje que representan en la comercialización legal de madera en Colombia.

PROEXPORT Colombia (2009) destaca dentro de las especies con más valor agregado los “Pinus pátula y el Eucalyptus grandis para la producción de pulpa; Teca, Roble y Acacia Mangium para la madera de aserrío y la Melina para contrachapados”.

De la misma manera en la región de Cundinamarca y Bogotá las especies que se encuentran presentes en las plantaciones son el Eucalyptus glóbulos y el Pinus pátula en un 65 y 25 por ciento respectivamente, el restante lo conforman otras especies es decir el 10 por ciento (Cadena Forestal Bogotá Cundinamarca, 2006).

#### **5.4 El Eucalipto (Eucalyptus Globulus)**

Es una planta leñosa originaria de Australia que comprende alrededor de 500 especies de árboles y 138 variedades pero este número puede ser mayor por su facilidad al realizar híbridos dando cabida a la aparición de especies nuevas.

Debido a su capacidad de almacenar agua en sus raíces, son árboles resistentes a la sequía además de tener un rápido crecimiento lo que lo posicionó alrededor del mundo como una de las especies más cultivadas ya que posee una gran capacidad de adaptación a condiciones adversas y desfavorables, otra característica es que no permite el crecimiento de otras especies es decir posee la habilidad de eliminar a las especies competidoras.

Dependiendo de su edad, puede alcanzar alturas hasta de 100 metros y un diámetro de 2.5 metros, cuenta con una alta densidad al igual que una elevada dureza. Para el caso

colombiano éste árbol se encuentra principalmente en la zona andina en departamentos como Cundinamarca, Boyacá, Antioquia y Caldas.

En cuanto a su uso es muy variado ya que se utiliza para elaboración de pulpa y papel, madera aserrada, construcción liviana y pesada, elaboración de muebles, tableros, postes, cercas, entre otros.

PROEXPORT Colombia (2009), indica que “en Colombia las especies forestales tardan menor tiempo para crecer y ser productivas, de lo que tardarían en otros países. En el caso del Eucalipto se pueden lograr rendimientos de hasta 30 (m<sup>3</sup>/ha/año) con un turno de 8 años” (p. 9).

### **5.5 El Pino (*Pinus Radiata*)**

Árbol originario de California EU, pero que debido a su rápido crecimiento y su aprovechamiento en la industria del papel se ha masificado su cultivo en otras regiones como ocurre en gran parte de Suramérica además de ser muy utilizado para la reforestación. En Colombia está presente principalmente en la zona andina en alturas entre los 1800 a los 3500 msnm dependiendo de su especie.

Puede alcanzar una altura de 60 metros y un diámetro de más de 1 metro, posee un tronco recto, es una madera blanda lo que la hace fácil de trabajar.

Su uso se centra principalmente en la industria de muebles, pasta y papel, contrachapados, en la construcción, en la fabricación de tableros, pisos de madera entre otros.

## 5.6 Agentes Explosivos

### 5.6.1. ANFO (*Amonium Nitrate and Fuel Oil*)

Está conformado por una mezcla de nitrato de amonio (94%) y ACPM (6%) (Aceite combustible de motores), para su iniciación se requiere de un agente multiplicador como el Pentofex. Es un explosivo muy seguro, baja sensibilidad al roce, la fricción y el golpe, insensibilidad a la acción del detonador N° 8. Su principal desventaja es su nula resistencia al agua.

Comúnmente empleado para voladuras a cielo abierto, como explotación de canteras y rotura de rocas blandas y semiblandas de mediano tamaño.



**Figura 3: ANFO**

Fuente: Catálogo de productos Indumil 2010

Características técnicas:

**Tabla 2: Características técnicas ANFO**

Densidad	0,85 ± 0,05 g/cm <sup>3</sup>
Velocidad de detonación	3500 ± 200 m/s
Potencia absoluta en volumen *	757 cal/cm <sup>3</sup>
Potencia absoluta en peso	890 cal/g
Potencia relativa en volumen **	1,00
Resistencia a la humedad	Ninguna
* Medido en tubo de PVC de 3" iniciado con multiplicador Pentofex de 337,5 g	
** ANFO = 100	

Fuente: Catálogo Indumil 2010. Elaboración Propia

### **5.6.2. Indugel Plus AP**

Es un explosivo tipo hidrogel aluminizado sensible al detonador No. 8, elaborado con sustancias gelificantes que evitan la segregación de los ingredientes oxidantes y combustibles sensibilizados en la mezcla, se caracteriza por su elevada seguridad en su manejo debido a su baja sensibilidad al roce y al impacto.

Comúnmente utilizado en actividades de minería y demoliciones en diámetros pequeños incluso en presencia de agua.



**Figura 4: Indugel Plus AP**

Fuente: Catálogo de productos Indumil 2010

Características técnicas:

**Tabla 3: Características técnicas Indugel Plus AP**

Densidad	1,21 ± 0,06 g/cm <sup>3</sup>
Velocidad de detonación	4500 ± 500 m/s
Potencia absoluta en volumen *	1085 cal/cm <sup>3</sup>
Potencia absoluta en peso	904 cal/g
Potencia relativa en volumen *	1,43
Resistencia a la humedad	Excelente
*ANFO = 100	

Fuente: Catálogo Indumil 2010. Elaboración Propia

### 5.6.3. Indugel AV 800

El Indugel AV 800 es un agente de voladura tipo hidrogel que requiere un multiplicador Pentofex para su iniciación. Es un explosivo, denso, fácilmente sumergible en agua y con alta energía específica. Presenta gran seguridad en su manejo debido a su baja sensibilidad al roce y al impacto. No contiene nitroglicerina por lo cual no produce dolor de cabeza durante su manipulación, almacenamiento y empleo (Indumil, 2010).

Empleado en explotaciones a cielo abierto (de rocas blandas a semi-duras) y en minería, con presencia de agua y diámetros de barreno mayores a 89 mm.



**Figura 5: Indugel AV 800**

Fuente: Catálogo de productos Indumil 2010

Características técnicas:

**Tabla 4:** Características técnicas Indugel AV 800

Densidad	$1,23 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$
Velocidad de detonación	$4500 \pm 500 \text{ m/s}$
Potencia absoluta en volumen *	$1080 \text{ cal/cm}^3$
Potencia absoluta en peso	$900 \text{ cal/g}$
Potencia relativa en volumen **	1,43
Resistencia a la humedad	Excelente
* Medido al aire sin confinar iniciado con multiplicador Pentofex de 337,5 g	
** ANFO = 100	

Fuente: Catálogo Indumil 2010. Elaboración Propia

#### **5.6.4. Indugel plus PM (permisible)**

Es un explosivo tipo hidrogel aluminizado, con sustancias gelificantes que evitan la segregación de las sustancias oxidantes y combustibles sensibilizados en la mezcla. Dentro de sus principales características se encuentran su excelente resistencia al agua y su alta energía específica, además de presentar confiabilidad y gran seguridad en su manipulación por ser de baja sensibilidad al roce y al impacto razones que lo hacen de gran utilidad en la explotación minera subterránea donde puede presentarse presencia de gas grisú y polvo de carbón.

Produce humos permisibles de acuerdo a la agencia MSHA (Mine Safety and Health Administration).



**Figura 6: Indugel Plus PM**  
Fuente: Catálogo de productos Indumil 2010

Características técnicas:

**Tabla 5:** Características técnicas Indugel plus PM

<b>Físicas</b>	
Densidad del encartuchado	1,17 ± 0,03 g/cm <sup>3</sup>
Resistencia a la humedad	Excelente
Diámetro crítico	29 mm
<b>Balísticas</b>	
Velocidad de detonación (*)	4500 ± 500 m/s
Potencia relativa en volumen RBS	1,25
* Medido al aire sin confinar (Diámetro 32mm)	

Fuente: Catálogo Indumil 2010. Elaboración Propia

## 5.6 Accesorios de Voladura

### 5.6.1. Mecha de Seguridad

Es un cordón cuyo núcleo está conformado por pólvora negra, con varias capas de hilo de algodón y protegido por un polivinilo que garantiza su permeabilidad, flexibilidad y resistencia a la abrasión. Se utiliza para transportar la llama y para iniciar los detonadores a una distancia suficiente para garantizar la seguridad del personal. Posee una velocidad de combustión de 130 s/m.



**Figura 7: Mecha de seguridad**  
Fuente: Catálogo de productos Indumil 2010

Características técnicas:

**Tabla 6: Características técnicas mecha de seguridad**

Densidad de carga	5,5 ± 0,5 g/cm <sup>3</sup>
Tiempo de combustión *	130 ± 10% s/m
Alcance de llama	40 mm mínimo
Resistencia a la humedad	Excelente
Color	Blanco
Longitud por bobina	250 m
Bobinas por caja	2
* Medido a 2600 m.s.n.m	

Fuente: Catálogo Indumil 2010. Elaboración Propia

### **5.6.2. Cordón Detonante**

Es un cordón conformado por un núcleo de pentrita y recubierto por un polivinilo que le brinda resistencia al agua y a la abrasión. Es utilizado para transportar una onda explosiva desde un punto a otro, o conectar una carga explosiva con otra. Posee una velocidad de detonación de 7000 m/s.



**Figura 8: Cordón detonante**

Fuente: Catálogo de productos Indumil 2010

Características técnicas:

**Tabla 7: Características técnicas cordón detonante**

Densidad lineal	3 - 6 - 12 - 38 g/cm
Velocidad de detonación	9200 ± 200 m/s
Resistencia a la tracción	70 ± 5 kgf
Impermeabilidad a la presión hidrostática 3kg-f/cm <sup>2</sup> (24h)	Excelente

Fuente: Catálogo Indumil 2010. Elaboración Propia

### **5.6.3. Detonadores no eléctricos o fulminantes**

Son dispositivos que sirven para disparar una carga explosiva. Consta de un casquillo metálico de cerca de 7mm de diámetro y 45 – 51mm de longitud, abierto en uno de los extremos y lleno de carga explosiva hasta dos tercios de su longitud aproximadamente. La carga en la parte inferior del casquillo consiste en un iniciador secundario, tetril o TEN (pentrita) y exógeno, por encima del cual se prensa la sustancia explosiva, iniciadora primaria, fulminato de mercurio o azida de plomo con trinito resorcinato de plomo (TNR). Sobre la



#### 5.6.4. *Detonadores eléctricos*

Es el dispositivo utilizado en el encendido eléctrico. Se compone de un casquillo metálico de aluminio o cobre que contiene un explosivo iniciador, una carga base y un puente de incandescencia.

Pueden incluir, entre el puente y el explosivo iniciador, una pastilla retardadora. A las características de los detonadores pirotécnicos tiene que añadirse la de soportar una corriente de prueba, con 100 % de fiabilidad, y asegurar su funcionamiento a partir de una corriente determinada.

Los detonadores eléctricos los podemos clasificar: de acuerdo con su sensibilidad eléctrica, en sensibles, insensibles y altamente insensibles; dependiendo de su tiempo de respuesta, en instantáneos, retardo (décimas de segundo) y microrretardo (milésimas de segundo). Existen, además, detonadores eléctricos para iniciación de detonaciones con fines especiales: sísmicos y de seguridad.

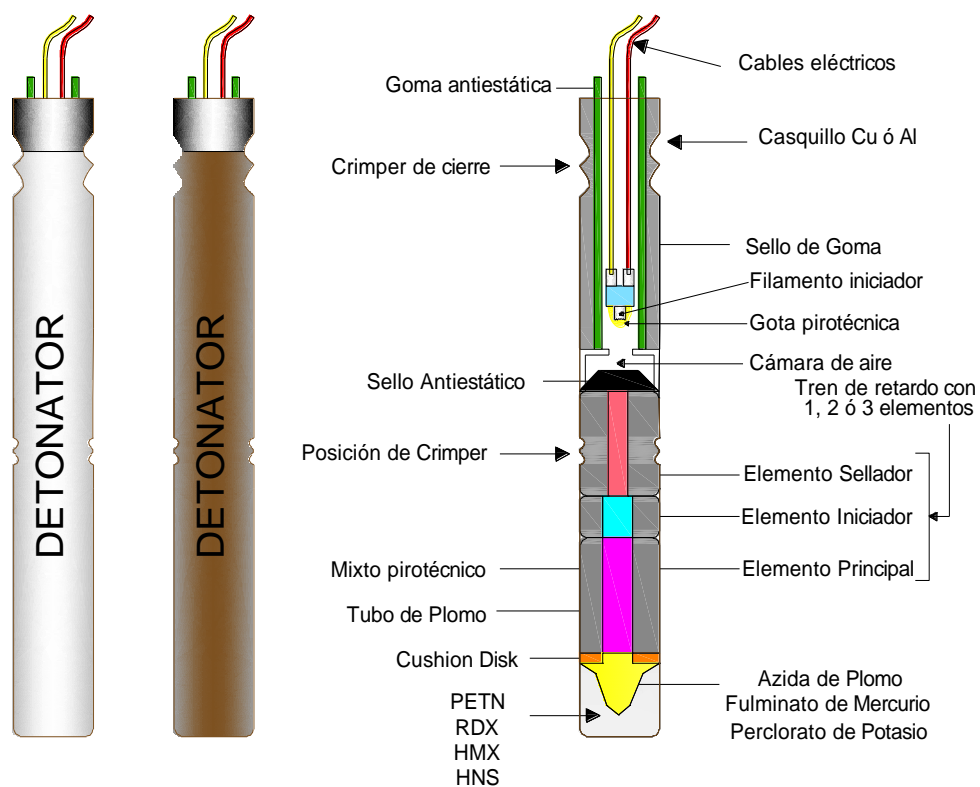
Para el caso de los *Detonadores permisibles* (antideflagrantes o antrigrisú), su uso es muy común en la minería de carbón ya que generalmente dichos lugares contienen una atmósfera inflamable y la presencia de gas grisú. Normalmente son de tipo ST insensible e impermeable, encapsulados en cobre o latón ya que los de aluminio pueden inflamar el gas grisú.



**Figura 10: Detonador eléctrico**

Fuente: Internet.

## PARTES DE UN DETONADOR ELÉCTRICO



**Figura 11: Partes de un detonador eléctrico**

Fuente: Catálogo Fábrica de explosivos Antonio Ricaurte FEXAR. Elaboración Propia.

### 5.6.5. Capacitador – Explosor permisible

Son unidades portátiles adecuadas para que enciendan detonadores eléctricos. Las máquinas de voladura ZEB se componen principalmente de generador, condensador y dispositivo de liberación.

El generador produce energía al girar su manivela la cual es almacenada por un condensador. Si el condensador ha acumulado la energía necesaria, esta será entregada automáticamente o controlada a través de un Botón (push) al ser oprimido, la cual depende del tipo de explosión y de máquina, a través de las terminales que han sido conectadas.

Cuando el condensador descarga la energía suministrada alcanza inmediatamente su máximo valor y así asegura un encendido rápido y fiable de todos los detonadores. La capacidad de esta máquina de voladura se define en la resistencia máxima (ohm) del circuito de encendido. Es importante que la resistencia del circuito de encendido no supere la resistencia máxima permitida de la máquina de voladura.

**Tabla 8: Características técnicas Capacitador – Explosor permisible**

Voltaje del condensador (aprox.)	780 V
Capacidad del condensador (aprox.)	16 $\mu$ F
Peso (aprox.)	2.4 kg
Dimensiones (aprox.)	100 x 125 x 155 mm
Máxima resistencia del circuito	U 125 $\Omega$
Detonadores de puente con hilos de acero de 3,5 m de longitud en conexión en serie	30 U
Detonadores de puente con cables Cu de 3,5 m de longitud en conexión en serie	90 U
Dispositivo de prueba correspondiente (tipo)	ZEB/P/D/CU 30 K

Fuente: [www.zeb-maxam.com](http://www.zeb-maxam.com). Elaboración Propia



**Figura 12: Explosor permissible ZEB D/C 30-U**  
Fuente: [www.zeb-maxam.com](http://www.zeb-maxam.com)

## 6. Métodos de Carga para Corte de Árboles con Explosivos

Los explosivos de acuerdo a la colocación de la carga pueden ser internas o externas, o una combinación de los dos.

### 6.1. Cargas Explosivas Internas

Son cargas colocadas en barrenos en el blanco, requieren de menor cantidad de explosivos y onda de choque. Los agujeros son perforados donde luego se introduce la carga que pueden ir embaladas o introducidas a granel las cuales son retacadas (atacadura) mediante arcilla, arena u otro material inerte. Tienen como ventaja la reducción del chorro de aire y el ruido así como el control de la caída.

No deben ser utilizados para talar un árbol hueco o decaído. Sólo la perforación de un agujero para las cargas internas podría debilitar el árbol, haciendo que se colapse de manera impredecible (Beckley, 2008).



**Figura 13: Colocación de carga explosiva interna**

Fuente: Felling Hazard Trees With Explosives

## 6.2. Cargas Explosivas Externas

Son cargas colocadas sobre la superficie de un blanco. Envolver los explosivos alrededor del árbol es un método eficaz para el corte de árboles peligrosos pero su utilización es menor debido a que de esta forma no se puede controlar la dirección de caída del árbol. Para los árboles pequeños se pueden cortar envolviendo múltiples bucles de cordón detonante alrededor del tronco.

Cuando hay una carga focalizada externa, el árbol cae generalmente hacia el lado donde se colocan los explosivos. “Algún control direccional es posible mediante la colocación de la carga en el lado del tronco hacia el que se quiere que caiga el árbol” (Weimer, 2013).

Beckley, (2008) indica que “las cargas que se colocan externamente producen ondas de choque más fuertes y más onda aérea que las cargas que se colocan internamente. Por ejemplo, la cantidad de explosivos necesarios para talar árboles de gran tamaño podrían producir suficiente corriente de aire para dañar estructuras dentro de 2 millas. Con cargas interiores, una explosión similar podría ser detonada dentro de 500 a 700 pies de estructuras sin dañarlos”.



**Figura 14: Colocación de carga explosiva externa**

Fuente: Felling Hazard Trees With Explosives

En algunos casos, cuando hay que deshacerse de árboles centenarios muy grandes que pueden llegar a tener un diámetro de 2 metros o más, el mejor método para este tipo de árbol es cavar debajo de las raíces y enterrar una bolsa con imprimación de ANFO. La menor velocidad de detonación (VOD) de ANFO tiende a hacer un mejor trabajo al soltar o aflojar la tierra de debajo del árbol y dejar que caiga sin romper el tope del árbol como si ocurriría con una explosivo de una mayor velocidad de detonación.

Los métodos alternativos de caída son necesarios si se requiere tratar situaciones de una manera segura. En algunos casos, las máquinas pueden ayudar, pero sólo si pueden acercarse lo suficiente. En otros, las modificaciones de los planes de explotación forestal pueden eliminar problemas de los árboles desde el bloque de corte. A menudo lo más fácil, es el uso del método eficaz de explosivos (Weimer, 2013).

### 6.3. Cargas para Cortar Árboles y Madera

Para calcular la carga de explosivo necesario para poder efectuar el corte de árboles y madera existen fórmulas matemáticas que se han obtenido a través de la práctica, donde la cantidad de explosivo necesario es expresada en términos de equivalencia por Kilogramo de TNT, las cuales varían de acuerdo al método a utilizar, es decir si es carga explosiva interna o externa.

De la misma forma se hace necesario traer a relación la eficiencia relativa ( $\eta$ ) como carga, de los agentes explosivos a ser utilizados en las pruebas de campo las cuales se resumen a continuación:

**Tabla 9: Eficiencia relativa ( $\eta$ ) como carga**

Explosivo	( $\eta$ )
TNT	1,00
ANFO	1,00
Indugel Plus	1,43
Indugel AV 800	1,43
Indugel Plus PM	1,25

Fuente: Catálogo Indumil 2010. Elaboración Propia

### 6.3.1. Con cargas internas

- **Fórmula Americana:**

$$P = \frac{D^2}{250} \quad \text{ó} \quad P = 0,0004 * D^2$$

Donde,

*P = Carga en libras de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en pulgadas*

*250= constante*

Equivalente en sistema métrico:

$$P = \frac{D^2}{3500}$$

*P = Carga en kilogramos de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en centímetros*

*3500= constante*

- **Fórmula Española:**

$$P = \frac{D^2}{3300}$$

Donde,

*P = Carga en Kg de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en cm.*

*3300= constante*



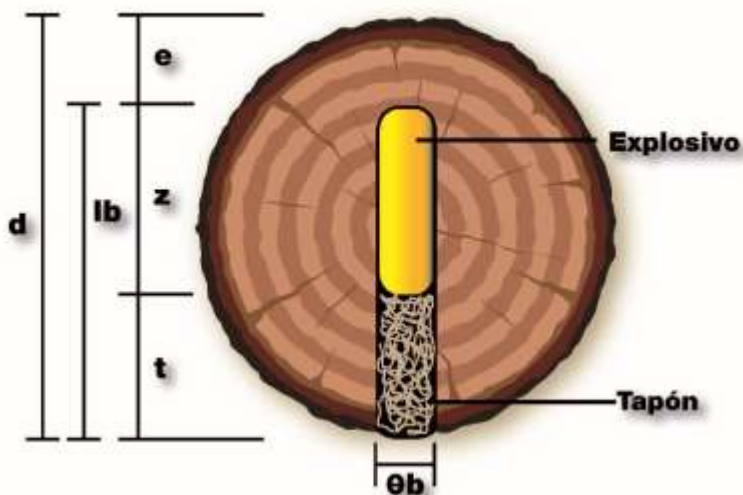
**Figura 15: Entramado de corte de carga interna**

Fuente: Manual de Explosivos y Demoliciones. Elaboración Propia

En cuanto al número de barrenos necesarios para efectuar adecuadamente la carga interna, depende principalmente del diámetro del árbol y se deben tener presentes las siguientes consideraciones para tener una adecuada colocación de la carga del explosivo:

Si se hace un solo barreno, y tomando en cuenta que el tapón debe tener  $10 \varnothing$ , (10 veces el mismo diámetro del barreno) pero no menos de 30 cm., y que del fondo del barreno al exterior del árbol debe haber 15 cm., mínimo, las dimensiones resultan como en la figura 12. Es por esta razón que para diámetros menores a 60 centímetros lo recomendable en estos casos es la utilización de cargas externas.

Para árboles con un diámetro mayor se utilizan dos o más barrenos los cuales se deben colocar formando un ángulo recto entre si y la carga del explosivo resultante se dividirá en tantas partes iguales como barrenos haya que realizar.



**Figura 16: Ubicación del explosivo con carga interna**

Fuente: Explosivos. Universidad Militar Nueva Granada. Elaboración Propia

Donde,

d = Diámetro del árbol

lb= Longitud del barreno

t = Longitud de retacado o tapón del barreno (mínimo 30 cm)

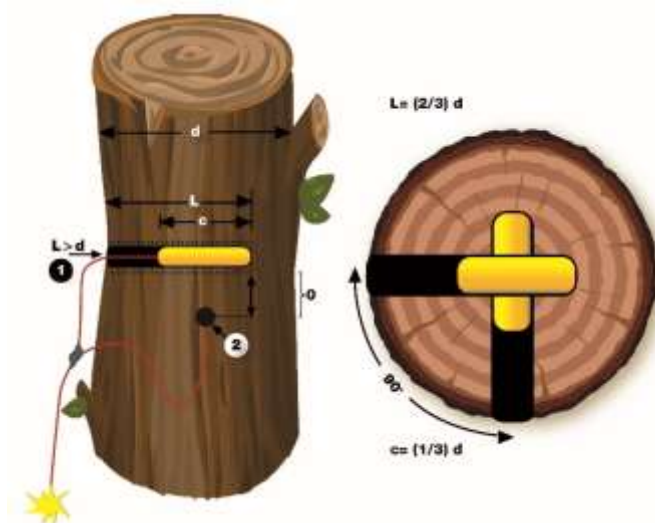
Z = Profundidad disponible para explosivos

e = Distancia del fondo del barreno al exterior del árbol (mínimo 15 cm)

θb= Diámetro del barreno (mínimo 3 cm)

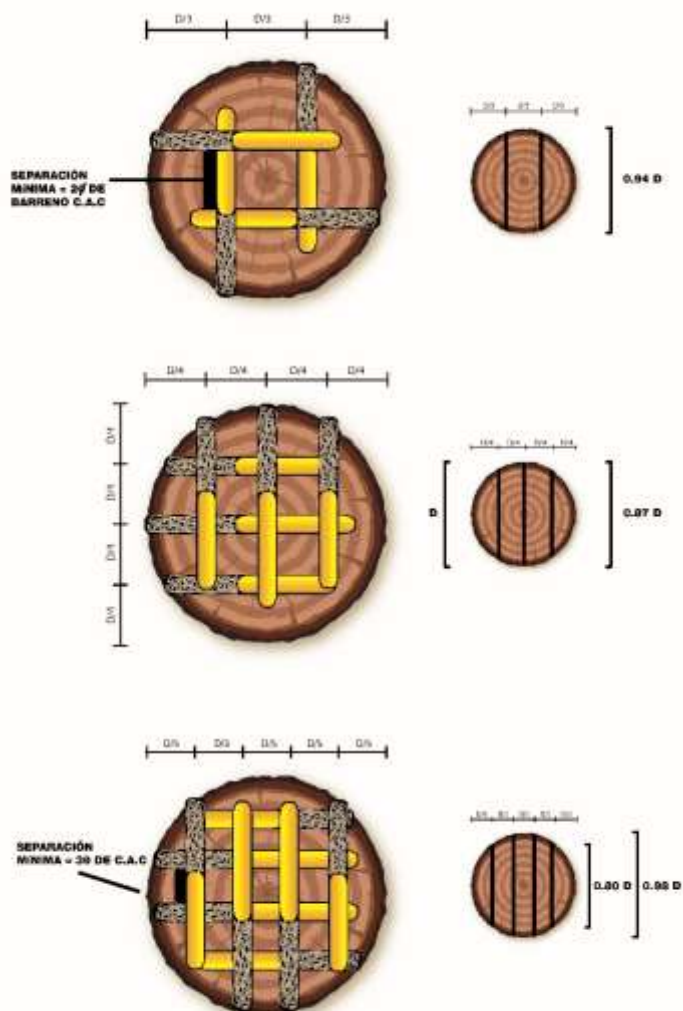
Según el manual de (ARMY, U., 2007) indica que para la longitud de los barrenos, éstos deben ser perforados a una profundidad igual a dos tercios del diámetro del árbol lo que permitirá el espacio necesario para colocar el explosivo y realizar la atacadura o tapón de la carga con un material inerte que puede ser barro, arcilla o arena.

Este método no se recomienda para los árboles o troncos huecos o podridos ya que son tan peligrosos que el hecho de taladrarlos para incorporar la carga, podría provocar su caída.



**Figura 17: Ubicación del explosivo con dos barrenos**  
Fuente: Manual Práctico de Voladura. Elaboración Propia

Cuando se requiere de colocar un número mayor de barrenos, su disposición se puede calcular haciendo uso de las fórmulas para ello, así como las plantillas para cada caso. Sin embargo esto conlleva a que sea más dispendiosa la colocación de la carga ya que requerirá de mayor trabajo y tiempo para su preparación.



**Figura 18: Plantillas alternativas de disposición de barrenos**  
Fuente: Explosivos. Universidad Militar Nueva Granada. Elaboración Propia

**Tabla 10: Densidades de algunos explosivos**

Explosivo	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
ANFO	0,85 ± 0,05
Indugel Plus AP	1,21 ± 0,06
Indugel AV 800	1,23 ± 0,03
Indugel Plus PM	1,17 ± 0,03

Fuente: Catálogo Indumil 2010. Elaboración Propia

▪ *Fórmulas para el diámetro y tanteo del número de barrenos*

✓ Para el diámetro del barreno se tiene:

$$\pi * \frac{\phi^2}{4} * Z * d = P$$

Despejando  $\phi$  se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{P * 4}{\pi * Z * d}}$$

Donde,

$\phi$  = Diámetro del barreno

Z = Profundidad disponible para explosivos

d = Densidad del explosivo utilizado

P = Carga en gramos del explosivo a utilizar.  $P = (P/\eta)$

(P= Carga en Kg de TNT,  $\eta$  = Eficiencia relativa como carga)

✓ Para ocho barrenos:

$$\Sigma L = 2 * 2(0,80D + 0,98D)$$

$$\Sigma L = 7,12D$$

$$Z = \Sigma L - 8(10\phi + 15)$$

$$Z = 7,12D - 8(10\phi + 15)$$

✓ Para 6 barrenos:

$$\Sigma_L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma_L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma_L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

✓ Para 4 barrenos:

$$\Sigma_L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma_L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma_L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

✓ Para 2 barrenos se tendrá:

$$\Sigma_L = 2D$$

$$Z = \Sigma_L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Donde,

L= Grueso del árbol medido sobre el eje del barreno

Z = Profundidad disponible para explosivos

$\phi$  = Diámetro del barreno

### 6.3.2. Con cargas externas

- **Fórmula Americana:**

$$P = \frac{D^2}{40} \quad \text{ó} \quad P = 0,025 * D^2$$

Donde,

*P = Carga en libras de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en pulgadas*

*40= constante*

Equivalente en sistema métrico:

$$P = \frac{D^2}{560}$$

*P = Carga en kilogramos de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en centímetros*

*560= constante*

Cuando lo que se desea es crear un obstáculo y que el tronco quede unido al tocón se utiliza la siguiente fórmula:

$$P = \frac{D^2}{50} \quad \text{ó} \quad P = 0,02 * D^2$$

Donde,

*P = Carga en libras de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en pulgadas*

*50= constante*

Equivalente en sistema métrico:

$$P = \frac{D^2}{700}$$

*P = Carga en kilogramos de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en centímetros*

*700= constante*

▪ *Fórmula Española:*

$$P = \frac{D^2}{550}$$

Donde,

*P = Carga en Kg de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en cm*

*550= constante*



**Figura 19: Entramado de corte de carga externa**

Fuente: Manual de Explosivos y Demoliciones. Elaboración Propia

## 7. Método y Cálculo de Cargas Requeridas

Las pruebas se efectuarán en trozas de madera de Eucalipto y Pino debido principalmente a su presencia y adaptabilidad a las condiciones climáticas en gran parte de la geografía nacional y a su utilización en varios procesos de la industria de la madera.

En el diseño de la carga explosiva para el corte de árboles y vigas de madera se debe considerar factores como:

- ✓ El método utilizado
- ✓ Tipo de madera
- ✓ Tipo de explosivo
- ✓ Diámetro del árbol
- ✓ Cálculo de la carga
- ✓ Cantidad de explosivo

### **Cálculo de la Carga Explosiva Interna**

- Método: Carga Interna
- Tipo de Madera: Eucalipto (Eucalyptus Globulus)
- Tipo de Explosivo: ANFO, Indugel Plus, Indugel AV800, Indugel plus PM
- Perímetro del árbol: 220 cm

### Cálculo de la carga

Para poder realizar el cálculo lo primero es conocer el diámetro del árbol para poder aplicar las fórmulas respectivas.

Se tiene que la longitud de la circunferencia o su perímetro es 220 cm y se sabe que el perímetro de la circunferencia en función de su diámetro es:

$$P = 2\pi * r \rightarrow \text{en función del diámetro} \rightarrow P = \pi * D$$

Despejando el diámetro se tiene:

$$D = \frac{P}{\pi}$$

Donde,

P = Perímetro del círculo

$\pi$  = Pi

r = Radio

D = Diámetro

Reemplazando valores se tiene:

$$D = \frac{220 \text{ cm}}{\pi}$$

$$D = 70 \text{ cm}$$

Conociendo el diámetro se procede a la utilización de las fórmulas para conocer la carga en kg de TNT

***Fórmula Americana:***

Equivalente en sistema métrico:

$$P = \frac{D^2}{3500}$$

$P =$  Carga en kilogramos de TNT

$D =$  Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en centímetros

3500= constante

$$P = \frac{70^2}{3500} \rightarrow P = 1,4 \text{ kg de TNT}$$

Ahora basta con dividir el valor de la carga en kg de TNT por la Eficiencia Relativa ( $\eta$ ) como carga del explosivo que se desee utilizar (ver Tabla 7).

Para el caso de ANFO será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{1,4}{1,00} = 1,4 \text{ kg de ANFO}$$

Para el caso de Indugel será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{1,4}{1,43} = 0,98 \text{ kg de Indugel}$$

Debido a que la Eficiencia Relativa ( $\eta$ ) es la misma para el Indugel Plus que para el Indugel AV 800, la cantidad de explosivo será igual para cualquiera de los dos explosivos.

Para el caso de Indugel plus PM será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{1,4}{1,25} = 1,12 \text{ kg de Indugel plus PM}$$

**Fórmula Española:**

$$P = \frac{D^2}{3300}$$

Donde,

*P = Carga en Kg de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en cm.*

*3300 = constante*

$$P = \frac{70^2}{3300} \rightarrow P = 1,48 \text{ kg de TNT}$$

Para el caso de ANFO será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{1,48}{1,00} = 1,48 \text{ kg de ANFO}$$

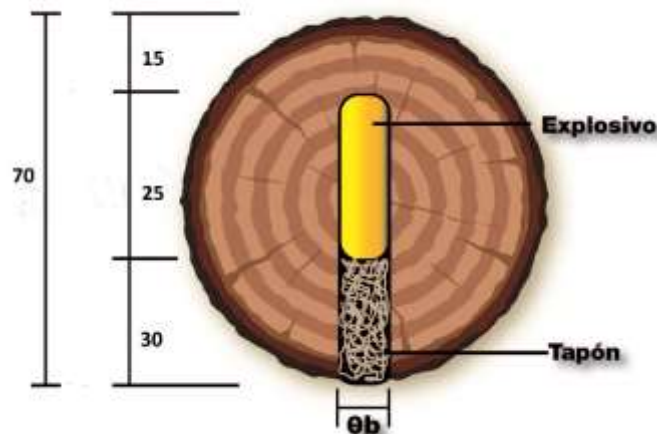
Para el caso de Indugel será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{1,48}{1,43} = 1,03 \text{ kg de Indugel}$$

Para el caso de Indugel plus PM será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{1,48}{1,25} = 1,18 \text{ kg de Indugel plus PM}$$

Ahora calculamos el diámetro y cantidad de barrenos que se requieren teniendo en cuenta que el diámetro del barreno debe ser mínimo de 3 centímetros y la longitud del tapón 10 veces el diámetro del barreno es decir 30 cm además de que se deben dejar mínimo 15 cm al exterior del árbol.



**Figura 20: Ubicación explosivo de prueba troza de Eucalipto**  
Fuente: Elaboración propia

De las fórmulas para el diámetro y tanteo del número de barrenos se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{P * 4}{\pi * Z * d}}$$

Donde,

$\phi$  = Diámetro del barreno

Z = Profundidad disponible para explosivos

d = Densidad del explosivo utilizado

P = Carga en gramos del explosivo a utilizar.  $P = (P/\eta)$

(P= Carga en Kg de TNT,  $\eta$  = Eficiencia relativa como carga)

**Fórmula Americana:** para una troza de madera de 70 cm de diámetro

➤ ANFO

$$Z = 25$$

$$d = 0,85 \text{ (ver Tabla 10)}$$

$$P = 1,4 * 1000g = 1400g$$

Para un barreno se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{1400 * 4}{\pi * 25 * 0,85}}$$

$$\phi = 9,15 \text{ cm}$$

Se puede ver que es un diámetro muy grande y que va a presentar problemas ya que el tapón superaría el mismo diámetro del árbol (Tapón debe ser  $10\phi$ ) luego se hace necesario probar con otra distribución de barreno.

Para dos barrenos se tendrá:

$$\Sigma L = 2D$$

$$Z = \Sigma L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 2 * 70 \text{ cm} - 2(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 50 \text{ cm}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1400 * 4}{\pi * 50 * 0,85}}$$

$$\phi = 6,47 \text{ cm}$$

Igual que en el anterior barreno su diámetro es muy grande.

Para 4 barrenos:

$$\Sigma_L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma_L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma_L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 3,76 * 70 \text{ cm} - 4(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 83,2 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1400 * 4}{\pi * 83,2 * 0,85}}$$

$$\phi = 5,02 \text{ cm}$$

Se observa que aún es muy grande por lo cual se sigue tanteando hasta llegar a un diámetro que se ajuste a las condiciones mínimas.

Para 6 barrenos:

$$\Sigma_L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma_L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma_L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 5,22 * 70 \text{ cm} - 6(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 95,4 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1400 * 4}{\pi * 95,4 * 0,85}}$$

$$\phi = 4,68 \text{ cm}$$

Para ocho barrenos:

$$\Sigma_L = 2 * 2(0,80D + 0,98D)$$

$$\Sigma_L = 7,12D$$

$$Z = \Sigma_L - 8(10\phi + 15)$$

$$Z = 7,12D - 8(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 7,12 * 70 \text{ cm} - 8(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 138,4 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1400 * 4}{\pi * 138,4 * 0,85}}$$

$$\phi = 3,89 \text{ cm}$$

Luego si se usa ANFO se requerirá de 8 barrenos y su diámetro será 3,89 cm y la carga se distribuirá en partes iguales en el número de barrenos a elaborar.

➤ Indugel Plus AP

$$Z = 25$$

$$d = 1,21 \text{ (ver Tabla 10)}$$

$$P = 0,98 * 1000 \text{ g} = 980 \text{ g}$$

Para un barreno se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{980 * 4}{\pi * 25 * 1,21}}$$

$$\phi = 6,42 \text{ cm}$$

Para dos barrenos se tendrá:

$$\sum L = 2D$$

$$Z = \sum L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 2 * 70 \text{ cm} - 2(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 50 \text{ cm}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{980 * 4}{\pi * 50 * 1,21}}$$

$$\phi = 4,54 \text{ cm}$$

Igual que en el anterior barreno su diámetro es muy grande.

Para 4 barrenos:

$$\Sigma L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 3,76 * 70 \text{ cm} - 4(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 83,2 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{980 * 4}{\pi * 83,2 * 1,21}}$$

$$\phi = 3,52 \text{ cm}$$

Para 6 barrenos:

$$\Sigma L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 5,22 * 70 \text{ cm} - 6(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 95,4 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{980 * 4}{\pi * 95,4 * 1,21}}$$

$$\phi = 3,28 \text{ cm}$$

Luego para el Indugel plus AP se adopta esta configuración, es decir 6 barrenos de diámetro 3,28 cm.

➤ Indugel plus PM tendremos:

$$Z = 25$$

$$d = 1,17 \text{ (ver tabla 10)}$$

$$P = 1,12 * 1000 \text{ g} = 1120 \text{ g}$$

Para un barreno se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{1120 * 4}{\pi * 25 * 1,17}}$$

$$\phi = 6,89 \text{ cm}$$

Para dos barrenos se tendrá:

$$\Sigma L = 2D$$

$$Z = \Sigma L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 2 * 70 \text{ cm} - 2(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 50 \text{ cm}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1120 * 4}{\pi * 50 * 1,17}}$$

$$\phi = 4,87 \text{ cm}$$

Igual que en el anterior barreno su diámetro es muy grande.

Para 4 barrenos:

$$\Sigma L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 3,76 * 70 \text{ cm} - 4(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 83,2 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1120 * 4}{\pi * 83,2 * 1,17}}$$

$$\phi = 3,77 \text{ cm}$$

Para 6 barrenos:

$$\Sigma L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 5,22 * 70 \text{ cm} - 6(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 95,4 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1120 * 4}{\pi * 95,4 * 1,17}}$$

$$\phi = 3,50 \text{ cm}$$

Luego para el Indugel plus PM se adopta esta configuración, es decir 6 barrenos de diámetro 3,5 cm.

**Fórmula Española:** para una troza de madera de 70cm de diámetro

➤ Para el ANFO

$$Z = 25$$

$$d = 0,85 \text{ (ver Tabla 10)}$$

$$P = 1,48 * 1000g = 1480g$$

Para un barreno se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{1480 * 4}{\pi * 25 * 0,85}}$$

$$\phi = 9,41 \text{ cm}$$

Se puede ver que es un diámetro muy grande y que va a presentar problemas ya que el tapón superaría el mismo diámetro del árbol (Tapón debe ser  $10\phi$ ) luego se hace necesario probar con otra distribución de barreno.

Para dos barrenos se tendrá:

$$\Sigma L = 2D$$

$$Z = \Sigma L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 2 * 70 \text{ cm} - 2(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 50 \text{ cm}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1480 * 4}{\pi * 50 * 0,85}}$$

$$\phi = 6,65 \text{ cm}$$

Igual que en el anterior barreno su diámetro es muy grande.

Para 4 barrenos:

$$\Sigma_L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma_L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma_L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 3,76 * 70 \text{ cm} - 4(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 83,2 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1480 * 4}{\pi * 83,2 * 0,85}}$$

$$\phi = 5,16 \text{ cm}$$

Se observa que aún es muy grande por lo cual se sigue tanteando hasta llegar a un diámetro que se ajuste a las condiciones mínimas.

Para 6 barrenos:

$$\Sigma_L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma_L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma_L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 5,22 * 70 \text{ cm} - 6(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 95,4 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1480 * 4}{\pi * 95,4 * 0,85}}$$

$$\phi = 4,82 \text{ cm}$$

Para ocho barrenos:

$$\Sigma_L = 2 * 2(0,80D + 0,98D)$$

$$\Sigma_L = 7,12D$$

$$Z = \Sigma_L - 8(10\phi + 15)$$

$$Z = 7,12D - 8(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 7,12 * 70 \text{ cm} - 8(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 138,4 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1480 * 4}{\pi * 138,4 * 0,85}}$$

$$\phi = 4,00 \text{ cm}$$

Luego si se usa ANFO se requerirá de 8 barrenos y su diámetro será 4,00 cm y la carga se distribuirá en partes iguales en el número de barrenos a elaborar.

➤ Para Indugel plus AP:

$$Z = 25$$

$$d = 1,21 \text{ (ver Tabla 10)}$$

$$P = 1,03 * 1000 \text{ g} = 1030 \text{ g}$$

Para un barreno se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{1030 * 4}{\pi * 25 * 1,21}}$$

$$\phi = 6,58 \text{ cm}$$

Para dos barrenos se tendrá:

$$\Sigma L = 2D$$

$$Z = \Sigma L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 2 * 70 \text{ cm} - 2(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 50 \text{ cm}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1030 * 4}{\pi * 50 * 1,21}}$$

$$\phi = 4,65 \text{ cm}$$

Igual que en el anterior barreno su diámetro es muy grande.

Para 4 barrenos:

$$\Sigma L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 3,76 * 70 \text{ cm} - 4(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 83,2 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1030 * 4}{\pi * 83,2 * 1,21}}$$

$$\phi = 3,60 \text{ cm}$$

Para 6 barrenos:

$$\Sigma L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 5,22 * 70 \text{ cm} - 6(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 95,4 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1030 * 4}{\pi * 95,4 * 1,21}}$$

$$\phi = 3,37 \text{ cm}$$

Luego para el Indugel se adopta esta configuración, es decir 6 barrenos de diámetro 3,37 cm.

➤ Para el caso que se utilice Indugel plus PM tendremos:

$$Z = 25$$

$$d = 1,17 \text{ (ver Tabla 10)}$$

$$P = 1,18 * 1000 \text{ g} = 1180 \text{ g}$$

Para un barreno se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{1180 * 4}{\pi * 25 * 1,17}}$$

$$\phi = 7,16 \text{ cm}$$

Para dos barrenos se tendrá:

$$\Sigma L = 2D$$

$$Z = \Sigma L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 2 * 70 \text{ cm} - 2(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 50 \text{ cm}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1180 * 4}{\pi * 50 * 1,17}}$$

$$\phi = 5,06 \text{ cm}$$

Igual que en el anterior barreno su diámetro es muy grande.

Para 4 barrenos:

$$\Sigma L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 3,76 * 70 \text{ cm} - 4(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 83,2 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1180 * 4}{\pi * 83,2 * 1,17}}$$

$$\phi = 3,92 \text{ cm}$$

Para 6 barrenos:

$$\Sigma L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 5,22 * 70 \text{ cm} - 6(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 95,4 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1180 * 4}{\pi * 95,4 * 1,17}}$$

$$\phi = 3,66 \text{ cm}$$

Luego para el Indugel plus PM se adopta esta configuración, es decir 6 barrenos de diámetro 3,66 cm.

- Método: Carga Interna
- Tipo de Madera: Pino (Pinus Radiata)
- Tipo de Explosivo: ANFO, Indugel Plus y AV800, Indugel plus PM
- Perímetro del árbol: 240 cm

Cálculo de la carga

Se tiene que la longitud de la circunferencia o su perímetro es 240 cm y se sabe que el perímetro de la circunferencia en función de su diámetro es:

$$P = 2\pi * r \rightarrow \text{en función del diámetro} \rightarrow P = \pi * D$$

Despejando el diámetro se tiene:

$$D = \frac{P}{\pi}$$

Donde,

P = Perímetro del círculo

$\pi$  = Pi

r = Radio

D = Diámetro

Reemplazando valores se tiene:

$$D = \frac{240 \text{ cm}}{\pi}$$

$$D = 77 \text{ cm}$$

Conociendo el diámetro se procede a la utilización de las fórmulas para conocer la carga en kg de TNT

***Fórmula Americana:***

Equivalente en sistema métrico:

$$P = \frac{D^2}{3500}$$

*P = Carga en kilogramos de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en centímetros*

*3500= constante*

$$P = \frac{77^2}{3500} \rightarrow P = 1,7 \text{ kg de TNT}$$

Ahora basta con dividir el valor de la carga en kg de TNT por la Eficiencia Relativa ( $\eta$ ) como carga del explosivo que se desee utilizar (ver Tabla 7).

Para el caso de ANFO será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{1,7}{1,00} = 1,7 \text{ kg de ANFO}$$

Para el caso de Indugel será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{1,7}{1,43} = 1,19 \text{ kg de Indugel}$$

Para el caso de Indugel plus PM será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{1,7}{1,25} = 1,36 \text{ kg de Indugel plus PM}$$

Debido a que la Eficiencia Relativa ( $\eta$ ) es la misma para el Indugel Plus que para el Indugel AV 800, la cantidad de explosivo será igual para cualquiera de los dos explosivos.

***Fórmula Española:***

$$P = \frac{D^2}{3300}$$

Donde,

*P = Carga en Kg de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en cm.*

*3300 = constante*

$$P = \frac{77^2}{3300} \rightarrow P = 1,8 \text{ kg de TNT}$$

Para el caso de ANFO será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{1,8}{1,00} = 1,8 \text{ kg de ANFO}$$

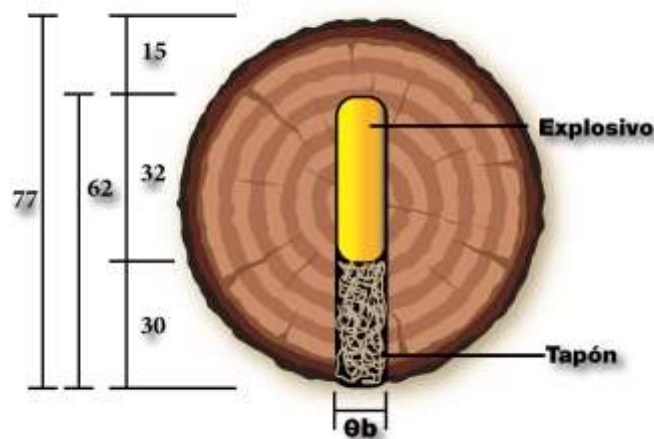
Para el caso de Indugel será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{1,8}{1,43} = 1,26 \text{ kg de Indugel}$$

Para Indugel plus PM será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{1,8}{1,25} = 1,44 \text{ kg de Indugel plus PM}$$

Ahora calculamos el diámetro y cantidad de barrenos que se requieren teniendo en cuenta que el diámetro del barreno debe ser mínimo de 3 centímetros y la longitud del tapón 10 veces el diámetro del barreno es decir 30 cm además de que se deben dejar mínimo 15 cm al exterior del árbol.



**Figura 21: Ubicación explosivo de prueba troza de Pino**  
Fuente: Elaboración propia

De las fórmulas para el diámetro y tanteo del número de barrenos se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{P * 4}{\pi * Z * d}}$$

Donde,

$\phi$  = Diámetro del barreno

Z = Profundidad disponible para explosivos

d = Densidad del explosivo utilizado

P = Carga en gramos del explosivo a utilizar.  $P = (P/\eta)$

(P= Carga en Kg de TNT,  $\eta$  = Eficiencia relativa como carga)

*Fórmula Americana: para una troza de madera de 77 cm de diámetro*

➤ Para el ANFO

Z= 32

d = 0,85 (ver Tabla 10)

P = 1,7 \* 1000g = 1700g

Para un barreno se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{1700 * 4}{\pi * 32 * 0,85}}$$

$$\phi = 8,92 \text{ cm}$$

Se puede ver que es un diámetro muy grande y que va a presentar problemas ya que el tapón superaría el mismo diámetro del árbol (Tapón debe ser  $10\phi$ ) luego se hace necesario probar con otra distribución de barrenos.

Para dos barrenos se tendrá:

$$\Sigma_L = 2D$$

$$Z = \Sigma_L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3\text{ cm}$

$$Z = 2 * 77\text{ cm} - 2(10 * 3\text{ cm} + 15\text{ cm})$$

$$Z = 64\text{ cm}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1700 * 4}{\pi * 64 * 0,85}}$$

$$\phi = 6,30\text{ cm}$$

Igual que en el anterior barreno su diámetro es muy grande.

Para 4 barrenos:

$$\Sigma_L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma_L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma_L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 3,76 * 77 \text{ cm} - 4(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 109,52 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1700 * 4}{\pi * 109,52 * 0,85}}$$

$$\phi = 4,82 \text{ cm}$$

Se observa que aún es muy grande por lo cual se sigue tanteando hasta llegar a un diámetro que se ajuste a las condiciones mínimas.

Para 6 barrenos:

$$\Sigma L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 5,22 * 77 \text{ cm} - 6(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 131,94 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1700 * 4}{\pi * 131,94 * 0,85}}$$

$$\phi = 4,39 \text{ cm}$$

Para ocho barrenos:

$$\Sigma_L = 2 * 2(0,80D + 0,98D)$$

$$\Sigma_L = 7,12D$$

$$Z = \Sigma_L - 8(10\phi + 15)$$

$$Z = 7,12D - 8(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 7,12 * 77 \text{ cm} - 8(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 188,24 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1700 * 4}{\pi * 188,24 * 0,85}}$$

$$\phi = 3,71 \text{ cm}$$

Luego si se usa ANFO se requerirá de 8 barrenos y su diámetro será 3,71 cm y la carga se distribuirá en partes iguales en el número de barrenos a elaborar.

➤ Para Indugel Plus AP:

$$Z = 32$$

$$d = 1,21 \text{ (ver Tabla 10)}$$

$$P = 1,19 * 1000 \text{ g} = 1190 \text{ g}$$

Para un barreno se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{1190 * 4}{\pi * 32 * 1,21}}$$

$$\phi = 6,25 \text{ cm}$$

Para dos barrenos se tendrá:

$$\Sigma L = 2D$$

$$Z = \Sigma L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 2 * 77 \text{ cm} - 2(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 64 \text{ cm}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1190 * 4}{\pi * 64 * 1,21}}$$

$$\phi = 4,42 \text{ cm}$$

Igual que en el anterior barreno su diámetro es muy grande.

Para 4 barrenos:

$$\Sigma_L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma_L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma_L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 3,76 * 77 \text{ cm} - 4(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 109,52 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1190 * 4}{\pi * 109,52 * 1,21}}$$

$$\phi = 3,38 \text{ cm}$$

Para 6 barrenos:

$$\Sigma_L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma_L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma_L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 5,22 * 77 \text{ cm} - 6(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 131,94 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1190 * 4}{\pi * 131,94 * 1,21}}$$

$$\phi = 3,08 \text{ cm}$$

Luego para el Indugel plus se puede adoptar la configuración de 4 barrenos es decir un diámetro de 3,38 cm o si se prefiere de 6 barrenos con un diámetro 3,08 cm.

➤ Para Indugel plus PM tendremos:

$$Z = 32$$

$$d = 1,17 \text{ (ver Tabla 10)}$$

$$P = 1,36 * 1000 \text{ g} = 1360 \text{ g}$$

Para un barreno se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{1360 * 4}{\pi * 32 * 1,17}}$$

$$\phi = 6,80 \text{ cm}$$

Para dos barrenos se tendrá:

$$\Sigma_L = 2D$$

$$Z = \Sigma_L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 2 * 77 \text{ cm} - 2(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 64 \text{ cm}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1360 * 4}{\pi * 64 * 1,17}}$$

$$\phi = 4,80 \text{ cm}$$

Igual que en el anterior barreno su diámetro es muy grande.

Para 4 barrenos:

$$\Sigma_L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma_L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma_L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 3,76 * 77 \text{ cm} - 4(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 109,52 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1360 * 4}{\pi * 109,52 * 1,17}}$$

$$\phi = 3,67 \text{ cm}$$

Para 6 barrenos:

$$\Sigma_L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma_L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma_L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 5,22 * 77 \text{ cm} - 6(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 131,94 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1360 * 4}{\pi * 131,94 * 1,17}}$$

$$\phi = 3,34 \text{ cm}$$

Luego para el Indugel plus PM se puede adoptar la configuración de 4 barrenos con un diámetro de 3,67 cm o si se prefiere una configuración de menor diámetro se puede utilizar la configuración de 6 barrenos con un diámetro 3,34 cm.

**Fórmula Española:** para una troza de madera de 77 cm de diámetro

➤ Para el ANFO

$$Z = 32$$

$$d = 0,85 \text{ (ver Tabla 10)}$$

$$P = 1,8 * 1000g = 1800g$$

Para un barreno se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{1800 * 4}{\pi * 32 * 0,85}}$$

$$\phi = 9,17 \text{ cm}$$

Se puede ver que es un diámetro muy grande y que va a presentar problemas ya que el tapón superaría el mismo diámetro del árbol (Tapón debe ser  $10\phi$ ) luego se hace necesario probar con otra distribución de barreno.

Para dos barrenos se tendrá:

$$\Sigma L = 2D$$

$$Z = \Sigma L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 2 * 77 \text{ cm} - 2(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 64 \text{ cm}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1800 * 4}{\pi * 64 * 0,85}}$$

$$\phi = 6,49 \text{ cm}$$

Igual que en el anterior barreno su diámetro es muy grande.

Para 4 barrenos:

$$\Sigma_L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma_L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma_L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 3,76 * 77 \text{ cm} - 4(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 109,52 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1800 * 4}{\pi * 109,52 * 0,85}}$$

$$\phi = 4,96 \text{ cm}$$

Se observa que aún es muy grande por lo cual se sigue tanteando hasta llegar a un diámetro que se ajuste a las condiciones mínimas.

Para 6 barrenos:

$$\Sigma_L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma_L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma_L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 5,22 * 77 \text{ cm} - 6(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 131,94 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1800 * 4}{\pi * 131,94 * 0,85}}$$

$$\phi = 4,52 \text{ cm}$$

Para ocho barrenos:

$$\Sigma_L = 2 * 2(0,80D + 0,98D)$$

$$\Sigma_L = 7,12D$$

$$Z = \Sigma_L - 8(10\phi + 15)$$

$$Z = 7,12D - 8(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 7,12 * 77 \text{ cm} - 8(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 188,24 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1800 * 4}{\pi * 188,24 * 0,85}}$$

$$\phi = 3,78 \text{ cm}$$

Luego si se usa ANFO se requerirá de 8 barrenos y su diámetro será 3,78 cm y la carga se distribuirá en partes iguales en el número de barrenos a elaborar.

➤ Para Indugel Plus AP:

$$Z = 32$$

$$d = 1,21 \text{ (ver Tabla 10)}$$

$$P = 1,26 * 1000 \text{ g} = 1260 \text{ g}$$

Para un barreno se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{1260 * 4}{\pi * 32 * 1,21}}$$

$$\phi = 6,43 \text{ cm}$$

Para dos barrenos se tendrá:

$$\Sigma L = 2D$$

$$Z = \Sigma L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 2 * 77 \text{ cm} - 2(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 64 \text{ cm}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1260 * 4}{\pi * 64 * 1,21}}$$

$$\phi = 4,55 \text{ cm}$$

Igual que en el anterior barreno su diámetro es muy grande.

Para 4 barrenos:

$$\Sigma L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 3,76 * 77 \text{ cm} - 4(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 109,52 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1260 * 4}{\pi * 109,52 * 1,21}}$$

$$\phi = 3,47 \text{ cm}$$

Para 6 barrenos:

$$\Sigma L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 5,22 * 77 \text{ cm} - 6(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 131,94 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1260 * 4}{\pi * 131,94 * 1,21}}$$

$$\phi = 3,17 \text{ cm}$$

Luego para el Indugel plus se puede adoptar la configuración de 4 barrenos es decir un diámetro de 3,47 cm o si se prefiere de 6 barrenos con un diámetro 3,17 cm.

➤ Para Indugel plus PM tendremos:

$$Z = 32$$

$$d = 1,17 \text{ (ver Tabla 10)}$$

$$P = 1,44 * 1000 \text{ g} = 1440 \text{ g}$$

Para un barreno se tiene:

$$\phi = \sqrt{\frac{1440 * 4}{\pi * 32 * 1,17}}$$

$$\phi = 6,99 \text{ cm}$$

Para dos barrenos se tendrá:

$$\Sigma L = 2D$$

$$Z = \Sigma L - 2(10\phi + 15)$$

$$Z = 2D - 2(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 2 * 77 \text{ cm} - 2(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 64 \text{ cm}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1440 * 4}{\pi * 64 * 1,17}}$$

$$\phi = 4,94 \text{ cm}$$

Igual que en el anterior barreno su diámetro es muy grande.

Para 4 barrenos:

$$\Sigma_L = 4 * 0,94D$$

$$\Sigma_L = 3,76D$$

$$Z = \Sigma_L - 4(10\phi + 15)$$

$$Z = 3,76D - 4(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 3,76 * 77 \text{ cm} - 4(10 * 3 \text{ cm} + 15 \text{ cm})$$

$$Z = 109,52 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1440 * 4}{\pi * 109,52 * 1,17}}$$

$$\phi = 3,78 \text{ cm}$$

Para 6 barrenos:

$$\Sigma_L = 6 * 0,87D$$

$$\Sigma_L = 5,22D$$

$$Z = \Sigma_L - 6(10\phi + 15)$$

$$Z = 5,22D - 6(10\phi + 15)$$

Calculando sobre la condición mínima de  $\phi = 3 \text{ cm}$

$$Z = 5,22 * 77 \text{ cm} - 6(10 * 3 \text{ cm} + 15)$$

$$Z = 131,94 \text{ cm}$$

El diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{1440 * 4}{\pi * 131,94 * 1,17}}$$

$$\phi = 3,44 \text{ cm}$$

Luego para el Indugel plus PM se puede adoptar la configuración de 4 barrenos con un diámetro de 3,78 cm o si se prefiere una configuración de menor diámetro se puede utilizar la configuración de 6 barrenos con un diámetro 3,44 cm.

**Tabla 11: Resumen Tanteo y Diámetro de Barrenos para Carga Interna**

Diámetro árbol (cm)	Material Explosivo	Fórmula Americana			Fórmula Española		
		Carga (kilogramos)	Diámetro barrenos (cm)	Cantidad de barrenos	Carga (kilogramos)	Diámetro barrenos (cm)	Cantidad de barrenos
70	ANFO	1,40	3,89	8	1,48	4,00	8
	Indugel Plus AP	0,98	3,28	6	1,03	3,37	6
	Indugel Plus PM	1,12	3,50	6	1,18	3,66	6
77	ANFO	1,70	3,71	8	1,80	3,78	8
	Indugel Plus AP	1,19	3,38	4	1,26	3,47	4
	Indugel Plus PM	1,36	3,67	4	1,44	3,78	4

Fuente: Elaboración propia

## Cálculo de la Carga Explosiva Externa

- Método: Carga Externa
- Tipo de Madera: Eucalipto (Eucalyptus Globulus)
- Tipo de Explosivo: ANFO, Indugel Plus y AV800, Indugel plus PM
- Diámetro del árbol: 70 cm

### *Fórmula Americana:*

Equivalente en sistema métrico:

$$P = \frac{D^2}{560}$$

*P = Carga en kilogramos de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en centímetros*

*560 = constante*

$$P = \frac{70^2}{560}$$

$$P = 8,75 \text{ kg de TNT}$$

Para el caso de ANFO será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{8,75}{1,00} = 8,75 \text{ kg de ANFO}$$

Para el caso de Indugel será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{8,75}{1,43} = 6,12 \text{ kg de Indugel}$$

Para el caso de Indugel plus PM será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{8,75}{1,25} = 7 \text{ kg de Indugel plus PM}$$

**Fórmula Española:**

$$P = \frac{D^2}{550}$$

Donde,

$P =$  Carga en Kg de TNT

$D =$  Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en cm

550= constante

$$P = \frac{70^2}{550}$$

$$P = 8,90 \text{ kg de TNT}$$

Para el caso de ANFO será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{8,90}{1,00} = 8,90 \text{ kg de ANFO}$$

Para el caso de Indugel será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{8,90}{1,43} = 6,22 \text{ kg de Indugel}$$

En el caso de Indugel plus PM será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{8,90}{1,25} = 7,12 \text{ kg de Indugel plus PM}$$

- Método: Carga Externa
- Tipo de Madera: Pino (Pinus Radiata)
- Tipo de Explosivo: ANFO, Indugel Plus y AV800, Indugel plus PM
- Diámetro del árbol: 77 cm

***Fórmula Americana:***

Equivalente en sistema métrico:

$$P = \frac{D^2}{560}$$

*P = Carga en kilogramos de TNT*

*D = Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en centímetros*

*560= constante*

$$P = \frac{77^2}{560}$$

$$P = 10,58 \text{ kg de TNT}$$

Para el caso de ANFO será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{10,58}{1,00} = 10,58 \text{ kg de ANFO}$$

Para el caso de Indugel será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{10,58}{1,43} = 7,4 \text{ kg de Indugel}$$

Para el caso de Indugel plus PM será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{10,58}{1,25} = 8,46 \text{ kg de Indugel plus PM}$$

**Fórmula Española:**

$$P = \frac{D^2}{550}$$

Donde,

$P =$  Carga en Kg de TNT

$D =$  Diámetro del árbol o menor dimensión de la madera en cm

550= constante

$$P = \frac{77^2}{550}$$

$$P = 10,78 \text{ kg de TNT}$$

Para el caso de ANFO será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{10,78}{1,00} = 10,78 \text{ kg de ANFO}$$

Para el caso de Indugel será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{10,78}{1,43} = 7,54 \text{ kg de Indugel}$$

Para el caso de Indugel plus PM será:

$$P = \frac{P_{TNT}}{\eta} \rightarrow P = \frac{10,78}{1,25} = 8,62 \text{ kg de Indugel plus PM}$$

**Tabla 12: Resumen Cálculos de Carga Explosiva en Kilogramos por Prueba**

DIAMETRO MADERA (cm)	EXPLOSIVO	FORMULA AMERICANA		FORMULA ESPAÑOLA	
		CARGA (Kg)		CARGA (Kg)	
		INTERNA	EXTERNA	INTERNA	EXTERNA
70	ANFO	1,40	8,75	1,48	8,90
	INDUGEL AP - AV800	0,98	6,12	1,03	6,22
	INDUGEL PLUS PM	1,12	7,00	1,18	7,12
77	ANFO	1,70	10,58	1,80	10,78
	INDUGEL AP - AV800	1,19	7,40	1,26	7,54
	INDUGEL PLUS PM	1,36	8,46	1,44	8,62

Fuente: Elaboración propia

Ahora teniendo las cantidades de explosivo requerido para elaborar una prueba, se hace necesario transformar dichas cantidades a la presentación comercial ofrecida por la Industria Militar Colombiana (Indumil) para lo cual se utilizará la tabla que se presenta a continuación:

**Tabla 13: Presentación Comercial Indugel**

Dimensión (Diámetro x largo en mm)	Unidades por Caja (tacos)	Peso por taco (gramos)
26 * 250	154	162
32 * 250	102	245
38 * 250	72	347
44 * 250	54	463

Fuente: Catálogo Indumil 2010. Elaboración Propia

Si se utiliza la presentación de 26\*250 mm de Indugel Plus PM y se efectúa la transformación de la cantidad de explosivo requerido para la fórmula americana y la española, para lo cual se debe pasar dichas cantidades a gramos y posteriormente dividir las por el peso de cada taco, se obtiene:

***Fórmula Americana:***

Para la troza de Eucalipto:

Carga Interna: 0,98 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{0,98 * 1000}{162} = 6,04 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 6,12 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{6,12 * 1000}{162} = 37,77 \text{ tacos}$$

Carga Interna: 1,12 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{1,12 * 1000}{162} = 6,91 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 7,00 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{7,00 * 1000}{162} = 43,20 \text{ tacos}$$

Para la troza de Pino:

Carga Interna: 1,19 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{1,19 * 1000}{162} = 7,34 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 7,40 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{7,40 * 1000}{162} = 45,67 \text{ tacos}$$

Carga Interna: 1,36 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{1,36 * 1000}{162} = 8,39 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 8,46 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{8,46 * 1000}{162} = 52,22 \text{ tacos}$$

***Fórmula Española:***

Para la troza de Eucalipto:

Carga Interna: 1,03 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{1,03 * 1000}{162} = 6,35 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 6,22 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{6,22 * 1000}{162} = 38,39 \text{ tacos}$$

Carga Interna: 1,18 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{1,18 * 1000}{162} = 7,28 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 7,12 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{7,12 * 1000}{162} = 43,95 \text{ tacos}$$

Para la troza de Pino:

Carga Interna: 1,26 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{1,26 * 1000}{162} = 7,77 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 7,54 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{7,54 * 1000}{162} = 46,54 \text{ tacos}$$

Carga Interna: 1,44 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{1,44 * 1000}{162} = 8,88 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 8,62 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{8,62 * 1000}{162} = 53,20 \text{ tacos}$$

En el caso de utilizar la presentación de 32\*250 mm de Indugel Plus PM, se obtiene:

***Fórmula Americana:***

Para la troza de Eucalipto:

Carga Interna: 0,98 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{0,98 * 1000}{245} = 4 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 6,12 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{6,12 * 1000}{245} = 24,97 \text{ tacos}$$

Carga Interna: 1,12 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{1,12 * 1000}{245} = 4,57 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 7,00 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{7,00 * 1000}{245} = 28,57 \text{ tacos}$$

Para la troza de Pino:

Carga Interna: 1,19 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{1,19 * 1000}{245} = 4,85 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 7,40 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{7,40 * 1000}{245} = 30,20 \text{ tacos}$$

Carga Interna: 1,36 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{1,36 * 1000}{245} = 5,55 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 8,46 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{8,46 * 1000}{245} = 34,53 \text{ tacos}$$

***Fórmula Española:***

Para la troza de Eucalipto:

Carga Interna: 1,03 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{1,03 * 1000}{245} = 4,20 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 6,22 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{6,22 * 1000}{245} = 25,38 \text{ tacos}$$

Carga Interna: 1,18 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{1,18 * 1000}{245} = 4,81 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 7,12 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{7,12 * 1000}{245} = 29,06 \text{ tacos}$$

Para la troza de Pino:

Carga Interna: 1,26 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{1,26 * 1000}{245} = 5,14 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 7,54 kg de Indugel Plus AP

$$\frac{7,54 * 1000}{245} = 30,77 \text{ tacos}$$

Carga Interna: 1,44 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{1,44 * 1000}{245} = 5,87 \text{ tacos}$$

Carga Externa: 8,62 kg de Indugel Plus PM

$$\frac{8,62 * 1000}{245} = 35,18 \text{ tacos}$$

**Tabla 14: Cantidad de Explosivo Presentación Comercial Tacos de 26 \* 250 mm**

DIÁMETRO TROZA (cm)	EXPLOSIVO	FORMULA AMERICANA		FORMULA ESPAÑOLA	
		INTERNA	EXTERNA	INTERNA	EXTERNA
<b>70</b>	INDUGEL AP - AV800	7	38	7	39
	INDUGEL PLUS PM	7	44	8	44
<b>77</b>	INDUGEL AP - AV800	8	46	8	47
	INDUGEL PLUS PM	9	53	9	54

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 15: Cantidad de Explosivo Presentación Comercial Tacos de 32 \* 250 mm**

DIÁMETRO TROZA (cm)	EXPLOSIVO	FORMULA AMERICANA		FORMULA ESPAÑOLA	
		INTERNA	EXTERNA	INTERNA	EXTERNA
<b>70</b>	INDUGEL AP - AV800	4	25	5	26
	INDUGEL PLUS PM	5	29	5	30
<b>77</b>	INDUGEL AP - AV800	5	31	6	31
	INDUGEL PLUS PM	6	35	6	36

Fuente: Elaboración Propia

## 8. Recursos

El lugar para realizar las pruebas debe ser idóneo para que se puedan cumplir todas y cada una de las condiciones de seguridad en cuanto a manipulación de explosivos se refiere, así como el acompañamiento permanente durante dichas pruebas del Ingeniero Cesar López ya que cuenta con la experiencia necesaria para que se lleve a cabalidad y sin inconveniente los procedimientos necesarios para su realización.

Por lo anterior se gestionó la utilización de una cantera ubicada en el municipio de Simijaca Cundinamarca en un horario que no se afectara la producción de la misma y que hubiera la menor cantidad de personal laborando.



**Figura 22: Ubicación Lugar Pruebas Simijaca Cundinamarca**  
Fuente: Google Maps



**Figura 23: Cantera La Esperanza - Simijaca Cundinamarca**  
Fuente: Elaboración propia

Para la adecuada realización de las pruebas, se requirió de 4 trozas de madera de más de 60 cm de diámetro y para lo cual se consiguieron especies de Pino y Eucalipto dos de cada una, en un bosque de corte debidamente autorizado para su explotación, en diámetros de 77 cm y 70 cm respectivamente y un largo estandar de 1.50 metros, su escogencia de debió principalmente a su uso general y por encontrarse presente en gran parte de la geografía Colombiana.



**Figura 24: Trozas de Eucalipto**  
Fuente propia

Para el montaje de la carga explosiva se requiere de un taladro para poder efectuar los respectivos barrenos, cuando ésta sea de carga interna.

Cuando la prueba se efectúe con carga externa, para este caso particular se requirió del montaje de un dispositivo que contenga el material explosivo para lo cual se usó Conduflex de una pulgada, un material flexible en PVC que permite rodear el árbol y se elaboró un mecanismo de cierre para que pueda actuar como un cinturón o collar y facilite la realización de las pruebas sin tener que recurrir a materiales adicionales.



**Figura 25: Conduflex en PVC**

Fuente: <http://c323980.r80.cf1.rackcdn.com/productos/706069/706069-z.jpg>



**Figura 26: Dispositivo de Montaje para Explosivo de Carga Externa**

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se aprecia el dispositivo elaborado en Conduflex de una pulgada y media ( 1 ½”) para poder introducir el explosivo de Indugel, el cual cuenta con una válvula de cierre que permite abrir y cerrar, permitiendo que se fije alrededor del árbol.

En cuanto a la cantidad de explosivo, éste depende de la cantidad de pruebas a realizar al igual si la carga es interna o externa ya que como quedó evidenciado en los diferentes cálculos se requiere una mayor cantidad cuando la carga es externa. (Ver Tablas 12 y 13).

**Tabla 16: Cantidad de Explosivo Indugel Plus PM Requerido por Prueba**

DIÁMETRO TROZA (cm)	FORMULA AMERICANA			
	CARGA (Kilogramos)		CARGA (Tacos 32 * 250 mm)	
	INTERNA	EXTERNA	INTERNA	EXTERNA
70	1,12	7,00	5	29
77	1,36	8,46	6	35
TOTAL	17,94		75	

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla 16 se puede concluir que al utilizar la fórmula americana el total de explosivo requerido será de 18 kg aproximadamente los cuales equivalen a 75 tacos en la presentación comercial elaborada por la Industria Militar Colombiana Indumil, cantidad que resulta de elaborar los respectivos cálculos con las fórmulas conocidas e incluyen una prueba tanto en la troza de 70 cm diámetro como en la troza de 77 cm.

Debido a las dificultades en la consecución del material explosivo por diversas situaciones, se contó con:

- 12 barras de Indugel Plus PM presentación de 32\*250 milímetros
- 20 detonadores permisibles eléctricos insensibles de Cobre # 8
- Un Explosor



**Figura 27: Muestra Explosivo Indugel Plus PM**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 28: Muestra Detonador Permissible Eléctrico Insensible de Cobre**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 29: Muestra Explosor ZEB D/C Utilizado**  
Fuente: Elaboración propia

## 9. Elaboración de Pruebas

Teniendo como punto de partida los métodos investigados y las fórmulas aplicables a cada uno de ellos se tomó como referente el método americano ya que se requiere una menor cantidad de material explosivo utilizando esta fórmula que el requerido utilizando la fórmula española. Sin embargo debido a que dichas fórmulas han resultado de la experiencia, se hace necesario conocer su comportamiento basados en los recursos disponibles en nuestro medio.

### *Procedimiento Carga Interna*

#### *Primera Prueba*

- ✓ Dosificación del explosivo
- ✓ Elaboración del barreno en el blanco (Troza de madera)
- ✓ Colocación de la carga
- ✓ Confinamiento y retacado (material inerte: arcilla)
- ✓ Conexión con el explosor
- ✓ Detonación o voladura
- ✓ Análisis de Resultados

### *Dosificación del explosivo*

- Determinar las dimensiones del blanco: medir la longitud de circunferencia del árbol y dividirlo por el número PI ( $\pi$ ) para obtener el diámetro.
- Calcular el peso de la carga en TNT: aplicar la fórmula establecida para el corte de madera interno para hallar la cantidad de kilos de TNT necesarios.
- Dividir la cantidad de explosivo por la Efectividad Relativa ( $\eta$ ) como carga a utilizar: para el caso el explosivo utilizado es Indugel Plus PM cuya Efectividad Relativa como carga es 1,25.
- Hallar el gramaje del explosivo: elaborar la conversión de kilogramos a gramos.
- Dividir la cantidad hallada de explosivo en gramos por la unidad de medida del explosivo a utilizar: la presentación comercial de Indugel plus PM.
- Calcular la profundidad de los barrenos, sus respectivos diámetros así como la cantidad de barrenos requeridos para efectuar la voladura.

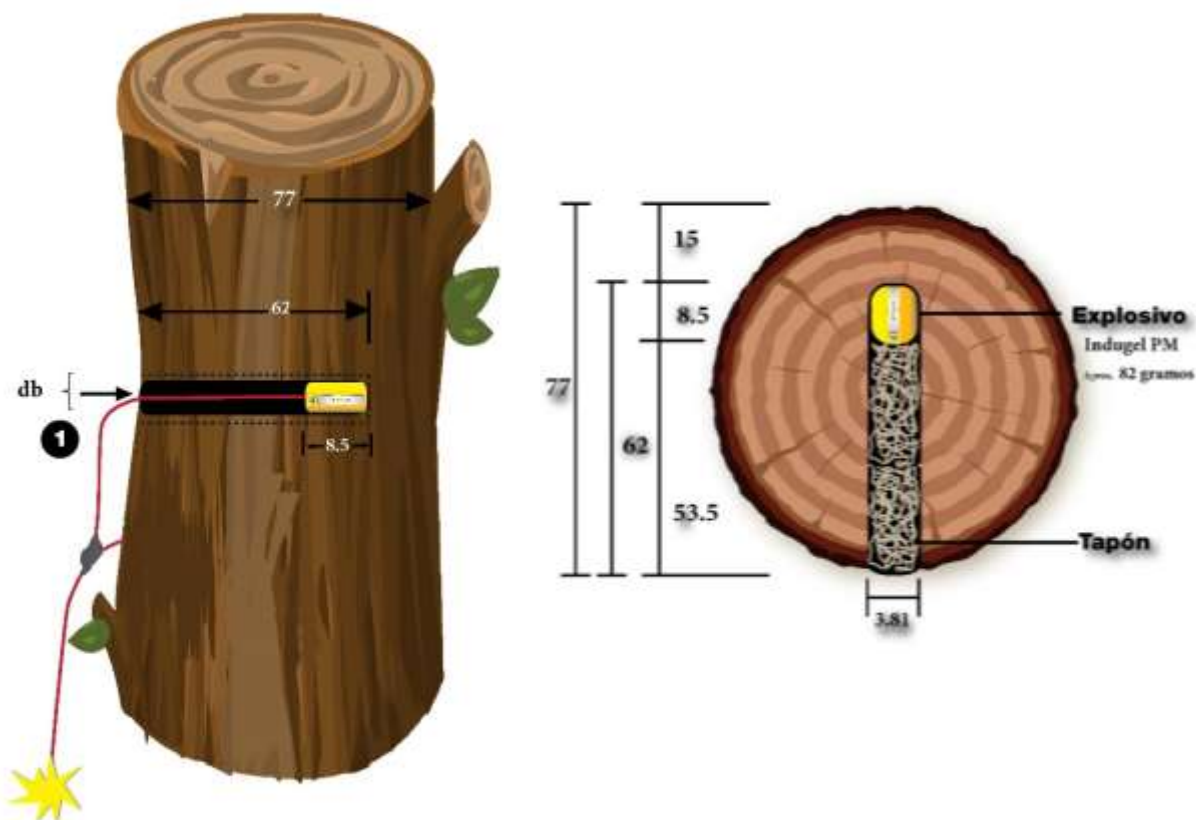
Si se tiene en cuenta los resultados obtenidos de cada una de las fórmulas aplicadas se requiere de una gran cantidad de material explosivo ya que según la Tabla 16 para poder efectuar una sola prueba de carga interna y una de carga externa se necesitan aproximadamente 10 kilogramos de explosivo o su equivalente en la presentación comercial de Indumil que es de 41 tacos, cantidad que es bastante elevada, razón para optar por comenzar las pruebas con una menor cantidad de material explosivo.

Una vez realizados los respectivos cálculos de las cargas necesarias de acuerdo a las fórmulas expuestas anteriormente y conociendo las cantidades tanto de barrenos como de los diámetros de barreno requeridos, se pudo establecer que para una prueba cuando ésta se hace con una carga interna y utilizando la fórmula americana, requiere para una troza de madera con diámetro de 77 cm, la cantidad de 1.36 kg de Indugel plus PM con una configuración de 4 barrenos y un diámetro de 3.67 cm en los cuales se distribuirá el explosivo en partes equitativas (ver Tabla 11).

Aunque inicialmente se planteó la posibilidad de realizar las pruebas con distintos materiales explosivos, en las pruebas se utilizó Indugel Plus PM ya que sólo se pudo conseguir este material para su realización.

Por lo anterior, el procedimiento aplicado se basó en la dosificación de material explosivo requerido por medio del ensayo y error, comenzando con una pequeña cantidad de explosivo y a medida que se realizan las distintas pruebas ir incrementando su cantidad hasta que se observe que se ha llegado al objetivo de su utilización, el corte de la troza.

Para la dosificación del explosivo en la primera prueba se utilizó una barra de Indugel plus PM de 32\*250 milímetros y un peso de 245 gramos la cual fue dividida en una tercera parte ( $1/3$ ) de su contenido es decir se utilizaron aproximadamente 82 gramos de material explosivo



**Figura 30: Diseño Montaje Primera Prueba para Carga Interna**  
Fuente: Elaboración propia

### *Elaboración del barreno en el blanco*

Para iniciar las pruebas se hizo necesario elaborar los barrenos en las trozas de madera para poder introducir la carga cuando se va a realizar con carga interna, para lo cual se contó con un taladro y brocas de  $1\frac{1}{4}$  y  $1\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro (31.75 y 38.10 mm).

Se optó por éstos diámetros ya que se contó con barras de hidrogel de  $32 * 250$  milímetros, además por estar dentro de los rangos calculados con antelación en referencia al diámetro de los barrenos cuando la prueba es de carga interna.

En cuanto a la profundidad de los barrenos elaborados las brocas requirieron un largo específico para poder elaborarlos 46 cm y 60 cm debido al diámetro de las trozas utilizadas. Se tuvo especial cuidado de dejar las distancias mínimas requeridas para poder efectuar la carga apropiadamente, que para el caso particular y según indicaciones se requiere de mínimo 15 cm del fondo del barreno al exterior del árbol.



**Figura 31: Elaboración de Barrenos para Carga Interna**

Fuente: Elaboración propia

### ***Colocación de la Carga***

Una vez ubicadas las trozas en un lugar apropiado para la realización de las voladuras y efectuados los barrenos para el método de carga interna se procedió al montaje de la carga explosiva.

Determinada la cantidad de material explosivo se procedió a la colocación de la carga, para ello se colocó un detonador permisible eléctrico insensible de cobre dentro del explosivo y se introdujo dentro del barreno de la troza de madera.



**Figura 32: Colocación de la Carga**  
Fuente: Elaboración propia

### *Confinamiento y retacado*

Posteriormente se procedió a colocar el tapón o atacadura del barreno, para lograrlo se utilizó arcilla y cartón húmedo para confinar adecuadamente la carga y evitar pérdida de presión al momento de efectuar la voladura. Se requirió de una vara de madera delgada para aprisionar cuidadosamente el material inerte en el interior del barreno hasta lograr su llenado total.



**Figura 33: Retacado del Barreno para Carga Interna**  
Fuente: Elaboración propia

### *Conexión con el explosor*

Teniendo la carga debidamente confinada dentro del barreno, se procedió a efectuar las conexiones externas necesarias para realizar la voladura a la línea de disparo. Para ello se realizó la conexión de los cables expuestos del detonador o terminales con una extensión la cual será conectada al explosor a una distancia adecuada tomando las medidas de seguridad necesarias para efectuar de forma segura la voladura. Para el caso se tomó una distancia aproximada de 100 metros del blanco.



**Figura 34: Conexión con Explosor**

Fuente: Elaboración propia

### *Detonación o voladura*

Por último, ubicados a una distancia segura y habiendo tomado las medidas de seguridad necesarias se procedió a efectuar la respectiva voladura. Para ello se procedió a cargar el condensador del explosor girando varias veces la manivela para almacenar la energía necesaria y luego poder liberarla al oprimir el interruptor o botón (push) y de esta forma efectuar el disparo de la prueba.

Realizada la voladura se procedió a observar los resultados obtenidos.



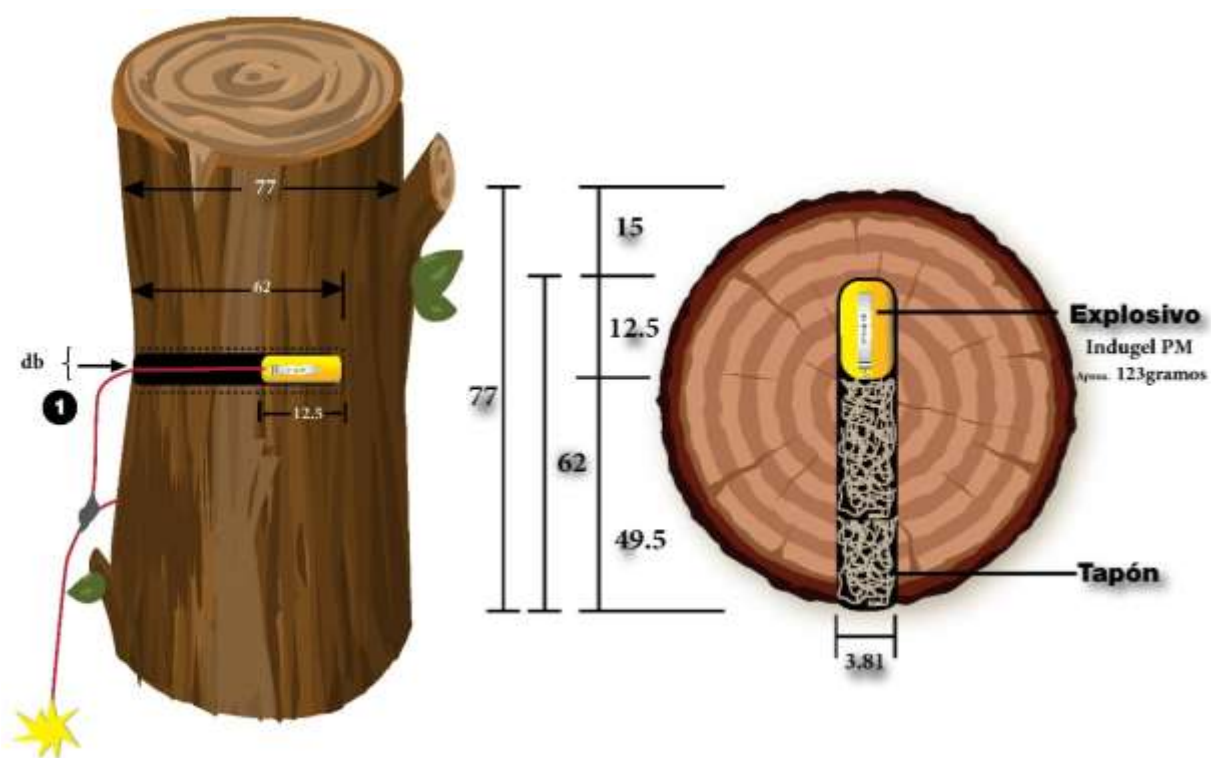
**Figura 35: Voladura Carga Interna**

Fuente: Elaboración propia

## Segunda Prueba

Para efectuar esta prueba en la troza de madera se procedió siguiendo el mismo procedimiento descrito para la primera prueba, es decir se elaboró un barreno, se hizo la respectiva colocación de la carga, su adecuado confinamiento, la conexión con el explosor y su voladura, con la pequeña variación de la cantidad de material explosivo utilizado.

Para el caso se utilizó media barra de Indugel plus PM que equivalen aproximadamente a 123 gramos de material explosivo y la disposición de un solo barreno (ver figura 36).

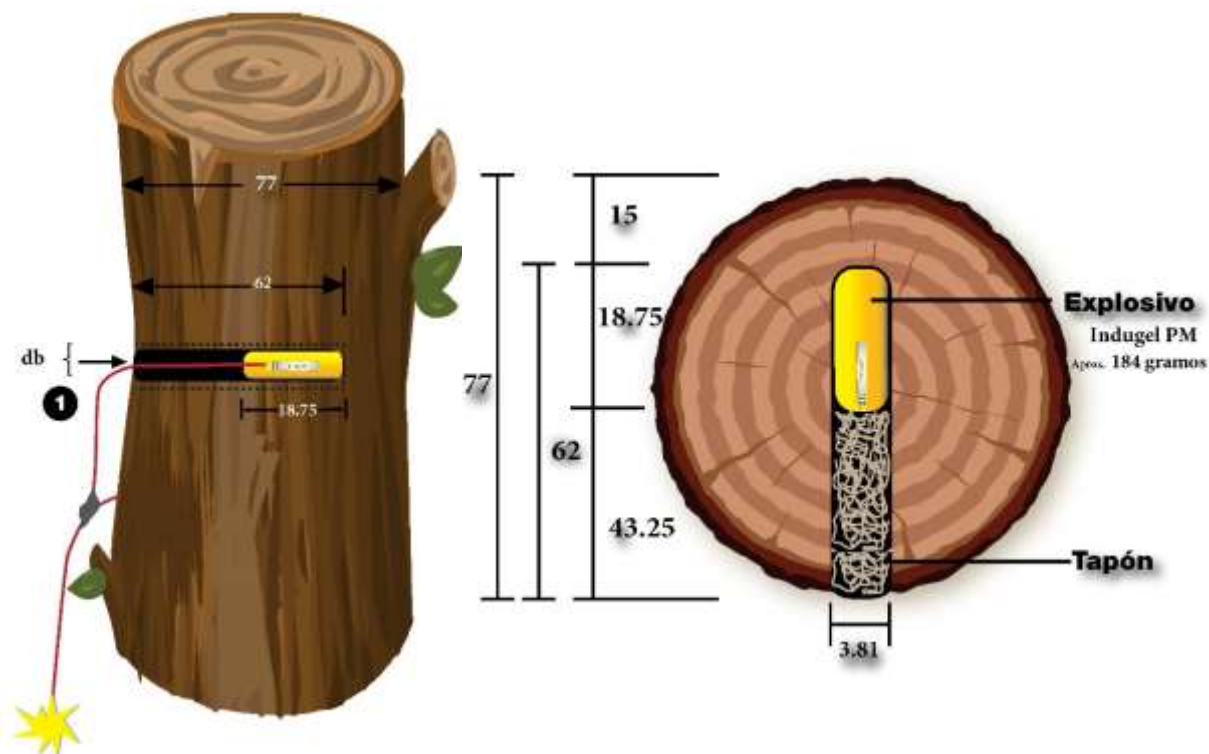


**Figura 36: Diseño Montaje Segunda Prueba para Carga Interna**  
Fuente: Elaboración propia

### *Tercera Prueba*

Se repitió el procedimiento efectuado para la primera y segunda prueba aumentando la cantidad de material explosivo utilizado. Se dispuso de un único barreno en el cual se introdujo las  $\frac{3}{4}$  partes de una barra de explosivo, es decir aproximadamente 184 gramos de Indugel plus PM.

En la figura que se presenta a continuación se puede observar la disposición del barreno y la descripción gráfica del montaje de la prueba efectuada.

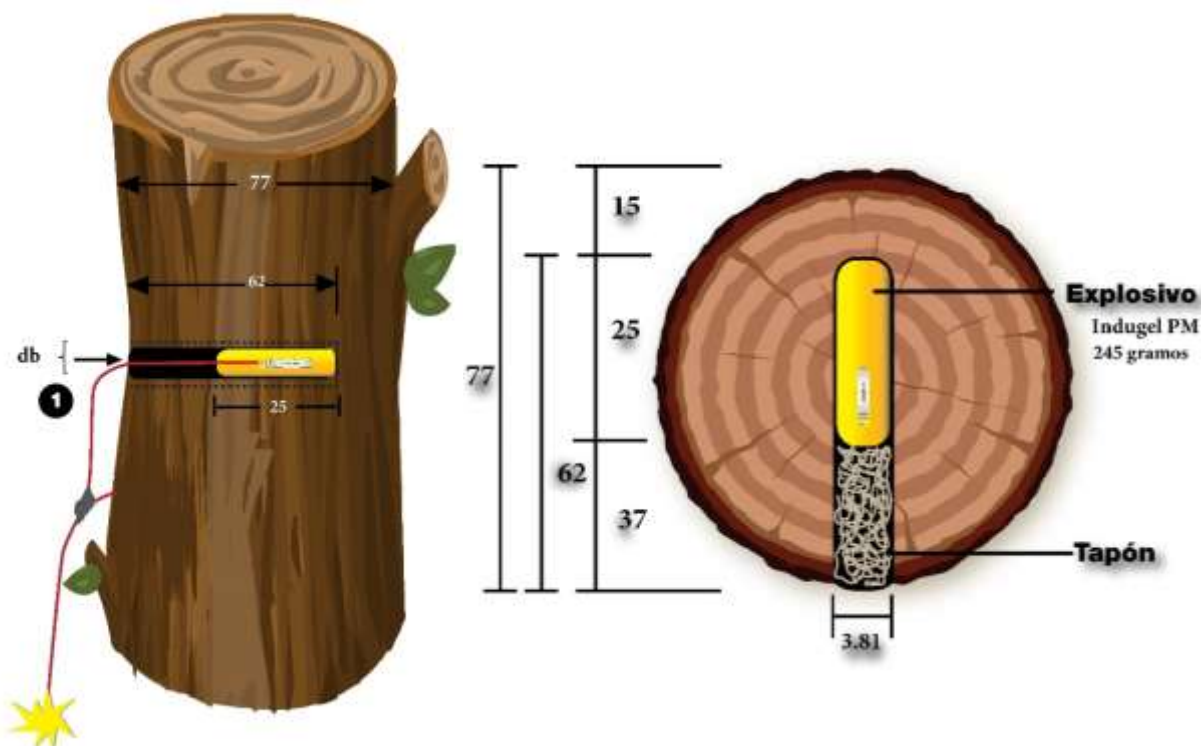


**Figura 37: Diseño Montaje Tercera Prueba para Carga Interna**  
Fuente: Elaboración propia

### Cuarta Prueba

Para este caso se procedió de la misma manera que las pruebas 1, 2 y 3; el procedimiento efectuado fue exactamente el mismo a diferencia que para esta prueba se utilizó una barra completa de la presentación comercial de Indugel plus PM la cual posee unas dimensiones de 32 milímetros de diámetro, una longitud de 250 milímetros y un peso de 245 gramos (ver tabla 13).

A continuación se presenta la descripción gráfica elaborada con un barreno y una barra completa de Indugel plus PM.

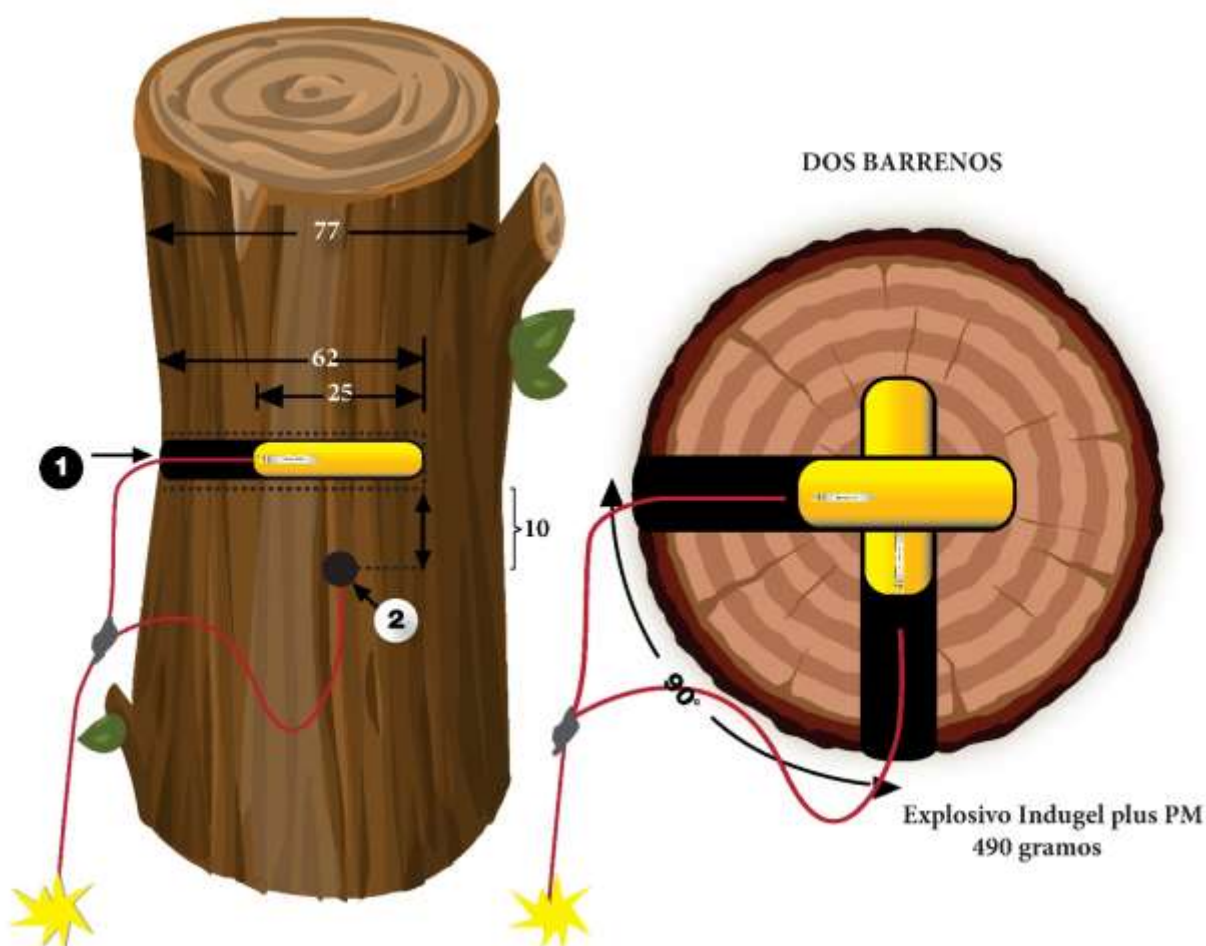


**Figura 38: Diseño Montaje Cuarta Prueba para Carga Interna**

Fuente: Elaboración propia

### Quinta Prueba

Para la última prueba realizada con carga interna se repitió el procedimiento descrito en las pruebas anteriores, con la diferencia que para la elaboración de esta prueba se realizó un barreno más, es decir se hicieron dos barrenos los cuales se elaboraron formando un ángulo de  $90^\circ$  entre sí con una separación de 10 cm. En cuanto al material explosivo se utilizaron dos barras de material explosivo que equivalen a 490 gramos de Indugel Plus PM y se requirió de la utilización de dos detonadores permisibles eléctricos de cobre (ver figura 39).

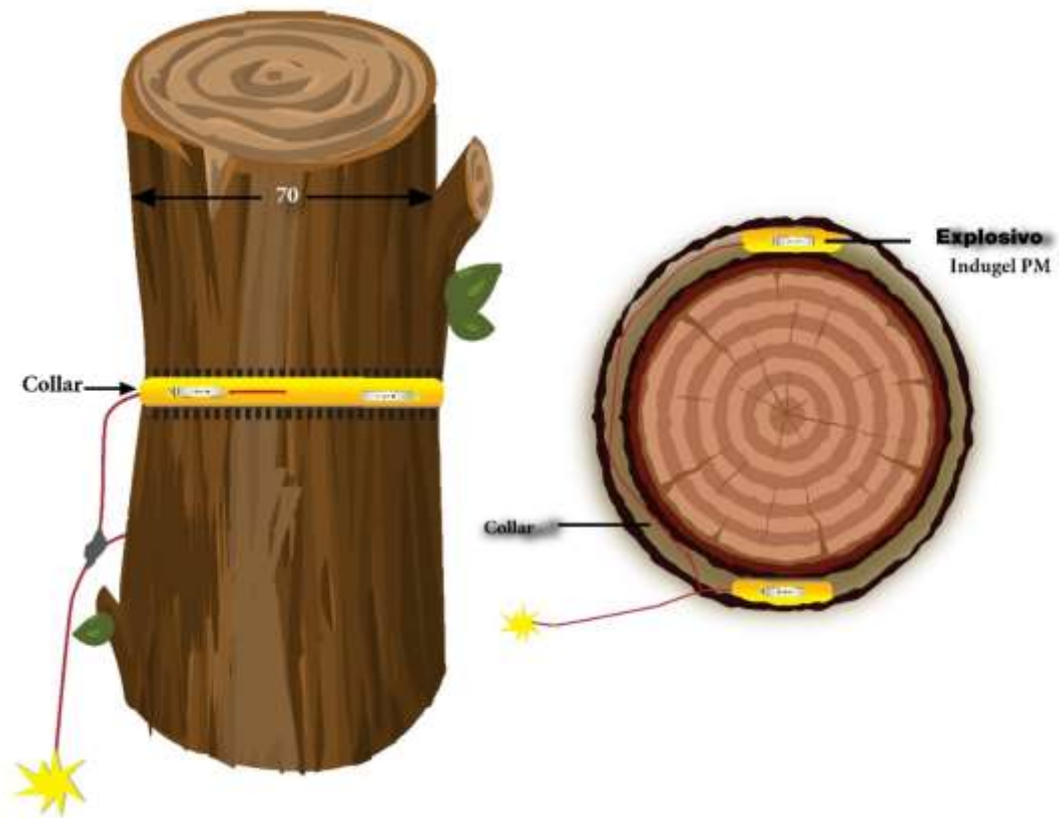


**Figura 39: Diseño Montaje Quinta Prueba para Carga Interna**  
Fuente: Elaboración propia

## *Procedimiento Carga Externa*

### *Primera Prueba*

- ✓ Dosificación del explosivo
- ✓ Dispositivo de montaje
- ✓ Colocación de la carga
- ✓ Conexión con el explosor
- ✓ Detonación o voladura
- ✓ Análisis de Resultados



**Figura 40: Diseño Montaje Primera Prueba Carga Externa**

Fuente: Elaboración propia

### *Dosificación del explosivo*

- Determinar las dimensiones del blanco: medir la longitud de circunferencia del árbol y dividirlo por el número PI ( $\pi$ ) para obtener el diámetro.
- Calcular el peso de la carga en TNT: aplicar la fórmula establecida para el corte de madera externo para hallar la cantidad de kilos de TNT necesarios.
- Dividir la cantidad de explosivo por la Efectividad Relativa ( $\eta$ ) como carga a utilizar: para el caso el explosivo utilizado es Indugel Plus PM cuya Efectividad Relativa como carga es 1,25.
- Hallar el gramaje del explosivo: elaborar la conversión de kilogramos a gramos.
- Dividir la cantidad hallada de explosivo en gramos por la unidad de medida del explosivo a utilizar: la presentación comercial de Indugel plus PM.



**Figura 41: Trozas para Pruebas Carga Externa**

Fuente: Elaboración propia

### ***Dispositivo de montaje***

Para su elaboración se requirió de un material que fuera flexible, por ello se optó por la utilización de una coraza en PVC (Policloruro de Vinilo) de 1 ½” para poder adaptarlo a la forma redondeada del árbol y dentro de la cual se introdujo el material explosivo. Para su cierre se utilizó una unión plástica y dos abrazaderas del mismo material para ajustarla adecuadamente.

Debido a que no se contó con la cantidad de material explosivo requerido calculado por las fórmulas que para el diámetro para la troza de madera de 70 cm de diámetro es de 7 kilogramos o su equivalente en la presentación comercial de 32\*250 milímetros que es de 29 tacos cuando se utiliza la fórmula americana (ver tabla 16), ya que esta cantidad aumenta a 30 tacos cuando su cálculo se elabora con la fórmula española (ver tabla 15), se procedió a efectuar la primera prueba con una pequeña cantidad de explosivo y de esta manera ir aumentando la cantidad hasta que se terminara el material conseguido.

Por lo anterior, para la primera prueba de carga externa se utilizaron 2 tacos de Indugel Plus PM presentación de 32\*250 milímetros, es decir 490 gramos los cuales se introdujeron dentro de la coraza y se procedió al montaje del dispositivo de iniciación, para ello se requirió de dos detonadores permisibles de cobre los cuales se introdujeron en partes equidistantes dentro del collar mediante la abertura de dos pequeños orificios.



**Figura 42: Dispositivo para Carga Externa**  
Fuente: Elaboración propia

### *Colocación de la carga*

Una vez que se realizó el montaje del dispositivo se procedió a su colocación alrededor de la troza dispuesta para efectuar la prueba externa. En este caso su colocación es más sencilla que la requerida para la carga interna ya que sólo se tiene que efectuar el cierre del collar una vez puesto alrededor del árbol con la utilización de la unión y las abrazaderas plásticas. Se optó por este material para evitar que con la explosión salgan disparadas partículas que puedan significar algún tipo de peligro al convertirse en metralla.



**Figura 43: Montaje Colocación Dispositivo para Carga Externa**

Fuente: Elaboración propia

### *Conexión con el explosor*

Teniendo el dispositivo de montaje debidamente puesto en la troza de madera, se procedió a efectuar las conexiones externas necesarias para realizar la voladura a la línea de disparo. En este punto la conexión es igual que el proceso adelantado para la carga interna, es decir se realizó la conexión de los cables que provienen de las terminales del detonador que previamente se dejaron expuestas en el collar, con una extensión la cual será conectada al explosor a una distancia adecuada tomando las medidas de seguridad necesarias para efectuar de forma segura la detonación.



**Figura 44: Conexión con Explosor para Prueba Externa**

Fuente: Elaboración propia

### *Detonación o voladura*

Finalmente teniendo todas las conexiones listas, ubicados a una distancia segura y habiendo tomado las medidas de seguridad necesarias se procedió a efectuar la respectiva voladura. Para ello se procedió a cargar el condensador del explosor girando varias veces la manivela para almacenar la energía necesaria y luego poder liberarla al oprimir el interruptor o botón (push) y de esta forma efectuar el disparo de la prueba. Este procedimiento es exactamente igual que para la carga interna.

Realizada la voladura se procedió a observar los resultados obtenidos.



**Figura 45: Voladura Carga Externa**  
Fuente: Elaboración propia

## Segunda Prueba

En la elaboración de esta prueba se repitió el procedimiento adelantado anteriormente, se desarrolló de la misma manera que la primera prueba, se hizo la respectiva colocación del dispositivo, en el cual se procedió a aumentar la cantidad de explosivo ya que para el caso se utilizaron tres tacos de Indugel plus PM de 32\*250 milímetros, es decir 735 gramos de material, se realizó la conexión con el explosor y su voladura (ver figura 47).

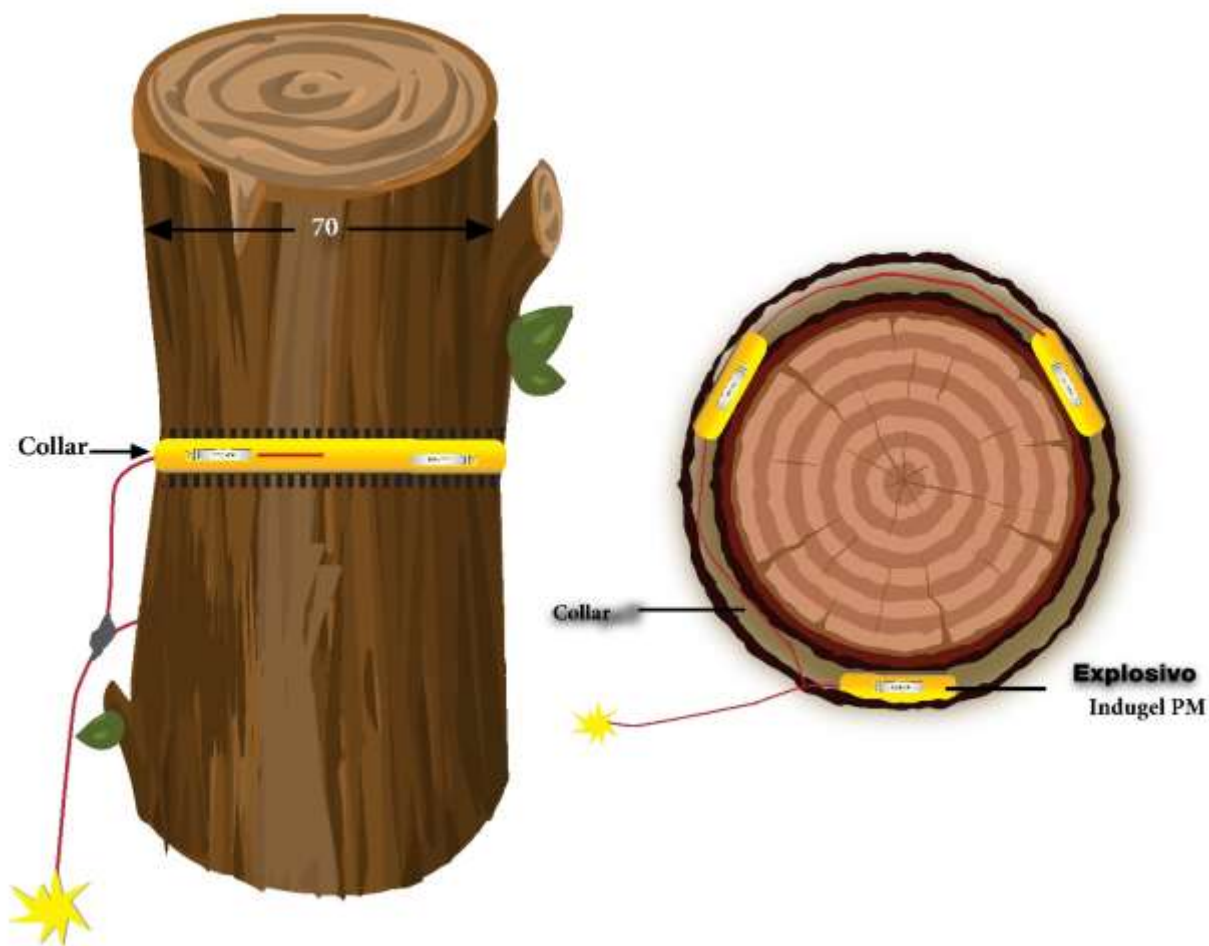
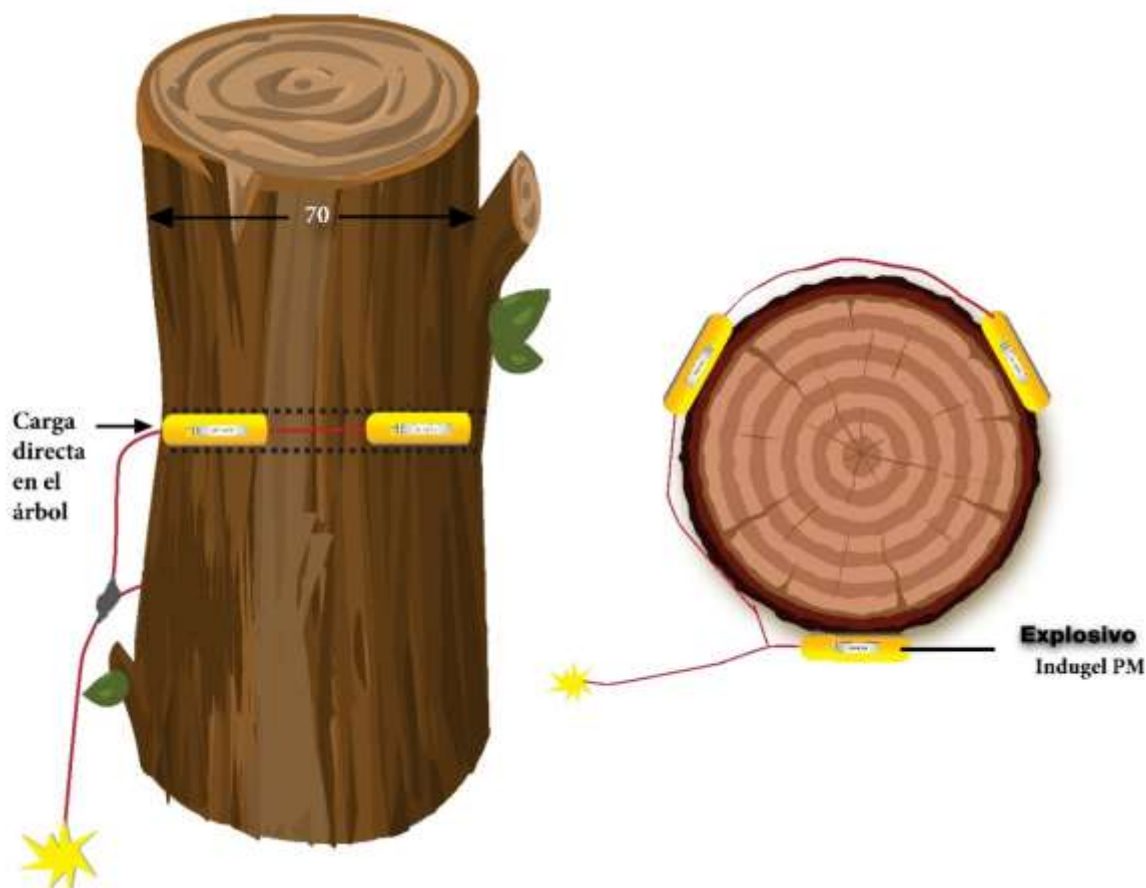


Figura 46: Diseño Montaje Segunda Prueba Carga Externa

Fuente: Elaboración propia

### *Tercera Prueba*

Para efectuar la última prueba se omitió el uso del dispositivo y se optó por colocar las cargas directamente sobre la troza de madera. Para su fijación se utilizó cinta la cual se enrolló a la troza y de esta forma garantizar que se quedara sujeta alrededor de la misma. El procedimiento posterior se efectuó de la misma forma que las anteriores pruebas mediante la conexión con el explosor y finalizando con su detonación o voladura. Para el caso se utilizaron tres tacos de material explosivo de 32\*250 milímetros que equivalen a 735 gramos de Indugel Plus PM. Los tacos fueron dispuestos en puntos equidistantes del perímetro de la circunferencia de la troza (ver figura 48).



**Figura 47: Diseño Montaje Tercera Prueba Carga Externa**

Fuente: Elaboración propia

## 10. Análisis de Resultados y Método Óptimo

### *Análisis de Resultados Pruebas con Carga Interna*

Culminada la primera prueba es decir una vez se realizó la voladura de la carga interna colocada a la troza de madera se procedió a observar los resultados obtenidos con esta cantidad de material explosivo.

Se observó que una vez liberada la energía dentro del barreno esta ejerce una gran presión por encontrarse la carga totalmente confinada, la onda explosiva genera daños alrededor del barreno. El daño causado por la explosión se concentró principalmente hacia afuera del barreno elaborado ya que del fondo del barreno hacia el exterior de la madera no se evidencia daño alguno.

Se produjo una pequeña fractura a la troza la cual se ve reflejada en un astillamiento lateral de la madera, este efecto causó un leve agrietamiento en dirección al vetado de la madera y un pequeño afloramiento de algunas partes de la madera hacia el exterior de la troza.

Dichos efectos pudieron haberse causado por un inadecuado taponamiento del barreno o también debido a que la energía liberada generalmente busca el lado más frágil por donde escapar.

No se observa desprendimiento alguno de partes de madera que debido a la explosión hayan podido salir disparados ya que la parte afectada aún permanece unida a la integridad de la troza probada.

Se pudo constatar que la cantidad de explosivo utilizado no fue suficiente ya que la troza de madera no logró cortarse totalmente. Los resultados de esta prueba se pueden detallar en la figura inmediatamente siguiente (figura 48).



**Figura 48: Resultado Primera Prueba con Carga Interna**

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la segunda prueba la cual se efectuó añadiendo una cantidad mayor de material explosivo se observan similares resultados a los obtenidos en la primera prueba, sin embargo se pudo evidenciar que el daño causado a la troza de madera fue mayor que el causado en la prueba anterior.

Para esta prueba se observó un mayor agrietamiento en la troza de madera, existe un mayor afloramiento de la madera, se evidencia una mayor ruptura causada por la detonación ya que la madera quedo separada en varias capas con unos leves espaciamentos entre ellas causadas por el desplazamiento de la onda explosiva liberada desde el interior hacia la parte externa de la troza.

Dicho comportamiento de separación por capas pudo haber sido causado por la misma naturaleza de la madera generada por los anillos de crecimiento o por el recorrido de la energía expulsada por la carga.

En su núcleo se observa un orificio de aproximadamente de 10 cm de diámetro que recorre longitudinalmente la troza causada por la concentración de la carga del barreno en ese punto.

De manera similar a la prueba anterior se observa un daño pronunciado del fondo del barreno hacia el inicio del mismo ya que no se evidencia daño alguno del fondo del barreno hacia la parte exterior de la troza de madera, causado posiblemente por una mayor densidad de explosivo y un menor espacio para el taponamiento del barreno que permite que en dicha parte sea más propensa la liberación de la energía por ser la parte más vulnerable.

La cantidad de explosivo utilizado aún no es el suficiente ya que apenas se presentó daños en un 25% de la troza (ver figura 49).



**Figura 49: Resultado Segunda Prueba con Carga Interna**

Fuente: Elaboración propia

Continuando con la tercera prueba se pudo contemplar un daño superior al causado en las pruebas anteriores. En este punto se puede constatar que existe un patrón en el daño causado, ocasionado principalmente por el uso de material explosivo, es decir que el daño causado en la troza es proporcional a la cantidad de material utilizado ya que el comportamiento es igual a las pruebas realizadas con antelación diferenciándose únicamente en que el daño en la madera es más evidente.

Se refleja pérdida de pequeñas secciones de las capas de la estructura de la troza, su agrietamiento es mayor, el afloramiento producido es más palpable ya que se observa una

separación considerable entre las capas que se generaron por la detonación, alcanzando en algunas partes un espaciamiento superior a los 10 cm y la capa más exterior presenta una separación cercana a los 30 cm al contorno del árbol.

En relación al daño recibido en su núcleo se observa un orificio de aproximadamente de 20 cm de diámetro que recorre longitudinalmente la madera. En cuanto a la cantidad de explosivo utilizado aún no es el suficiente ya que apenas se presentó daños en un 40% de la troza (ver figura 50).



**Figura 50: Resultado Tercera Prueba con Carga Interna**

Fuente: Elaboración propia

En la elaboración de la cuarta prueba la cual se realizó como se describió en su procedimiento con una barra de Indugel plus PM de 32\*250 milímetros y un peso de 245 gramos sus resultados son más convincentes.

Se evidencia un mayor daño en su núcleo por el orificio causado ya que se puede ver una gran grieta en su centro, se manifiesta un gran número de divisiones por capas las cuales presentan un espaciado y desplazamiento considerables a comparación de pruebas anteriores.

En este caso se observa agrietamiento en toda la madera ya que se puede constatar que se ocasionó una rotura que atraviesa toda la troza produciendo la división parcial en dos partes de la madera, se produjo un astillamiento bastante marcado en dirección al vetado de la troza así como la expulsión de secciones de las capas fracturadas alrededor de la voladura lo que demuestra un desprendimiento de partes de la estructura de la troza por la energía causada debido primordialmente a la mayor cantidad de material explosivo utilizado.

Se pudo constatar que los efectos de la voladura causaron daños en un 70 % en la estructura de la troza de madera acercándose al propósito establecido. Los resultados obtenidos se pueden evidenciar en la figura 51.



**Figura 51: Resultado Cuarta Prueba con Carga Interna**  
Fuente: Elaboración propia

En la última prueba efectuada para carga interna es decir la quinta prueba realizada con dos barras de Indugel plus PM de 32\*250 milímetros y un peso de 490 gramos los resultados evidenciados son más contundentes.

Debido a la cantidad de explosivo que se destinó para esta última prueba se hizo necesario la elaboración de dos barrenos los cuales se ubicaron en forma perpendicular y separados entre sí 10 cm (ver detalle en figura 39).

Los resultados obtenidos con esta configuración son bastante concluyentes ya que al revisar el alcance de la última detonación se advierte un gran daño en la estructura de la troza de madera ya que se encontró totalmente destruida.

Una vez ubicados en el punto de la detonación se observan residuos de madera totalmente desechos y dispersos en un radio aproximado de 15 metros. Se puede apreciar en los rastros dejados tras la detonación que la violencia de la energía liberada causó que la troza se fragmentara en múltiples partes quedando sólo algunos segmentos pequeños de la troza visibles ya que el resto se ve notablemente astillado en pequeñas partículas.

Con esta prueba se demuestra que se logró el objetivo de la detonación ya que aunque es bastante drástico el resultado se logró el corte de la troza. Este efecto pudo haber sido causado por la configuración utilizada con los dos barrenos o a que se utilizó una cantidad mayor a la realmente necesaria para realizar un corte con consecuencias menos violentas como lo evidencia la destrucción de la troza de madera (ver figuras 52 y 53).

Ahora sólo queda por comparar los resultados evidenciados con lo establecido en los métodos investigados y las fórmulas consultadas para el corte de madera con carga interna y de esta forma presentar una idea más clara del objetivo alcanzado,

Para ello se resumen los datos calculados con los datos aportados en la elaboración de la presente prueba ya que en ella se dio por concluido el ensayo con carga interna.

**Tabla 17: Comparativo Carga y Barrenos según Resultados Fórmula Internas y Prueba Realizada**

Explosivo: Indugel Plus PM Diámetro troza: 77 cm	Carga (kilogramos)	Carga (Tacos)	Diámetro barreno (cm)	Cantidad de barrenos
Fórmula Americana	1,36	6	3,67	4
Fórmula Española	1,44	6	3,78	4
Prueba Realizada	0,49	2	3,81	2

Fuente: Elaboración Propia

Podemos establecer que mientras en la fórmula Americana con carga interna se requieren 1360 gramos para alcanzar su objetivo, en la prueba realizada sólo se hizo necesario la utilización de 490 gramos, cantidad que resulta mucho menor ya que representa casi una tercera parte de la cantidad obtenida con el cálculo de la fórmula aplicada.

Ahora bien si se analiza el resultado con la fórmula española se evidencia que los resultados estarían un poco más alejados que las pruebas efectuadas ya que su relación sería un poco mayor por requerir de mayor cantidad de material explosivo que la requerida en la fórmula americana.

Esto es un indicativo de que dichas fórmulas se encuentran sobredimensionadas ya que están diseñadas para no fallar sin tener en cuenta la racionalización del explosivo por provenir de manuales militares ya que su principal objetivo es destruir dejando de un lado el uso eficiente del material explosivo en cuanto a su cantidad se refiere.

Si se realiza la comparación de la carga necesaria en la presentación comercial distribuida por Indumil, se tiene que según cálculos se requería de 6 tacos para poder efectuar la prueba de acuerdo al diámetro de la troza de madera, sin embargo solamente se utilizaron 2 tacos ya que con ellos se logró destrozar la troza de prueba, que representan apenas la tercera parte de lo establecido por la fórmula americana de corte de madera para carga interna.

En cuanto al diámetro del barreno se utilizó uno mayor al indicado debido a que el diámetro resultante de los tanteos realizados por las fórmulas expuestas para ello no es de unas dimensiones convencionales y se hizo difícil su elaboración, por ello se optó por realizar el barreno con una broca de 1 ½ pulgadas, o su equivalente en el sistema métrico el cual es de 3,81 cm que no representa un incremento exagerado al planteado en los cálculos propuestos.

En relación al número de barrenos para colocar la carga interna se necesitaron únicamente dos barrenos que equivalen a la mitad de los establecidos por las fórmulas, luego en este caso también la disminución es evidente.

De la tabla 17 se puede concluir que se obtuvo el resultado en los ensayos con una cantidad mucho menor del explosivo requerido así como de cantidad de barrenos necesarios para la colocación de la carga según las fórmulas consultadas, que demuestran que las fórmulas analizadas están sobredimensionadas para su utilización en el medio colombiano. Lo anterior puede deberse a que el explosivo utilizado para la elaboración de dichas fórmulas, así como la madera, contienen distintas propiedades tanto físicas, químicas y mecánicas diferentes a lo encontrado en el territorio nacional.



**Figura 52: Resultado Quinta Prueba con Carga Interna**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 53: Fragmentos Resultantes Quinta Prueba con Carga Interna**  
Fuente: Elaboración propia

### *Análisis de Resultados Pruebas con Carga Externa*

Realizada la detonación de la primera prueba con carga externa se pudo evidenciar que la explosión no causó daños a la troza de madera ya que inspeccionada en todo su perímetro sólo se pudo observar una muy leve rotura en la parte de su corteza, sin embargo los efectos de la voladura no se ven reflejados en el cuerpo de la madera (ver figura 54).

Lo anterior pudo deberse a que la corteza actuó como un colchón que amortiguó la violencia de la energía liberada por la detonación lo que brindó de alguna forma una protección a la troza que no permitió que el dispositivo instalado consiguiera el efecto deseado.

Otro factor que pudo haber influido en el resultado obtenido tiene que ver con el dispositivo de montaje ya que al no encontrarse confinada la carga y existir vacíos dentro del collar, la potencia y presión ejercidos por el explosivo no tienen la misma eficiencia ya que la mayoría de energía liberada se pierde.

De igual forma otra causa pudo deberse a que por la misma forma del contorno del árbol, no permitió que el dispositivo quedara totalmente adherido al mismo, quedando algunas pequeñas separaciones entre el collar y la troza lo que pudo haber influido en el resultado.

Por otro lado se pudo concluir que los 490 gramos de explosivo utilizado no fueron suficientes ya que se evidencia que la cantidad utilizada fue muy poca para que se lograra el objetivo planteado.

Por tal razón se procedió a efectuar la siguiente prueba subsanando los errores evidenciados en la primera detonación y añadiendo una cantidad mayor de material explosivo dentro del dispositivo de montaje elaborado para colocar alrededor de la troza de madera.



**Figura 54: Resultado Primera Prueba con Carga Externa**

Fuente: Elaboración propia

Para la segunda prueba y evidenciado los resultados negativos obtenidos en la primera prueba se procedió a confinar la carga dentro del collar con arena y para lograr una mejor adherencia al contorno de la troza se utilizó cinta la cual fue enrollada dando varias vueltas a su contorno y de esta manera lograr una mejor fijación del dispositivo.

En relación a la troza de madera también se optó por retirar la corteza en la parte donde se colocaría el collar y observar si se obtenían mejores resultados que los vistos anteriormente. En la figura 55 se puede observar los cambios realizados al montaje de la carga externa para la segunda prueba.



**Figura 55: Conformación Segunda Prueba con Carga Externa**  
Fuente: Elaboración propia

Revisado el efecto de la segunda detonación para carga externa con los cambios efectuados en su montaje se pudo establecer que efectivamente se lograron mejores resultados que los vistos en la detonación anterior.

Para el caso particular la carga colocada dentro del collar fue el de tres tacos de Indugel Plus PM de 32\*250 milímetros que equivalen a 735 gramos de material explosivo y su efecto se refleja en el daño que recibió la troza de madera.

Se pudo observar que el tronco sufrió unas pequeñas fisuras localizadas principalmente en las partes donde se ubicaron los tacos de Indugel en el interior del dispositivo de montaje elaborado.

Las dimensiones de la fisura causada por la detonación se asemejan a las dimensiones del taco de Indugel, presentando pequeños astillamientos en su contorno con un afloramiento hacia el exterior de la troza. En relación al daño causado por el explosivo en la madera también es necesario exponer que sus efectos lograron penetrar la troza a una profundidad aproximada de 10 cm, sin embargo, a pesar de los efectos descritos, se puede concluir que la cantidad de explosivo aún es muy pequeña para lograr el corte de la troza (ver figura 56).



**Figura 56: Resultado Segunda Prueba con Carga Externa**  
Fuente: Elaboración propia

Para la última prueba se optó por omitir el uso del dispositivo elaborado y se procedió a colocar directamente la carga sobre la superficie de la troza y de esta manera poder comparar los resultados obtenidos.



**Figura 57: Montaje Tercera Prueba Carga Externa**  
Fuente: Elaboración propia

Culminada la detonación de la tercera prueba con carga externa se procedió a verificar los resultados obtenidos y se pudo comprobar que los efectos causados fueron muy similares a los obtenidos en la segunda prueba ya que se evidencian los mismos patrones de daño en la superficie de la troza de madera.

La explosión ocasionó fisuras localizadas en los sitios donde se hizo la colocación de la carga, se presentó astillamiento en la superficie de la troza en la parte que bordeaba el taco de Indugel.

En relación al orificio causado se pudo detallar que la profundidad que se presentó en la madera contiene características semejantes a las observadas en la prueba anterior ya que la fisura presentó una perforación aproximada de 10 cm lo que permite deducir que no existió mayor diferencia entre haber colocado la carga con el dispositivo y haberla colocada directamente en la superficie de la troza.

No obstante los resultados obtenidos, cabe señalar que la cantidad de explosivo utilizado no fue el indicado para lograr el corte de la troza cuanto se efectúa por el método de carga externa, por tal motivo se hacía necesario elaborar más pruebas incrementando la cantidad de explosivo hasta lograr el desempeño deseado, sin embargo no fue posible su elaboración debido a la cantidad limitada de Indugel Plus PM conseguido para su ejecución.

**Tabla 18: Comparativo Carga según Resultados Fórmulas Externas y Prueba Realizada**

Explosivo: Indugel Plus PM Diámetro troza: 70 cm	Carga (kilogramos)	Carga (Tacos)
Fórmula Americana	7,00	29
Fórmula Española	7,12	30
Prueba Realizada	0,74	3

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla 18 se puede señalar que la cantidad de material explosivo para la ejecución de una sola prueba con carga externa utilizando la fórmula americana es de 7 kilogramos es decir 29 tacos de Indugel Plus PM y con la fórmula española su cantidad varía muy poco.

Si se compara la cantidad requerida con la utilizada en la prueba se puede resaltar que su uso se limitó aproximadamente a una décima parte del material necesario lo que influyó drásticamente en el resultado evidenciado ya que para obtener un resultado más concluyente considero que debería al menos haber podido elaborar las pruebas con la mitad de lo calculado en las fórmulas es decir aproximadamente 3,5 kilogramos de Indugel Plus PM, sin embargo por distintas circunstancias no fue posible su disponibilidad y sólo fue posible realizarlas con 745 gramos lo que equivale a 3 tacos de explosivo.



**Figura 58: Resultado Tercera Prueba con Carga Externa**  
Fuente: Elaboración propia

### ***Método Óptimo***

Para poder identificar adecuadamente el método más eficiente para realizar el corte de madera con el uso de explosivos se hace necesario conocer primero las ventajas y desventajas que brinda cada uno de los métodos que fueron objeto del presente estudio y así poder plantear de una manera más objetiva los beneficios que presentan al ser utilizados.

### **Método de Carga Interna**

#### ***Ventajas:***

- ✓ Disminución de la cantidad de material explosivo requerido
- ✓ Mejor aprovechamiento de la energía del explosivo
- ✓ Control de la caída del árbol mediante la inclinación de los barrenos
- ✓ Menor costo

#### ***Desventajas:***

- ✓ Mucho tiempo para su preparación
- ✓ La perforación de los barrenos es muy laboriosa
- ✓ Requiere el uso de herramientas especiales para su montaje
- ✓ Presenta una mayor pérdida de madera por la destrucción causada

## **Método de Carga Externa**

### ***Ventajas:***

- ✓ Ahorro de tiempo en su preparación
- ✓ No requiere de herramientas especiales para su ejecución
- ✓ Disminución del corte
- ✓ Presenta una pequeña cantidad de pérdida de material maderable

### ***Desventajas:***

- ✓ Requiere mayor cantidad de material explosivo
- ✓ Tan sólo utiliza una porción muy pequeña de la energía de los explosivos
- ✓ Se produce pérdida de presión por no estar confinada la carga
- ✓ Si se desea tener control de la caída del árbol se debe localizar la carga en un solo punto
- ✓ Aumento del costo

Cabe señalar que las fortalezas o debilidades de cada método se centran principalmente en la cantidad de material explosivo, los tiempos requeridos para su ejecución y su costo, lo que resulta ser ventaja para un método, se convierte en desventaja para el otro.

De lo anterior se puede deducir por ejemplo, que mientras la cantidad de material explosivo resulta ser una ventaja para el método interno, no lo es para el método de carga externo ya que se requiere de una cantidad mucho mayor como se observó en los cálculos realizados para cada método. Sin embargo, en relación al tiempo, ocurre lo opuesto ya que ahí es una ventaja para la carga externa ya que la interna conlleva más tiempo para su ejecución debido a que en cualquier disposición que se use, la perforación de los barrenos es muy dispendiosa, por ello generalmente se prefieren las cargas externas.

En el caso del método de carga interna es aconsejable su utilización para diámetros mayores a 50 cm ya que las pruebas efectuadas demostraron su óptimo desempeño en un árbol con un diámetro de 77 cm, logrando su corte con una cantidad tres veces menor que la planteada en la fórmula.

Para el caso de cargas externas fue evidente que para diámetros grandes se requiere de una cantidad enorme de explosivos, sin embargo su uso sería recomendable para diámetros menores a los 50 cm ya que aunque no existió un desempeño efectivo en las pruebas ejecutadas debido al grosor de la troza de madera utilizada, la cual tenía un diámetro de 70 cm, si se podría afirmar que puede tener mejores resultados en diámetros pequeños por la fisura que causó en el ensayo la cual fue cercana a los 15 cm de profundidad; este daño sumado al peso del árbol podrían contribuir a su uso efectivo para diámetros de árboles que se encuentre entre 30 y 50 cm de diámetro.

El éxito del corte de árboles o vigas de madera con el uso de explosivos depende de la colocación inteligente de los explosivos, lo que se logra con el empleo adecuado de las fórmulas aquí descritas, es aconsejable, sin embargo la dosificación de los explosivos por medio de pruebas experimentales que permitan proponer un uso más eficiente en relación a la cantidad de explosivo necesario ya que se evidencia su sobredimensionamiento y por consiguiente su desperdicio.

Finalmente se puede concluir que no existe como tal un método óptimo para el corte de árboles con el uso de explosivos y haciendo referencia a los métodos analizados y trabajados experimentalmente a lo largo de la presente investigación se pudo constatar que dependiendo de la situación en la que se apliquen o las circunstancias que se requieran para su uso, tanto el método de carga interna, como el de carga externa resultan ser efectivos para determinados casos por lo que resulta indispensable realizar el estudio de estas situaciones específicas antes de realizar cualquier voladura.

## Conclusiones

- Con la indagación de los métodos existentes se pudo evidenciar que existe muy poca información sobre el uso de explosivos para el corte de madera y la información encontrada se basa principalmente a manuales españoles o a manuales de la armada de los Estados Unidos. Para el caso colombiano, su uso se limita a las Fuerzas Armadas quienes los utilizan pero como cargas de obstrucción o despeje de zonas para aterrizaje de sus aeronaves.
- En lo referente a la cantidad de explosivo necesario para las distintas cargas, se puede constatar que una vez elaborado los cálculos de las fórmulas para cada caso particular, se requiere de una mayor cantidad de explosivo cuando la carga es externa que para la carga interna ya que se necesitan alrededor de 6 veces más la cantidad de explosivo para carga externa que para carga interna lo que indica que es más eficiente en método de carga interna en cuanto a la cantidad de explosivo ya que la potencia del explosivo es mayor cuando se encuentra totalmente confinado.
- Para la carga interna la desventaja recae en el tiempo de ejecución de la voladura ya que se requiere de la perforación de barrenos que conllevan un mayor tiempo, al igual que hay que calcular el número de barrenos y el diámetro de los mismos aumentando los cálculos necesarios, comparado con la carga externa que solo requiere su montaje superficial con lo cual se logra una voladura en menor tiempo.

- Las fórmulas existentes para el cálculo de las cargas son sobredimensionadas ya que su objetivo inicial era la obstrucción y destrucción, por tal motivo para su utilización en el corte de madera se hace necesario el replanteamiento de las mismas.
- Con el uso de explosivos para el corte de árboles se reduce el tiempo de trabajo, de mano de obra requerida lo que implicaría una reducción de costos comparada con la manera tradicional de realizar el corte de madera.
- Para la elaboración del mecanismo de montaje de la carga se tuvo en cuenta el evitar la dispersión de partículas que resultaran peligrosas al momento de realizar la voladura, por tal razón se utilizó PVC para su elaboración ya que es un material plástico y liviano que no representa un riesgo alto si llegara a salir expulsado en el aire.
- Entre las desventajas que representa el uso de los explosivos se pueden enumerar la obtención de permisos y trámites engorrosos, la pérdida de elementos recuperables, requieren de un estricto control de vibraciones y ondas, la poca aceptación por parte de la comunidad al igual que pueden presentar problemas legales.

## **Recomendaciones**

A manera general se debe tener un estricto uso de las recomendaciones de seguridad en su transporte, almacenamiento, utilización, cargue de los barrenos si es el caso, antes y después del disparo, cuando se está trabajando con materiales explosivos y de esta manera evitar cualquier riesgo inherente a su utilización indebida.

En cuanto a la consecución del material explosivo para efectuar futuros trabajos en el campo de los explosivos, se hace necesario hacer la gestión necesaria ante las entidades pertinentes con el tiempo suficiente ya que generalmente estos requieren de un tiempo prudencial y de esta manera evitar atrasos he incumplimientos de los objetivos proyectados.

### Referencias Bibliográficas

- Abbott, A. F., Haskin, B. J., & Klopich, M. E. (1969).** *U.S. Patent No. 3,444,811*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Alvis, J., & Sotelo, M. (2009).** Identificación de las causas que alteran el rendimiento de los equipos de extracción de madera. Estudio de tiempos y movimientos. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7(2), 15-23.
- ARMY, U. (2007).** FM 5-250 Explosives And Demolitions Manual, p. Recuperado el 16 de agosto de 2016, de <https://info.publicintelligence.net/USArmy-Explosives.pdf>
- Bentley, T. A., Parker, R. J., & Ashby, L. (2005).** Understanding felling safety in the New Zealand forest industry. *Applied ergonomics*, 36(2), 165-175.
- Beckley, Bob. (2008).** Felling Hazard Trees With Explosives. 0867 2325. Missoula, MT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Missoula Technology and Development Center. 8 p. Recuperado el 14 de Abril de 2016, de <http://www.fs.fed.us/t-d/pubs/pdfpubs/pdf08672325/pdf08672325dpi300.pdf>
- Bof, B. (1988).** Explosivos en operaciones forestales. In 6. *Congreso Forestal Argentino. Santiago del Estero (Argentina). 16-20 Ago 1988.* (Vol. 2, pp. 502-504).
- Breyer, D. E., Fridley, K. J., Cobean, K. E., & Pollock, D. G. (2007).** Design of Wood Structures, ASD/LRFD. RR Donnelley.
- Bull, E. L., Partridge, A. D., & Williams, W. G. (1981).** *Creating snags with explosives* (Vol. 393). US Dept. of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station.
- Burke, S. (2011).** Explosive Deployment. *Forestry Journal essentialARB*, págs. 48-49. Obtenido de <http://www.brexco.co.uk/uploads/attachment/20/forestry-journal-july-2011.pdf>
- Cadena Forestal Bogotá Cundinamarca. (2006).** *Acuerdo de Competitividad para la Cadena Productiva Forestal de la Región Bogotá-Cundinamarca*. Bogotá. Recuperado el 18 de Agosto de 2016, de [http://sioc.minagricultura.gov.co/templates/sioc\\_cadenas/docs/1366.pdf](http://sioc.minagricultura.gov.co/templates/sioc_cadenas/docs/1366.pdf)
- Cañas Torres, E. F., & Pérez Cifuentes, J. E. (2012).** La utilización de los explosivos en ingeniería civil.
- Chamorro, H. M. (2008).** *Manual del vigilante de explosivos*. Editorial Club Universitario.

- Chaney, R. (13 de Mayo de 2012).** U.S. Forest Service considers using explosives to bring down trees. *Missoulian*. Recuperado el 12 de Abril de 2016, de [http://missoulian.com/news/local/u-s-forest-service-considers-using-explosives-to-bring-down/article\\_2ccac418-9cbb-11e1-afb2-0019bb2963f4.html](http://missoulian.com/news/local/u-s-forest-service-considers-using-explosives-to-bring-down/article_2ccac418-9cbb-11e1-afb2-0019bb2963f4.html)
- Crowe, M. P., Paxton, J., & Tyers, G. (1984).** Felling dead trees with explosives. *Australian Forestry*, 47(2), 84-89.
- Departamento Nacional de Planeación. (2007).** *Cadena forestal, madera y muebles*. Documento sectorial, Bogotá. Recuperado el 16 de Agosto de 2016, de [http://sioc.minagricultura.gov.co/templates/sioc\\_cadenas/docs/1049.pdf](http://sioc.minagricultura.gov.co/templates/sioc_cadenas/docs/1049.pdf)
- Dialnet 2007, Revista Derecho del Estado N° 20.** Responsabilidad profesional en la construcción de obras, Felipe Vallejo. [dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3400541.pdf](http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3400541.pdf)
- DT Mantilla, F., & Romero Naranjo, F. R. (2009).** Manual técnico para el uso de explosivos utilizados en voladuras a cielo abierto en vías terrestres.
- ESCUELA, D. I. M. (1992).** Empleo de los Explosivos en Obras de Ingeniería Civil y Militar. *Editorial Margabby Ltda., Santafé de Bogota, DC*.
- EXSA. (2013).** Manual Práctico de Voladura. Lima: EXSA.
- EXPLOSIVOS.** Características de los explosivos. España, octubre de 2004 En: <http://lupus.worldonline.es/lisar314/html/caracteristicas.htm>
- Gutierrez, A., & Baonza, M. V. (2001, June).** Influencia de los extractivos en las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Pinus pinea* L. In *Congresos-CARGA FINAL*.
- Indumil, I. M. (2010).** Catalogo Indumil. Obtenido de <https://www.indumil.gov.co/docs/editor/catalogoindumil2010.pdf>
- Instituto Tecnológico Geominero de España. (1994).** Manual de Perforación y Voladura de Rocas. Madrid: Cartografía Madrid.
- J. E. Austin Associates, Inc. (2008).** *La Competitividad Forestal de Colombia*. Estudio preparado para el programa MIDAS de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Recuperado el 16 de Agosto de 2016, de [http://sioc.minagricultura.gov.co/templates/sioc\\_cadenas/docs/1051.pdf](http://sioc.minagricultura.gov.co/templates/sioc_cadenas/docs/1051.pdf)
- Lastra Rivera, J. A. (1982).** Compilación de las propiedades físico-mecánicas y usos posibles de 172 maderas de Colombia.
- Ledgard, J. (2007).** *A Soldiers Handbook, Volume 1: Explosives Operations*. Lulu.com.

- Ley 100 de 1993.** "Por la cual se crea el sistema de seguridad social integral y se dictan otras disposiciones" <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=5248>
- López, L. J. M., & Torres, H. N.** Uso de explosivos en la agricultura: una alternativa en el caso de suelos compactados. *Agronomía Colombiana*, 8(2), 350-363.
- López Quintero, C. A. (2015).** Los explosivos en ingeniería y su empleo en voladuras subacuáticas.
- Martínez Escobar, J. E., & Siza Simbaña, J. C. (2009).** Propiedades físico-mecánicas del eucalipto y aplicación al diseño estructural de una vivienda parte de una granja integral, ubicada en el IASA 1.
- Martínez, H. (2005).** La cadena forestal y madera en Colombia. Bogotá. Obtenido de [https://agronet.gov.co/www/docs\\_agronet/20051121663\\_caracterizacion\\_forestal.pdf](https://agronet.gov.co/www/docs_agronet/20051121663_caracterizacion_forestal.pdf)
- Martínez, T. C.** Utilización de voladuras de contorno como vía para atenuar afectaciones al medio ambiente durante la construcción de obras hidrotécnicas.
- Moreno, L. A. C., Rojas, W. G. H., & Junco, O. J. G. (2012).** Caracterización de la Guadua Angustifolia Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10. *Facultad de Ingeniería*, 21(33), 53-71.
- Moya, L., Cardoso, A., Cagno, M., & O'Neill, H. (2015).** Caracterización estructural de la madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Maderas: Ciencia Y Tecnología*, 17(3), 597-612. doi:10.4067/S0718-221X2015005000053.
- National Park Service. (2007).** *National Park Service Handbook for the Storage, Transportation, and Use of Explosives*. United States. Obtenido de [https://www.nps.gov/parkhistory/online\\_books/nps/explosives/Chapter9.pdf](https://www.nps.gov/parkhistory/online_books/nps/explosives/Chapter9.pdf)
- Occupational Safety & Health Administration (OSHA).** Danger Tree. Standards 29 CFR 1910-266(c). Department of Labor. United States. Recuperado de: [https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_table=STANDARDS&p\\_id=9862](https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9862)
- Oscar, C. R. (2015).** Propiedades de los materiales. Madera.
- Pérez Ortega, Á. (2014).** Comparación de ensayos a compresión de madera estructural mediante norma UNE y norma ASTM.
- Proaño Cadena, G. N. (2009).** Folleto de perforación y voladura.
- PROEXPORT Colombia. (2009).** *Sector forestal en Colombia*. Recuperado el 16 de Agosto de 2016, de [http://sioc.minagricultura.gov.co/templates/sioc\\_cadenas/docs/1049.pdf](http://sioc.minagricultura.gov.co/templates/sioc_cadenas/docs/1049.pdf)

**Quintero, C. A. (2014).** Generalidades de los Explosivos. Bogotá

**Roldán Rico, J. M. (2014).** Influencia de la humedad y densidad en la dureza como propiedad físico-mecánica de la madera.

**Weimer, D. (2013).** Danger Tree Blasting in British Columbia. (T. O. Engineers, Ed.) The Journal of Explosives Engineering, 30(3), 12-15. Recuperado el 15 de Abril de 2016, de <http://www.nxtbook.com/naylor/ISES/ISES0313/index.php?startid=13#/14>