

PROCESOS CONSTRUCTIVOS PARA TÚNELES VIALES DESARROLLADOS
EN COLOMBIA

PABLO FRANCISCO HUERTAS PINEDA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.

2016

PROCESOS CONSTRUCTIVOS PARA TÚNELES VIALES DESARROLLADOS
EN COLOMBIA

PRESENTADO POR:
PABLO FRANCISCO HUERTAS PINEDA

MONOGRAFÍA

DIRECTOR:
DR. JUAN CARLOS RUGE C.

PAR:
ING. JOSÉ ANDRÉS CRUZ WILCHES

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.

2016

CONTENIDO

	Pág.
OBJETIVOS	11
INTRODUCCIÓN	12
1. CAPÍTULO 1 - EVOLUCIÓN GEOLÓGICA COLOMBIANA.....	15
1.1. REGIONES COLOMBIANAS.....	16
1.1.1. Región Andina.....	16
1.1.2. Región del Caribe.....	17
1.1.3. Región de la Orinoquia – Llanos Orientales.....	17
1.1.4. Región de la Amazonía.	17
1.1.5. Región Pacífica.	17
1.1.6. Región Insular.	18
1.2. MOVIMIENTOS DE LA CORTEZA TERRESTRE.	18
1.3. PLACAS TECTÓNICAS.....	21
1.4. INTERACCIÓN DE PLACAS	24
1.4.1. Expansión del Suelo Marino.....	24
1.4.2. Límites convergentes.	24
1.4.3. Límites Falla - Transformante	25
1.5. ELEVACIÓN DE LAS CORDILLERAS DE COLOMBIA.....	25
1.6. ORIGEN DE LAS CORDILLERAS.....	30
1.6.1. Cordillera Central.	30
1.6.2. Cordillera Oriental.	31
1.6.3. Cordillera Occidental	32
1.7. ROCAS	34
1.7.1. Rocas ígneas.	35
1.7.2. Rocas sedimentarias.....	35
1.7.3. Rocas metamórficas.....	36

1.8. GEOLOGÍA COLOMBIANA.....	37
1.8.1. Estratigrafía en las cordilleras Colombinas	40
2. CAPITULO 2 - GENERALIDADES EN TÚNELES VIALES.....	43
2.1. GEOMETRÍA DEL PROYECTO.....	43
2.1.1. Diseño geométrico.....	44
2.4. NORMATIVIDAD.....	45
2.4.1. Recomendaciones de normatividades para Colombia	48
2.5. ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE UN TÚNEL.....	49
2.6. HISTORIA EN LA CONSTRUCCION DE TUNELES.....	53
2.7. PROCESOS Y MÉTODOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES ...	55
VIALES.....	55
2.7.1. Clasificación de macizos rocosos.....	56
2.7.2. Clasificación de la roca intacta.....	58
2.7.3. Índice de calidad de las rocas, RQD - “rock quality designation”.	59
2.7.4. Clasificación de Bieniawsky – RMR - (1.984).....	60
2.8. CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN ROCA – MAQUINARIA.....	62
2.8.1. MÁQUINAS DE EXCAVACIÓN.....	62
2.9. PERFORACIÓN Y VOLADURA.....	69
2.9.1. Esquema de tiro o malla de perforación.....	69
2.9.2. Perforación.....	72
2.9.3. Carga de explosivos.....	76
2.9.4. Voladura.....	78
2.9.5. Retirada de escombros y saneo del frente, bóveda y hastiales.....	78
2.10. NUEVO MÉTODO AUSTRIACO - (N.A.T.M.).....	79
2.11. SISTEMAS DE SOPORTE Y REVESTIMIENTO.....	81
2.11.1. Cerchas y arcos metálicos.....	82
2.11.2. Pernos.....	83
2.11.3. Concreto lanzado.....	84
2.11.4. Mallas metálicas.....	85
2.12. CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN MATERIALES BLANDOS.....	86

2.12.1. Métodos tradicionales.	87
2.12.2. Máquinas para terrenos blandos.	89
2.12.3. Fases de excavación.....	91
3. CAPÍTULO 3 – ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE TÚNELES VIALES EN COLOMBIA	93
3.1. EVOLUCIÓN DE TÚNELES EN COLOMBIA.	93
3.1.1. Siglos XVI – XIX.....	93
3.1.2. Periodo entre 1.910 y 1.930.	94
3.1.3. Periodo entre 1.930 y 1.950.	95
3.1.4. Periodo entre 1.950 y 1.970.	96
3.1.5. Periodo entre 1.970 y 1.990.	96
3.1.6. Periodo entre 1.990 y 2.000.	98
3.1.7. Siglo XXI.	100
3.2. TÚNELES EN COLOMBIA	103
3.3 MAPA DE TÚNELES VIALES EN COLOMBIA.....	115
3.4. FUTURO DE TÚNELES EN COLOMBIA (ETAPA DE CONCEPCIÓN, DISEÑO O PRE CONSTRUCCIÓN).	119
4. CAPÍTULO 4 - TÚNEL DE LA LÍNEA.....	120
4.1. HISTORIA.....	122
4.2. ESTUDIOS Y DISEÑOS	129
4.3. INFORME DE OBRA –TÚNEL DE LA LÍNEA.....	131
4.3.1. MÓDULO 1: TÚNEL DEL SEGUNDO CENTENARIO, sentido Calarcá - Cajamarca.....	131
4.3.2. MÓDULO 2: SEGUNDA CALZADA DEL TOLIMA	134
4.5. AVANCE DE OBRA.	136
4.2. IMPREVISTOS.	140
ANEXO 1.....	145
ANEXO 2.....	147
ANEXO 3.....	149
REFERENCIAS.....	150

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Escala del tiempo geológico relativo, Tarbuck y Lutgens, 2.005. _____	27
Tabla 2 Rocas metamórficas. Escobar, 2.014. _____	36
Tabla 3 Estratigrafía, Montes et al, 2.015 _____	38
Tabla 4 Estratigrafía, Montes et al, 2.015 _____	39
Tabla 5 Estratigrafía, Montes et al, 2.015 _____	40
Tabla 6 Estratigrafía en la Cordillera Occidental, Montes et al, 2.015. _____	41
Tabla 7 Estratigrafía en la Cordillera Central, Montes et al, 2.015. _____	41
Tabla 8 Estratigrafía en la Cordillera Oriental, Montes et al, 2.015. _____	42
Tabla 9 Consideraciones para el diseño geométrico. Modificado de López, 1.997. _____	45
Tabla 10 Pendientes máximas. Normatividad P.I.A.R.C., Ardila, 2.010. _____	48
Tabla 11 Recomendaciones geométricas. Normatividad P.I.A.R.C., Ardila, 2.010. _____	48
Tabla 12 Normatividad PIARC. Normatividad P.I.A.R.C., Ardila, 2.010. _____	49
Tabla 13 Secciones transversales y procedimientos constructivos habituales, PIARC, 2.015. _____	51
Tabla 14 Primeros túneles a nivel mundial. Modificado de López, 1.997. _____	54
Tabla 15 Clasificación de la construcción de túneles. Modificado de López, 1.997. _____	56
Tabla 16, propiedades del comportamiento mecánico de un macizo rocoso, Bersilli, 2.015. _____	56
Tabla 17 Clasificación de la roca intacta. González de vallejo, 2.002. _____	58
Tabla 18 Clasificación de la roca – RQD, González de vallejo, 2.002. _____	59
Tabla 19 Categoría de clasificación Geomecanica según Bieniawski, López, 1.997. _____	60
Tabla 20 Propuesta de maquinaria según resistencia de rocas. Modificado de González de vallejo, 2.002. _____	61
Tabla 21 Pérdidas en detonación. Modificado de Villagary, 2.014. _____	76
Tabla 22 Métodos tradicionales de excavación en túneles. Modificado de López, 1.997. _____	87
Tabla 23 Listado de los túneles de la carretera Guateque - Santa maría, SERVICIOS DE INGENIERÍA LTDA (2.010) _____	97
Tabla 24 Descripción de los túneles Bijagual y Buenavista. Modificado de Amaris y Mayorga, 2.008. _____	99

Tabla 25 Descripción del túnel Boquerón. Modificado de Amaris y Mayorga, 2.008.	100
Tabla 26 Túneles construidos antes del 2.002. Modificado de INVIAS, 2.007. _	104
Tabla 27 Túneles construidos a partir del año 2.002. Modificado de INVIAS, 2.007.	105
Tabla 28 Modificado de INVIAS, 2.009. _____	106
Tabla 29 Descripción de túneles viales en las décadas de 1.970 y 1.980. Modificado de: (ver columna – FUENTE). _____	108
Tabla 30 Descripción de la trayectoria de túneles viales en Colombia. Modificado de Ardila, 2.010. _____	110
Tabla 31 Túneles viales en la década de 1.990. Modificado de Puerto, 2.009. _	111
Tabla 32 Túneles viales de la década de 1.990. Modificado de las Referencias: (ver columna – Descripción, Fuente) _____	112
Tabla 33 Túneles viales en Colombia después del año 2.000. Modificado de las Referencias: (ver columna – Descripción, Fuente). _____	114
Tabla 34 Túneles posteriores al año 2.009. Modificado de SALASAR, 2.009. __	115
Tabla 35 Túneles en construcción, proyectados y construidos del 2.009 – 2.015.	117
Tabla 36 Túneles en construcción, proyectados y construidos del 2.009 – 2.015.	117
Tabla 37 Futuro de túneles en Colombia, la tabla de transcribió de la original. Modificado de Ardila, 2.010. _____	119
Tabla 38 Excavaciones correspondientes al túnel segundo centenario, ver Fuente.	126
Tabla 39 Listado de túneles cortos – módulo 2 y 3, modificado de CÁMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA, 2.011. _____	130
Tabla 40 Túneles cortos – Módulo 2, CÁMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA, 2.012. _____	135
Tabla 41 Galerías del Túnel Segundo Centenario, INVIAS, 2.014. _____	137
Tabla 42 Avances de la segunda calzada Calarcá - Cajamarca, modificado de INVIAS, 2.014. _____	138

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1 Relieve Colombiano, Cordilleras, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2.015.	15
Figura 2 Regiones Colombianas. Modificado de Regiones de Colombia, 2.015.	16
Figura 3 Corte al interior de la Tierra, Gálvez, 2014	20
Figura 4 Convección del manto, Tarbuck y Lutgens, 2.005.	21
Figura 5 Astenósfera, Tarbuck y Lutgens, 2.005.	21
Figura 6 Placas tectónicas de la Tierra, Tarbuck y Lutgens, 2005	23
Figura 7 Borde divergente, Tarbuck y Lutgens, 2.005.	24
Figura 8 Borde convergente, Tarbuck y Lutgens, 2.005.	24
Figura 9 Borde transformante, Tarbuck y Lutgens, 2.005.	25
Figura 10 Evolución de la tectónica del territorio Colombiano, A) Durante el Mioceno Superior. B) Durante el Plioceno Superior. Vargas, et al. 2.002.	28
Figura 11 Cordillera Central. Sierra et al, 2.013.	31
Figura 12 Cordillera Oriental. Sierra et al, 2.013.	32
Figura 13 Cordillera Occidental. Sierra et al, 2.013.	33
Figura 14 Cuaternario. Sierra et al, 2.013.	34
Figura 15 Mapa actual de la geología Colombiana, Montes et al, 2015	37
Figura 16 Tipos de secciones de túneles, Guzmán, 2.009.	51
Figura 17 Elementos que componen un túnel. Barqueros, 2.009.	52
Figura 18 partes de un portal para un túnel, normatividad PIARC, 1995.	53
Figura 19 Clasificación de los terrenos respecto a excavaciones mecánicas. González de vallejo, 2.002.	61
Figura 20 Máquinas rozadoras. Modificado de Torija, 2.012.	62
Figura 21 Rozadora MT 520, direct industry, 2.015	63
Figura 22 Esquema de maquina topo (TBM). González, 2.010.	64
Figura 23 TBM utilizada en los Andes Peruanos. Desiree, 2.012.	65
Figura 24 Dovelas. Mendoza, 2.012.	66
Figura 25 Martillo de impacto. Catalogo – CAT, M317D2, 2.015.	67
Figura 26 especificaciones técnicas, M317D2, 2.015.	68
Figura 27 Esquema de tiro. Rojas, 2.009.	70
Figura 28 Zonas de detonación. Rojas, 2.009.	70
Figura 29 Tipos de cueles. Sena, 2.013.	71
Figura 30 Martillo manual. BOHÓRQUEZ, 2013.	73

Figura 31 Jumbo. Catálogo - Direct Industry, 2.015.	73
Figura 32 Brocas de perforación, manguitos y barrenos o culatas. Modificado del Catálogo – KRHAM, 2.015.	76
Figura 33 Consumo específico de explosivos. Rojas, 2.009.	78
Figura 34 Curva de confinamiento. Abando, 2.015.	80
Figura 35 Interacción túnel-sostenimiento. Abando, 2.015.	81
Figura 36 Arcos. TEDENSA, 2.015.	83
Figura 37 Pernos. Catalogo - Garibaldi S.A., 2.015.	84
Figura 38 Concreto lanzado, Ochoa, 2.014.	85
Figura 39 Mallas electro soldadas. Frutos, 2.015.	86
Figura 40 Métodos tradicional para terrenos blandos. López, 1.997.	88
Figura 41 Sistemas de sostenimiento en método tradicional. Modificado de Reyes, 2011.	88
Figura 42 Proceso del método tradicional. Modificado de Reyes, 2011.	89
Figura 43 TBM – Hidroescudo. Bohórquez Néstor, 2.013.	90
Figura 44 TBM- Balance de Presión de Tierras Cerrado (EPB). Bohórquez, 2.013.	90
Figura 45 Tipo Excavación Mecánica Abierto. Bohórquez Néstor, 2.013.	91
Figura 46 Fases de excavación. Modificado de Reyes, 2.011.	92
Figura 47 Desarrollo de la construcción de túneles viales en Colombia. Modificado de Pérez, 2.011.	107
Figura 48 Desarrollo de túneles viales en Colombia. Modificado de Ardila, 2.010.	109
Figura 49 Desarrollo de túneles viales en Colombia. Modificado de Ardila, 2.010.	110
Figura 50 Túneles viales de carretera en Colombia. Modificado de Ardila y Rodríguez, 2.013.	113
Figura 51 Ubicación de túneles en mapa de Colombia, Modificado de Salazar, 2.009.	118
Figura 52 Mapa de Colombia, corredor Bogotá – Buenaventura, modificado, WIKIPEDIA, 2.015.	121
Figura 53 Características de altimetría, temperatura y distancia entre Bogotá y Manizales, Construcción Panamericana CPA, 2.012.	124
Figura 54 Reinicio de construcción de túnel de la línea, método de perforación, INVIAS, 2.015.	128
Figura 55 Esquemas del túnel, Consorcio DIS S.A. – EDL Ltda.	132
Figura 56 Esquema del túnel Segundo Centenario, Cámara Colombiana de la infraestructura, 2.011.	133

Figura 57 Frentes Quindío y Tolima – Túnel Segundo Centenario, Cámara Colombiana de la infraestructura, 2.011.	134
Figura 58 Instalación de pernos radiales - Galería No 8 hacia Tolima, INVIAS 2.012.	135
Figura 59 Construcción del Túnel RCN, Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2.011.	136
Figura 60 Avances en túneles del Segundo Centenario y segunda calzada Calarcá – Cajamarca, modificado de INVIAS, 2.014.	137
Figura 61 Construcción de arcos en túnel de la línea, recubrimiento, INVIAS, 2.015.	139

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Contribuir al conocimiento sobre la construcción de túneles viales en Colombia considerando la geología, evolución y avances tecnológicos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir la topografía y geología Colombiana para conocer los principales parámetros al emplear túneles viales.
- Elaborar un estado del arte de la historia en la construcción de túneles viales en Colombia.
- Identificar las características y la funcionalidad de los diferentes tipos de túneles viales.
- Describir los proyectos a futuro en la construcción de túneles viales que garanticen la circulación vehicular.

INTRODUCCIÓN

Los túneles carreteros en el mundo, son una de las alternativas de construcción que ha tenido más impulso en los últimos años en países con miras al desarrollo comercial y económico, para salvar las dificultades de tipo topográfico y geológico encontrados en los diferentes proyectos. En Colombia, el amplio crecimiento en el número de metros diseñados y contratados para obras subterráneas ha sido de gran aporte para mejorar muchas regiones económicamente, ubicando al país entre los líderes de la región que más trabajan en este tipo de desarrollos viales como son: Argentina, Brasil, Costa Rica, Ecuador, México, Panamá y Perú.

Según el congreso Latinoamericano de túneles (2014) es interesante observar que, en función de sus condiciones locales y necesidades específicas, Latinoamérica presenta proyectos que han utilizado métodos modernos de construcción. Se destaca el uso masivo de excavación convencional en roca (como también en suelo), además de un gran y creciente número de proyectos que hacen uso de excavación mecanizada, ya sea mediante el uso de (*Tunnel Boring Machine*) TBM para roca, EPBM para diversos tipos de suelos, máquinas con frente abierto y equipos híbridos para suelo y roca, pasando por equipos de micro – túneles, de hincado de tubos (*“pipe-jacking”*) y para minería subterránea (*raise-borer*). Además, también se identifican los primeros proyectos de túneles sumergidos, planificados en la región, para el cruce de ríos y bahías marítimas.

Según el Instituto Nacional de Vías, INVIAS (2000), entre el 2002 y el 2015 la longitud total de túneles viales en Colombia habrá crecido en un 440%. Hasta el 2002 Colombia tenía 18.537 metros en 33 túneles construidos en las vías Buenaventura - Buga, Pasto - Mojarras, Bogotá - Santa María, Bogotá - Villavicencio, Altamira - Florencia, Irra - La Felisa, Debeiba - Mutata, Medellín – Puerto Triunfo y Medellín - Santa fe de Antioquia. De estos 33 túneles se

destacaban 5 en la vía a Buenaventura, 5 en la vía a Villavicencio, y los de la vía Guateque - El Secreto.

INVIAS (2002) informa que tras varios mega proyectos, se han excavado 9 túneles con una longitud total de 19.546 metros, cabe destacar el túnel de Occidente, el túnel de Sumapaz, y con los proyectos ya contratados el país alcanzará un total de 78.550 metros en 72 túneles carreteros.

La programación de estas obras estableció que para el 2015 se estarían dando al servicio los últimos túneles que se construían en el 2002, logrando de esta forma consolidar la estrategia con la que se busca reducir los tiempos de viaje, costos de operación y brindando comodidad a los usuarios, obviando en parte los problemas de estabilidad en terrenos montañosos que predominan en las carreteras nacionales y que en materia económica, ampliará las posibilidades al país para ser más competitivo de cara a los acuerdos comerciales que se han firmado especialmente con Europa, Estados Unidos y algunos países Asiáticos.

Este estudio pretende realizar una revisión bibliográfica histórica a nivel nacional, con respecto a los avances en tecnología de punta, en los procesos constructivos de calidad, técnicas de última generación y sistemas operacionales viales eficientes en la construcción de túneles viales; que ayuden al país a ser más competitivo, futurista y pueda colocarse a nivel de cualquier país del mundo en la construcción de infraestructura vial, integrando la economía en desarrollo para Colombia.

Teniendo en cuenta el incremento de la tasa de cambio representativa del mercado TRM, los bajos precios en el petróleo, además de circunstancias relacionadas con exportaciones - importaciones y las relaciones entre países. Todo lo anterior conlleva a que los dineros predestinados a proyectos como: construcción vial, represas, túneles, acueductos, instalaciones educativas y demás obras que aunque son de gran prioridad para el desarrollo de la nación, se

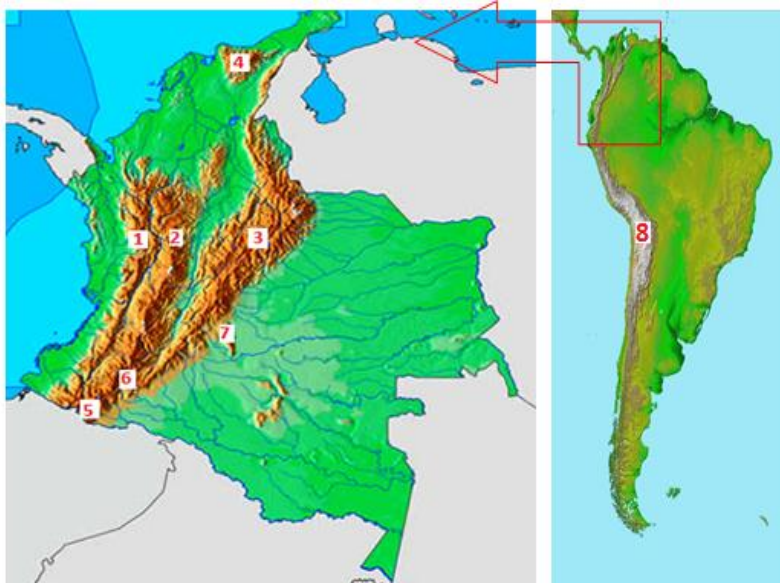
asuman en primera instancia las necesidades básicas como la salud, la educación y subsidios de vivienda entre otros; Actualmente por motivos de corrupción y malos manejos administrativos además del abandono de las obras y la falta de mantenimiento de las mismas, hacen que muchas veces esta labor sea innecesaria dado el mal estado de las obras, lo anterior comentado conlleva a que parte del dinero destinado al crecimiento de la construcción queda en reconstruir muchas de estas obras abandonadas y se dejan de ejecutar proyectos que actualmente deberían estar ya realizados.

1. CAPÍTULO 1 - EVOLUCIÓN GEOLÓGICA COLOMBIANA.

Colombia está ubicado en el noroeste del Continente Sur Americano sobre la línea Ecuatorial, limita con los Océanos Atlántico y Pacifico hacia el norte y occidente correspondientemente. La topografía de la Región Andina está formada por tres cordilleras que se extienden desde el Nudo de los Pastos donde la Cordillera de los Andes entra en Colombia por el suroeste del territorio y se divide en dos ramificaciones: la Cordillera Occidental y la Cordillera Central. En el llamado Macizo Colombiano o Nudo de Almaguer, la Cordillera Central se divide, dando origen a la Cordillera Oriental. También sobresalen zonas territoriales en Colombia como los Llanos Orientales, la Región Caribe y la Región Pacífica descritas a continuación:

Los Andes atraviesa todo el costado oeste de Sur América, (ver Figura 1) cruzando por Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina con un total de 7.500 km.

Figura 1 Relieve Colombiano, Cordilleras, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2.015.



1. Cordillera Occidental; 2. Cordillera Central; 3. Cordillera Oriental; 4. Sierra Nevada de Santa Marta
5. Nudo de los Pastos; 6. Macizo Colombiano; 7. Sierra La Macarena 8. Los Andes

El país cuenta con seis regiones, divididas de la siguiente manera y asignadas por las características que presentan en el relieve (ver Figura 2):

Figura 2 Regiones Colombianas. Modificado de Regiones de Colombia, 2.015.



Martínez (2.005) hace una descripción de las regiones Colombianas de la siguiente manera:

1.1. REGIONES COLOMBIANAS.

1.1.1. Región Andina.

En esta zona territorial del país se encuentran grandes extensiones montañosas y volcanes que alcanzan los 5.500 m. Los Andes se ramifican al sur de Colombia en tres cordilleras: Oriental, Central y Occidental. Entre ellas corren los ríos Magdalena y Cauca. Tiene una amplia diversidad climática, ocasionada por la altura sobre el nivel del mar, generando los llamados pisos térmicos, los cuales le proporcionan a la región diferentes niveles de humedad, radiación solar y temperatura.

Esta región presenta la principal actividad sísmica del país y alberga la mayor parte de la población nacional, asentada en los principales centros económicos y urbanos. Las siguientes ciudades están en esta región: Bogotá, Medellín, Cali, Bucaramanga, Cúcuta, Manizales, Pereira, Armenia, Ibagué, Neiva, Popayán, Pasto y Tunja.

1.1.2. Región del Caribe.

Es una región plana a excepción de la Sierra Nevada de Santa Marta, ubicada al norte del país, con alturas de 5.700 m y una extensa zona montañosa con una gran diversidad climática, fauna y flora, en donde se encuentran los picos más altos del país.

1.1.3. Región de la Orinoquia – Llanos Orientales.

Está formada por extensas sabanas regadas por las diferentes afluentes que confluyen al río Orinoco, la actividad económica es la explotación petrolera de Arauca, Casanare y Meta que representan la fuente principal de exportaciones e ingresos de la economía nacional y han propiciado el desarrollo de la infraestructura vial y de servicios de estos departamentos.

1.1.4. Región de la Amazonía.

Es una región de relieve plano, con altas precipitación (lluvias) y temperaturas; está conformada por selvas de clima cálido tropical que contienen una gran biodiversidad.

1.1.5. Región Pacífica.

Esta región se encuentra entre el Golfo de Urabá en la frontera con Panamá hasta la frontera con Ecuador en el departamento de Nariño y limita con la Cordillera Occidental. Esta región se caracteriza por su alta humedad, con extensas zonas de manglares y pantanos. La precipitación pluvial es de las más altas del mundo, con un promedio de 4.000 mm anuales.

1.1.6. Región Insular.

Corresponde a las islas con las que cuenta el país, denominadas continentales y oceánicas de acuerdo a su posición y origen.

1.2. MOVIMIENTOS DE LA CORTEZA TERRESTRE.

Según Wegener (2.009) pionero de la Teoría de la derivada continental explica que la corteza terrestre era un solo continente (súper continente- Pangea). Por el motivo de considerar que encajaban las formas de los continentes, afirmándolo en estudios por el parecido de la fauna, rocas, fósiles y cordilleras de la misma edad de los continentes comparados, sus teorías se vieron rechazadas durante un tiempo pero fueron incluidas en la teoría de placas en el año de 1.960 a partir de investigaciones realizadas por diferentes personajes, allí se comenta que el desplazamiento sucede desde hace millones de años gracias a la convección global en el manto (exceptuando la parte superior rígida que forma parte de la litosfera), de la que depende que la litosfera sea reconfigurada y desplazada permanentemente. También se explica que la corteza terrestre está compuesta por una serie de placas individuales, formadas por cambios y procesos que han tomado millones de años, y que aún continúan. Los movimientos de las placas son las responsables de la formación de cordilleras, volcanes, montañas, cuencas oceánicas, islas y la generación de terremotos.

Para conocer mejor estos procesos de formación y movimientos, es necesario saber las características al interior de la Tierra.

La Figura 3 establece las diferentes capas terrestres y la profundidad a la que estas se encuentran, en ellas se producen diferentes tipos de sucesos que se reflejan de diferentes maneras en la superficie y que se describirán a continuación:

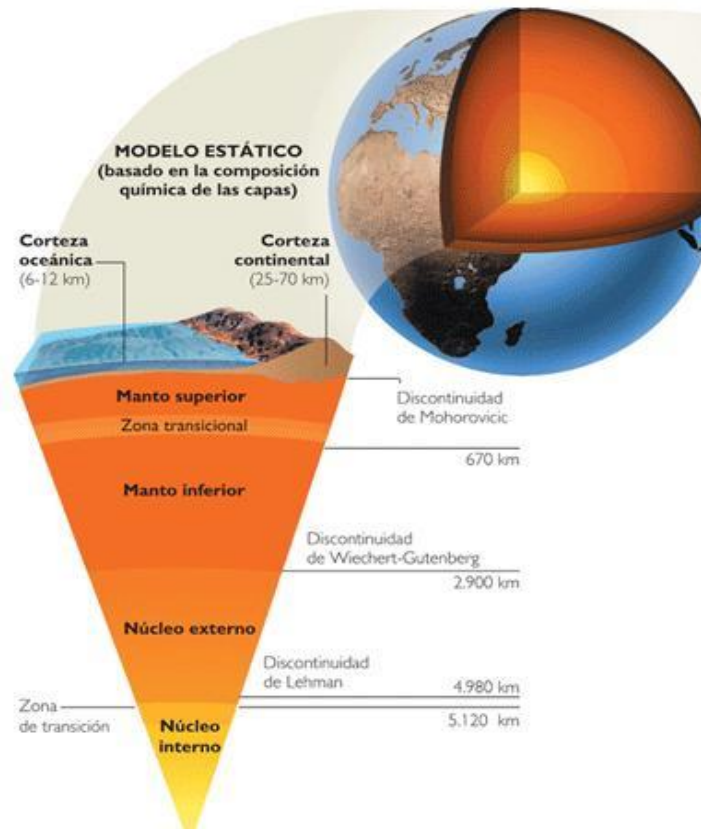
Núcleo: Es la región interna de la Tierra, tiene una temperatura de 6.000°C, posee un radio aproximadamente de 3.480 km y está formado principalmente por hierro y níquel. El núcleo se encuentra dividido en dos partes, un núcleo interno que es sólido compuesto por aleaciones de hierro y níquel que permanece en un constante proceso de rotación y actúa como un estabilizador del campo magnético generado por el líquido que lo envuelve. El núcleo externo es una capa líquida (gel) formada por hierro y níquel, estos elementos son conductores de electricidad y circulan a gran velocidad en su parte externa, está situada entre el manto inferior y el núcleo interno. A causa de ello, se producen las corrientes eléctricas, que dan origen al campo magnético de la Tierra.

Manto: Se presenta en un estado sólido formado por un conjunto de rocas volcánicas – rocas periodísticas (silicatos de magnesio y hierro) que llegan a una profundidad aproximada de 2.900 km y una temperatura entre (1.200 y 2.800) °C. El manto se divide en dos capas el inferior compuesto por corrientes de convección debido a diferencias de densidad y temperatura; el manto superior está compuesto por una capa delgada de aspecto fluido viscoso que se sitúa entre los 70 y 250 kilómetros y recibe el nombre de Astenosfera cuya función es soportar las placas tectónicas.

Corteza: Es la capa de roca externa de la Tierra, se compone principalmente por rocas sólidas, ricas en silicio, se distingue una delgada corteza oceánica correspondiente a las formaciones de los océanos y una corteza continental compuesta por tres tipos de rocas: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Litósfera: Situada bajo la corteza y la parte más externa del manto, está formada por las placas tectónicas que se desplazan lentamente sobre la Astenosfera, al tener un comportamiento rígido presenta fragilidad.

Figura 3 Corte al interior de la Tierra, Gálvez, 2014



La Astenosfera es la zona bajo la Litosfera y sobre la Mesósfera, esta aproximadamente entre 250 y 660 kilómetros de profundidad. Compuesta por materiales silicatados dúctiles, en estado sólido y semifundidos parcial o totalmente, que permiten la deriva continental y la isostasia. Sobre ella se mueven las placas tectónicas. En regiones bajo la corteza las rocas están parcialmente fundidas desarrollándose procesos convectivos como consecuencia de la aparición de anomalías térmicas- puntos calientes que determinan un movimiento que desplaza las capas Litosféricas propiciando la aparición de Rift y de zonas de subducción, bordes constructivos y destructivos, respectivamente. Bajo las dorsales oceánicas el material del manto asciende y da lugar a la aparición de un volcanismo cuyos productos forman nueva corteza que se expande lateralmente – expansión oceánica a expensas del movimiento convectivo de las rocas fundidas. (Ver Figuras 4 y 5)

Figura 4 Convección del manto, Tarbuck y Lutgens, 2.005.

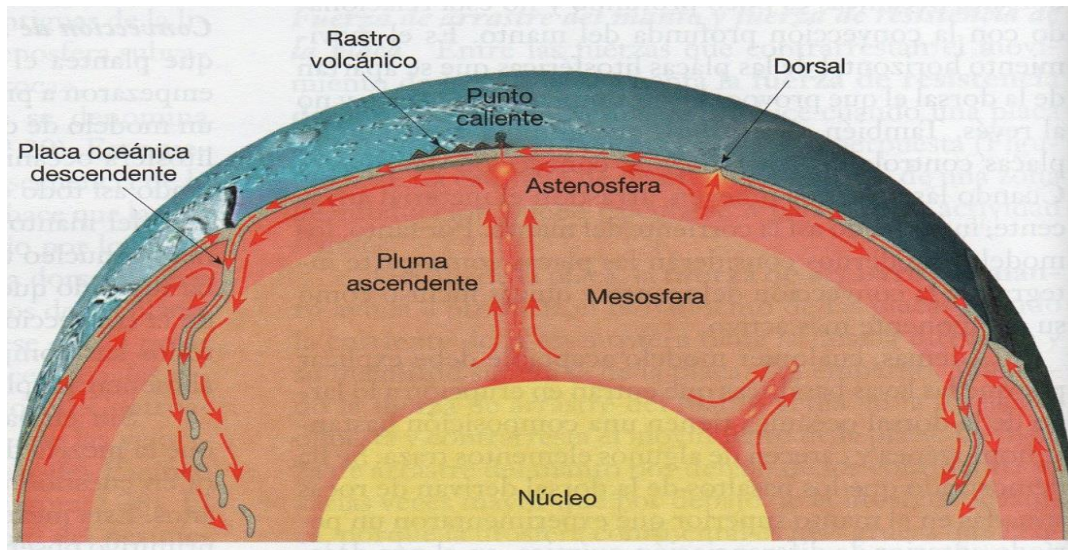


Figura 5 Astenósfera, Tarbuck y Lutgens, 2.005.



1.3. PLACAS TECTÓNICAS.

Las placas principales son: Placa Sudamericana, Placa Norteamericana, Placa Euroasiática, Placa Indo Australiana, Placa Africana, Placa Antártica, Placa Pacífica y las placas de menor tamaño o placas secundarias son: Placa de Cocos, Placa de Nazca, Placa Filipina, Placa Árabe, Placa Escocesa, Placa Juan de Fuca, Placa de Caribe. (Ver Figura 6)

Tarbuck y Lutgens (2.005) detalla que los volcanes de la Cordillera de los Andes son el producto del magma generado por la subducción de la Placa Nazca por

debajo del continente Suramericano. Al igual que las montañas que se producen en parte por la actividad volcánica asociada con la subducción de la Litosfera oceánica, se determinan arcos volcánicos continentales.

La tectónica de placas puede definirse como una teoría compuesta por una gran variedad de ideas que explican el movimiento observado de la corteza de la Tierra por medio de los mecanismos de subducción y de expansión del fondo oceánico, que, a su vez, generan los principales rasgos geológico de la Tierra, entre ellos los continentes, las montañas y las cuencas oceánicas. Las implicaciones de la tectónica de placas son de tanto alcance que esta teoría se ha convertido en la base sobre la que se consideran la mayoría de los procesos geológicos.

La tectónica de placas es de gran importancia para conocer las zonas en donde se presentan deformaciones (separación - expansión del fondo marino, colisionan – formación de montañas, deslizamiento una sobre otra – zonas de subducción, en el que las placas sufren destrucción y fusión y se desplazan lateralmente), Colombia se encuentra sobre las placas Sudamericana, Nazca y Caribe (ver Figura 6), la interacción de estas placas genera zonas de alta sismicidad correspondiente al sector occidente y centro (Región del Pacífico, Andina y Caribe) del país, en esta zona están las Cordilleras Occidental y Central en las que se proyectan varias obras subterráneas y viales. Por lo cual se deben de realizar estudios más rigurosos para este sector en función de la sismicidad.

Figura 6 Placas tectónicas de la Tierra, Tarbuck y Lutgens, 2005



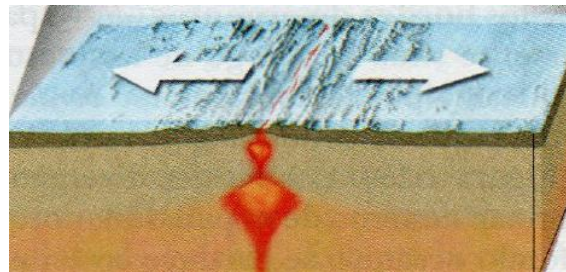
1.4. INTERACCIÓN DE PLACAS

Las placas pueden colisionar o presentar separación entre ellas ocasionando deformaciones que dependen del tipo de interacción que presenten, como:

1.4.1. Expansión del Suelo Marino.

La expansión del fondo oceánico se da por el movimiento de dos placas oceánicas alejándose una de la otra, lo que produce nueva corteza oceánica (magma que viene desde el manto de la Tierra), a lo largo de la dorsal oceánica. A este proceso se le da el nombre de zona de divergencia. (Ver Figura 7)

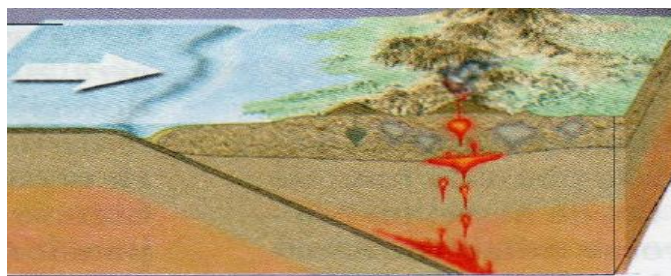
Figura 7 Borde divergente, Tarbuck y Lutgens, 2.005.



1.4.2. Límites convergentes.

Se presenta cuando una de las placas se introduce bajo la otra, lo que es denominado subducción. Hay tres tipos de bordes convergentes: oceánica – continental, oceánica – oceánica y continental – continental. Estas interacciones dan forma a cadenas de montañas, un arco volcánico, una fosa o pueden generarse formación de volcanes submarinos - isla volcánica (Ver Figura 8)

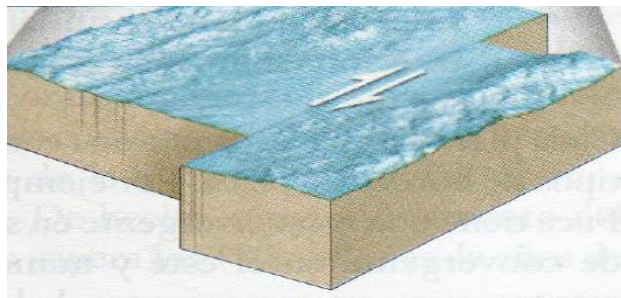
Figura 8 Borde convergente, Tarbuck y Lutgens, 2.005.



1.4.3. Límites Falla - Transformante

Se presentan cuando dos placas se mueven lateralmente una contra la otra, generándose una enorme cantidad de fricción que hace el movimiento desigual, y genere un aumento de presión hasta niveles increíbles. Cuando la presión es liberada y las placas repentinamente se mueven separadamente, se trata de un terremoto. La mayoría de fallas - transformantes se encuentran en el fondo oceánico. (Ver Figura 9)

Figura 9 Borde transformante, Tarbuck y Lutgens, 2.005.



1.5. ELEVACIÓN DE LAS CORDILLERAS DE COLOMBIA.

Sierra, et al. (2013) describen el proceso de formación de las cordilleras del país y su ubicación en una escala de tiempo geológico en que se generaron estas formaciones, para ello es fundamental saber conceptos como:

Orogenia: Es el proceso mediante el cual las fuerzas de las placas tienen como consecuencia la formación de montañas.

Escala del tiempo geológico relativo: El asignar una época a un acontecimiento con bastante exactitud fue posible hasta el año de 1.905 por primera vez, mediante la radiactividad que fue descubierta en 1.896 por Henri Becquerel, a través de este proceso se elabora una tabla que representa el tiempo en millones de años en diferentes eras, estos datos son procedentes de la Sociedad Geológica de América. (Ver Tabla 1)

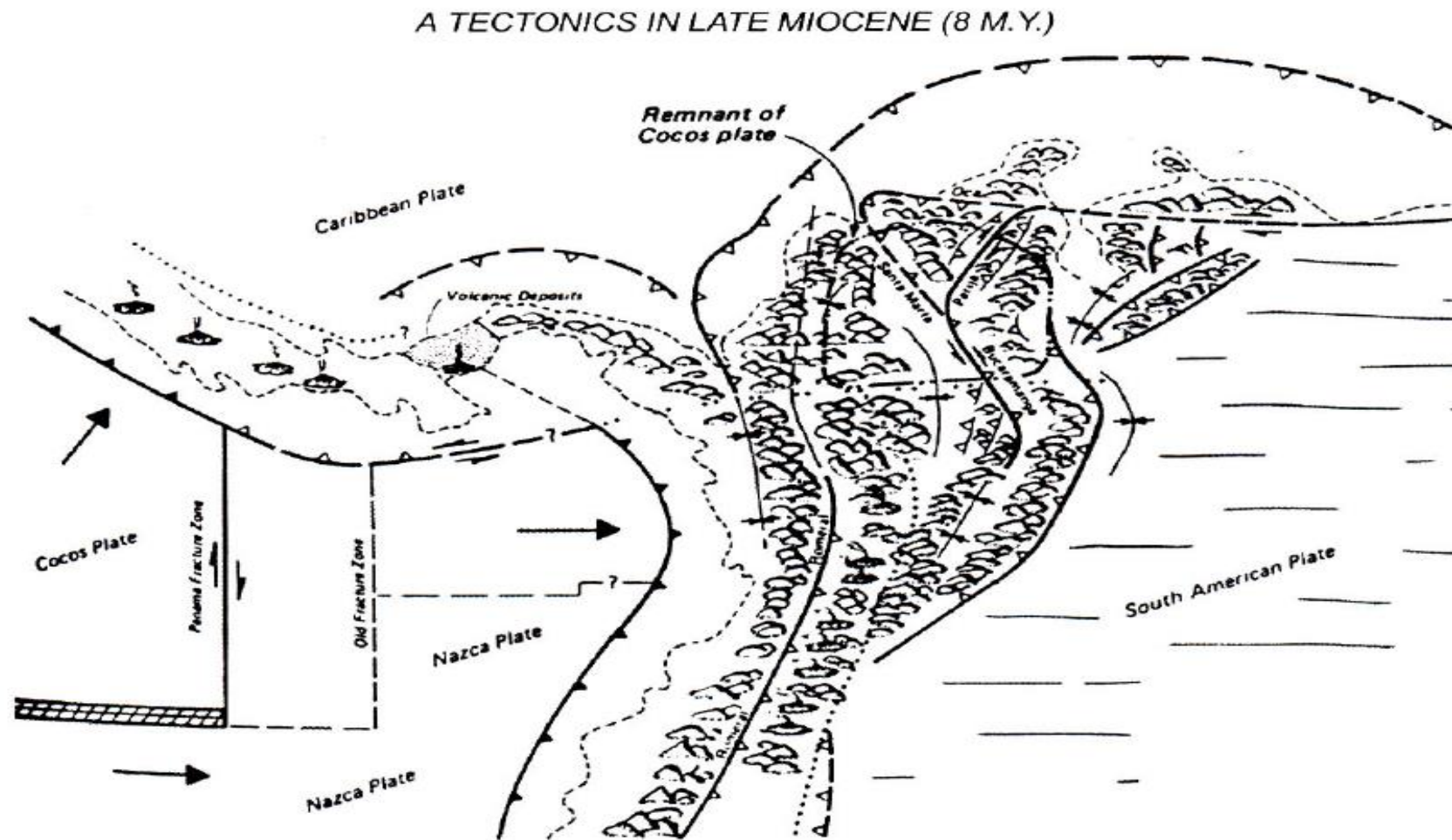
La Tierra ha sufrido tres orogenias en el tiempo geológico, la primera (Caledoniana) fue hace 300 millones de años donde se formaron los Montes Escandinavos y de Escocia, cadenas bajas de Canadá, norte de Asia y Australia, la segunda (Hercínica o Varisca) hace 220 millones de años formó los Urales, parte de los Apalaches y otros macizos Europeos, aparte de otras formaciones se inició la de una cordillera pre – Andina que después se erosionó durante gran parte de la era Mesozoica.

La tercera orogenia (Andino-Alpino) es de gran importancia para esta investigación porque en ellas se genera la formación de los Andes y por ende las tres cordilleras en el país. Este hecho ocurrió en el Cretácico Medio y Superior; durante la era Cenozoica donde se levantaron de nuevo las Cordilleras Andinas, con dos grandes accidentes orogénicos, uno al comienzo y al final de esta era, y luego, tuvo más formaciones durante el Plioceno. (Ver Figura 10).

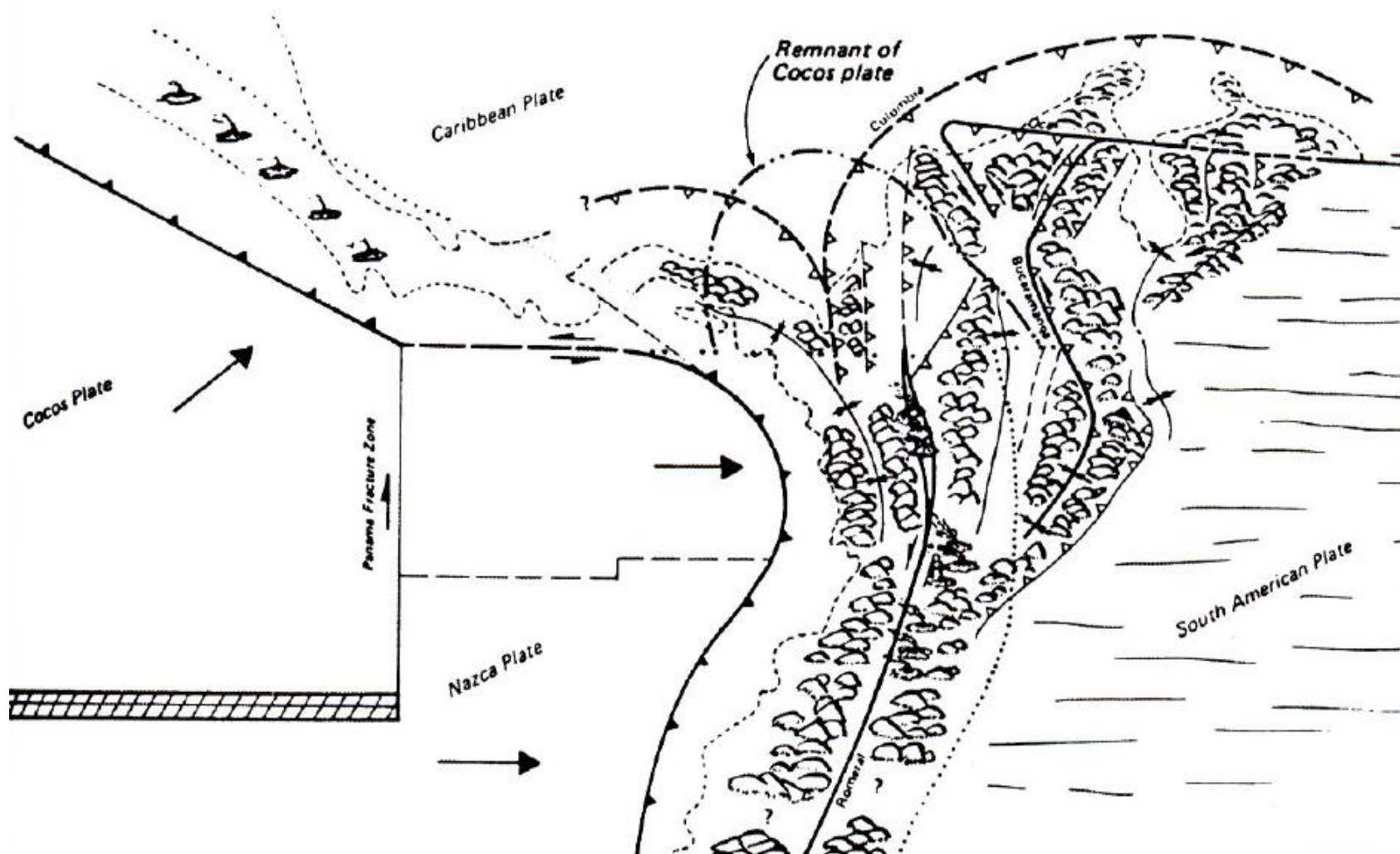
Tabla 1 Escala del tiempo geológico relativo, Tarbuck y Lutgens, 2.005.

Eón	Era	Período		Época	Desarrollo de plantas y animales	Espacio de tiempo relativo de la eras
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario		Holoceno	Desarrollo de los seres	Cenozoico
				Pleistoceno		Mesozoico
		Terciario		Pleistoceno		Paleozoico
				Plioceno	<<Edad de los mamífero>>	
				Mioceno		
				Oligoceno		
				Eoceno		
				Paleoceno		
	Mesozoico	Cretácico		<<Edad de los reptiles>>	Extinción de los dinosaurios y	Precámbrico
					Primeras plantas con flores	
		Jurásico	Primeras aves			
	Triásico	Dinosaurios dominantes				
	Paleozoico	Pérmico		<<Edad de los anfibios>>	Extinción de los trilobites y muchos otros animales marinos	
					Primeros reptiles	
		Grandes pantanos carboníferos				
		Carbonifero	Pensilvaniense	<<Edad de los peces>>	Anfibios abundantes	
			Misisipiense		Primeros insectos fósiles	
		Devónico	<<Edad de los peces>>			
				Peces dominantes		
Silúrico			Primeras plantas terrestres			
Ordovícico		<<Edad de los invertebrados>>	Primeros peces			
			Trilobites dominantes			
Primeros organismos con conchas						
Proterozoico		2500	Denominando colectivamente precámbrico, abarca alrededor del 88 por ciento de la escala de tiempo geológico			
Arcaico	3800					
Hádico			Origen de la Tierra			
			4500			

Figura 10 Evolución de la tectónica del territorio Colombiano, A) Durante el Mioceno Superior. B) Durante el Plioceno Superior. Vargas, et al. 2.002.



B TECTONICS IN LATE PLIOCENE (3 M.Y.)



1.6. ORIGEN DE LAS CORDILLERAS.

El conocer las características de las Cordilleras Colombianas es fundamental para este trabajo ya que la proyección de muchas obras relacionadas con túneles viales están proyectados para estos lugares, un ejemplo claro es el tan esperado Túnel de la Línea; cuyo objeto es recortar las distancias entre los departamentos de Tolima y Quindío cruzando la Cordillera Central (proyecto – “Corredor Bogotá – Buenaventura”) con la finalidad de beneficiar y optimizar el transporte en esos lugares.

1.6.1. Cordillera Central.

Sierra et al. (2013) describen que “La primer Cordillera Colombiana fue la Central formada en la era del Triásico – Jurásico (225-145 Ma), En aquel tiempo empieza a consolidarse apropiadamente, la cordillera sufre intensas erosiones subaéreas y se depositan abanicos aluviales en las llanuras de su borde oriental lo que genera la formación de Luisa del Tolima y Huila. Varias formaciones se generaron durante el Jurásico, período de actividad ígnea intrusiva y extrusiva: gruesas sucesiones de rocas sedimentarias continentales, con capas rojas de gravas y arenas, probablemente en ambientes desérticos crearon la Formación Mocoa en Putumayo, Saldaña en Tolima y Huila, La Quinta en la Serranía de Perijá, Guatapurí en Cesar y La Corual en la Guajira.” (Ver Figura 11)

La Cordillera Central está constituida por neises, anfibolitas, metasedimentitas y metavulcanitas de un complejo poli metamórfico que incluye eventos metamórficos de edad Precámbrica, Paleozoica y Mesozoica, intruido por batolitos y plutones Mesozoicos.

Figura 11 Cordillera Central. Sierra et al, 2.013.



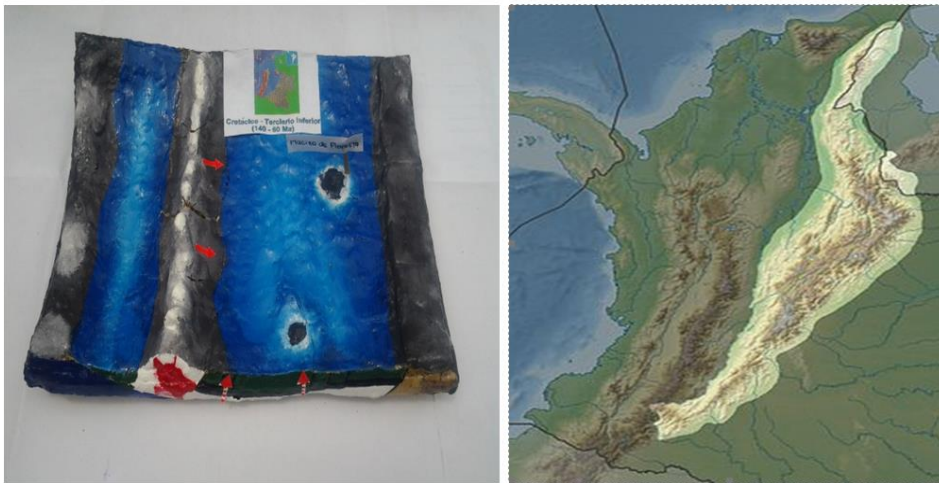
1.6.2. Cordillera Oriental.

Durante el Cretácico ocurre una nueva transgresión marina gracias a la apertura del Océano Atlántico Sur, que permite que el mar existente al oriente de la Cordillera Central fluya hasta el Putumayo por el sur. Este evento favorece la depositación en Cundinamarca y en Santander de sedimentos marinos. Por otro lado, en el Occidente de la Cordillera Central continuaba la sedimentación de mar abierto. El Cretácico es especialmente rico en fósiles: las amonitas, tan comunes en tantas partes de la Cordillera Oriental, como en Villeta, Cáqueza, Pacho, Villa de Leiva, Vélez, etc., y enormes reptiles, como los Plesiosaurios, encontrados en Villa de Leiva. La materia orgánica que se depositaba en las cuencas sedimentarias vendría a constituir con el tiempo, el petróleo y el gas que hoy se halla en los depósitos litificados del Valle Alto y Medio del Magdalena, la costa del Caribe, los Llanos Orientales y la Hoya del Catatumbo.

Según González et al. (1.998) entre los macizos de la zona están: Los Macizos de Garzón y de Quetame al sur, al norte de éste ocurre una bifurcación apareciendo

el valandino de la Sabana de Bogotá, que limita al norte con el Macizo de Santander y al este con el Macizo de Floresta. Se constituyen básicamente de rocas de tipo sedimentario, como las calizas, areniscas y arcillolitas. (Ver Figura 12)

Figura 12 Cordillera Oriental. Sierra et al, 2.013.



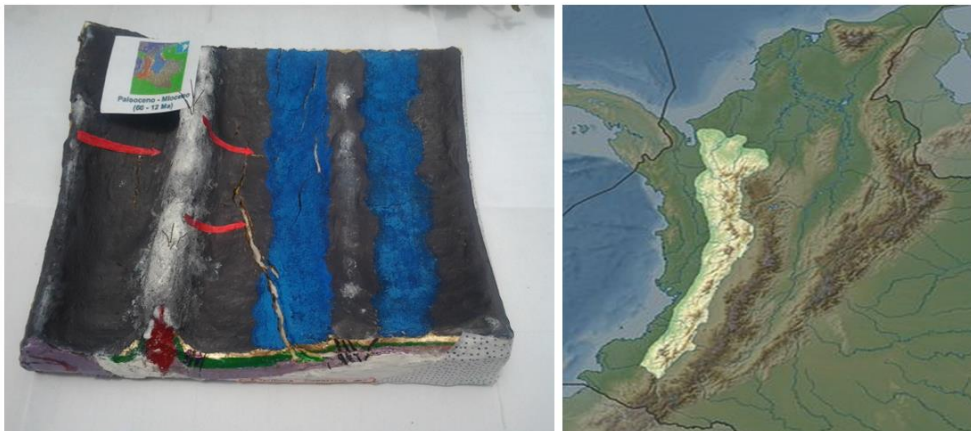
1.6.3. Cordillera Occidental

Durante el Paleoceno y Mioceno los mares se retiran, dando luz a la mayor parte del territorio en donde aún no había formación del río Magdalena. Al Occidente de la Cordillera Central, por los departamentos Cauca, Chocó, Córdoba, Sucre, Atlántico, Valle, Nariño, zonas bajas de Bolívar, Magdalena, Cesar y la Guajira, se conserva una franja gruesa de sedimentación marina, y el resto del país es continente con extensas zonas pantanosas (mares poco profundos rodeados por montañas). Es en estas zonas (ciénagas) donde se acumularon los restos vegetales entre arcillas y arenas que a través del tiempo geológico se convertirían en los depósitos de carbón mineral con los que hoy cuenta Colombia (Formaciones Guaduas, Cerrejón, Los Cuervos, entre otros). Este plegamiento da lugar a la formación de serranías anticlinales y valles sinclinales intermedios que condicionaron hoyas de drenaje, así como a la orogenia pre-Andina, plegando las estructuras, levantándolas por encima del nivel general de erosión y haciendo

desplazar las rocas más rígidas de la Cordillera Central. En este proceso nacen las fallas del Alto del Trigo, Bucaramanga, Santa Marta y se empieza a ver la elevación de la Cordillera Occidental, luego de que la Cordillera Oriental ha adquirido ya gran extensión. (Ver Figura 13)

Navas (2.003) indica que es importante mencionar que las tres cordilleras se hayan en un intenso estado de denudación, tanto de los sedimentos glaciales, como de las unidades estratigráficas con una alta tasa de sedimentación en las zonas bajas.

Figura 13 Cordillera Occidental. Sierra et al, 2.013.



El Cuaternario está caracterizado por la elevación de la Cordillera Andina hasta su altura actual. Hace aproximadamente un millón de años ocurrió el Pulso Orogénico Andino Tardío con un nuevo levantamiento y la reanudación de fuertes procesos erosivos. En este periodo ocurrió el recubrimiento de extensas regiones por glaciares continentales. En Colombia los glaciares de montaña tuvieron mucha mayor extensión que en la actualidad y eran periodos con gran actividad eruptiva en la Cordillera Central y en el sur de la Cordillera Occidental. En el momento se cuenta con 38 volcanes, de los cuales hay 12 activos. (Ver Figura 14)

Figura 14 Cuaternario. Sierra et al, 2.013.



Sierra et al. (2013) explica que la actividad tectónica de los Andes aún no ha cesado; de allí son los terremotos que periódicamente sacuden la costa pacífica de Sur América, el hundimiento de algunas regiones y el levantamiento de otras. El territorio Colombiano sufre los efectos de la colisión y movimiento de tres grandes placas de la corteza terrestre: la Placa de Nazca al occidente, la Placa Suramericana al oriente y la Placa Caribe al norte. Entre las dos primeras hay un par compresivo donde se encuentra la Microplaca Macondo con la cadena montañosa de los Andes. Las cordilleras se elevan lentamente a lo largo de grandes fallas activas que las bordean.

1.7. ROCAS

Tar buck y Lutgens (2.005) explican que las rocas están fuertemente influidas por los minerales que la componen. Además, la textura de una roca, es decir, el tamaño, la forma o la disposición de los minerales que la constituyen, también tiene un efecto significativo en su aspecto. La composición mineral y la textura de una roca, a su vez, son el reflejo de los procesos geológicos que la crearon.

Las rocas se encuentran clasificadas en tres tipos: rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, a continuación se explican cada una de ellas:

1.7.1. Rocas ígneas.

Son aquellas que se crean a partir del enfriamiento y la solidificación del magma o lava. Estas rocas pueden clasificarse según la velocidad de enfriamiento ya sea de manera lenta (miles de años) y reciben el nombre de intrusivas (plutónicas), algunos ejemplos de este tipo de rocas son: diorita, riolita, pórfido, el gabro, el basalto y el granito. Si el enfriamiento tiene lugar de manera superficial y muy rápida, se generan las rocas ígneas extrusivas (volcánicas). (Pueden aparecer después de la erupción de un volcán). Algunos ejemplos de este tipo de roca son: obsidiana, basalto y pumita.

Escobar (2.014) comenta que el 95% de la superficie de la corteza terrestre está compuesta por rocas ígneas y tan sólo 5% de rocas sedimentarias y metamórficas.

1.7.2. Rocas sedimentarias.

Escobar (2.014) expone que las rocas sedimentarias son formadas a partir de la acumulación de sedimentos tales como: rocas preexistentes de diferentes tamaños, minerales resistentes o restos de organismos sometidos durante mucho tiempo a procesos físicos y químicos, que genera como resultado materiales consolidados, proceso que es llamado diagénesis.

Las rocas sedimentarias se clasifican según el proceso en que se formaron:

1. **Detríticas o clásticas:** Formadas a partir de partículas que mantienen su integridad física durante el transporte. Las principales rocas clásticas son: conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas

2. **Químicas o no clásticas:** son formadas por la precipitación de sustancias que se encontraban en disolución. Algunos de estos ejemplos son: carbonatos, evaporitas, ferruginosas y fosfatos.
- **Caliza bioquímica:** formadas por actividad de organismos vivos. Algunos ejemplos de este tipo de rocas son: coquina, caliza fosilífera y creta.

1.7.3. Rocas metamórficas.

Las rocas metamórficas se generan a partir de rocas ígneas, sedimentarias o incluso otras rocas metamórficas a estas se les conoce como roca madre o base. El proceso de transformación de la roca madre a la roca metamórfica se conoce como metamorfismo (estado de transición).

Escobar (2.014) describe que el estado de transición está relacionado con intensos cambios de presión, temperatura y agentes químicos; los cambios están asociados a las fuerzas que pliegan, fallan capas, inyectan magma y elevan o deprimen masas de roca. Algunos de los ejemplos de estas transformaciones son (ver Tabla 2):

Tabla 2 Rocas metamórficas. Escobar, 2.014.

ROCA BASE	ESTADO DE TRANSICIÓN	ROCA METAMÓRFICA
Shale (lutita)	Metasedimentos	Pizarra, filita, esquisto, gneis
Arenisca	Metasedimentos	Cuarcita, hornfels
Caliza	Caliza Cristalina	Mármol
Basalto	Metavulcanita	Esquisto, anfibiolita
Granito	Intrusivo gnésico	Ortogneis
Carbones	Metasedimentos grafitosos	Esquistos grafitosos

1.8. GEOLOGÍA COLOMBIANA.

La geología del territorio colombiano está representada en la memoria explicativa del mapa geológico colombiano 2.015 (ver Figura 15), en él se explica la distribución de las rocas, los materiales superficiales no consolidados y las estructuras que los deforman. Algunas características tales como la edad y la composición de los materiales se evidencian en el mapa a través de colores, símbolos y texturas. (Ver Tablas 3, 4 y 5)

Figura 15 Mapa actual de la geología Colombiana, Montes et al, 2015



Tabla Crono estratigráfica Internacional 2013 - Comisión Estratigráfica Internacional

Tabla 3 Estratigrafía, Montes et al, 2.015

Eonotema Eón	Eratema/Era	Sistema Período	Serie Época	Piso Edad	Edad	GSSP	Notación Piso	Notación Serie	Notación Sistema
Fanerozoico FZ	Paleozoico PZ	Pérmico	Lopingiano	Changhsingiano	Ma		p9	P3	P
				Wuchiapingiano	254,14±0,07		p8		
			Guadalupiano	Capitaniano	259,8±0,4		p7	P2	
				Wordiano	265,1±0,4		p6		
				Roadiano	268,8±0,5		p5		
				Kunguriano	272,3±0,5		p4		
			Cisuraliano	Artinskiano	283,5±0,6		p3	P1	
				Sakmariano	290,1±0,26		p2		
				Aseliano	295±0,18		p1		
					298,9±0,15				
		Carbonífero	Pensilvánico	Gzheliano	303,7±0,1		c7	C2	C
				Kasimoviano	307,0±0,1		c6		
				Moscoviano	315,2±0,2		c5		
				Bashkiriano	323,2±0,4		c4		
			Misísipico	Serpukhoviano	330,9±0,2		c3	C1	
				Viseano	346,7±0,4		c2		
			Tournaisiano	358,9±0,4		c1			
		Devónico	Superior/Tardío	Fameniano	372,2±1,6		d7	D3	D
				Frasniano	382,7±1,6		d6		
			Medio	Givetiano	387,7±0,8		d5	D2	
				Eifeliano	393,3±1,2		d4		
			Inferior/ Temprano	Emsiano	407,6±2,6		d3	D1	
				Pragianio	410,8±2,8		d2		
				Lochkoviano	419,2±3,2		d1		
					423,0±2,3				
		Silúrico	Pridoli	Ludfordiano	425,6±0,9		s7	S3	S
				Gorstiano	427,4±0,5		s6		
			Wenlock	Homeriano	430,5±0,7		s5	S2	
				Sheinwoodiano	433,4±0,8		s4		
			Llandovery	Telyquiano	438,5±1,1		s3	S1	
				Aeroniano	440,8±1,2		s2		
				Rhuddaniano	443,4±1,5		s1		
					445,2±1,4				
		Ordovícico	Superior/Tardío	Hirnantiano	453,0±0,7		o7	O3	O
				Katiano	458,4±0,9		o6		
				Sandbianio	467,3±1,1		o5		
				Darriwiliano	470,0±1,4		o4		
			Medio	Dapingiano	477,7±1,4		o3	O2	
					485,4±1,9				
			Inferior/ Temprano	Foliano	~489,5		o2	O1	
				Tremadociano	~494		o1		
		Cámbrico	Furongiano	Piso/Edad 10	~497			ε4	ε
				Jiangshaniano	~500,5				
				Paibiano	~504,5				
				Guzhangiano	~509				
			Serie/ Época 3	Drumiano	~514			ε3	
				Piso/Edad 5	~521				
			Serie/ Época 2	Piso/Edad 4	~529			ε2	
				Piso/Edad 3	541,0±1,0				
			Terreneuviano	Piso/Edad 2				ε1	
Fortuniano									

Tabla 4 Estratigrafía, Montes et al, 2.015

Enotema Eón	Eratema/Era	Sistema Periodo	Serie Época	Piso Edad	Edad	GSSP	Notación Piso	Notación Serie	Notación Sistema			
Fanerozoico FZ	Cenozoico CZ	Cuaternario	Holoceno		Ma			Q2	Q			
			Pleistoceno	Superior/Tardío	0,0117		q4	Q1				
				Medio	0,126		q3					
				Calabriano	0,781		q2					
				Gelasiano	1,806		q1					
		Neógeno	Plioceno	Piacenziano	2,588		n8	N2	N1	N		
				Zancleano	3,600		n7					
			Mioceno	Mesiniano	5,333		n6					
				Tortoniano	7,246		n5					
				Serravaliano	11,62		n4					
				Langhiano	13,82		n3					
				Burdigaliano	15,97		n2					
				Aquitano	20,44		n1					
					23,03							
			Paleógeno	Oligoceno	Chatiano	28,1		e9			E3	E
				Rupeliano	33,9		e8					
				Eoceno	Priaboniano	38,0		e7				
					Bartoniano	41,3		e6				
					Lutetiano	47,8		e5				
					Ypresiano	56,0		e4				
			Paleoceno	Thanetiano	59,2		e3	E1				
				Selandiano	61,6		e2					
				Daniano	66,0		e1					
	Mesozoico MZ	Cretácico	Superior/Tardío	Maastrichtiano	72,1±0,2		k6	K2	K			
				Campaniano	83,6±0,2		k5					
				Santoniano	86,3±0,5		k4					
				Coniaciano	89,8±0,3		k3					
				Turoniano	93,9		k2					
				Cenomaniano	100,5		k1					
			Inferior/ Temprano	Albiano	~113,0		b6	K1				
				Aptiano	~125,0		b5					
				Barremiano	~129,4		b4					
				Hauteriviano	~132,9		b3					
				Valanginiano	~139,8		b2					
				Berriasiano	~145,0		b1					
				Jurásico	Superior/Tardío	Titoniano	152,1±0,9				j7	J3
		Kimeridgiano	157,3±1,0				j6					
		Oxfordiano	163,5±1,0				j5					
		Caloviano	166,1±1,2				j4					
		Medio	Batoniano		168,3±1,3		j3	J2				
			Bajociano		170,3±1,4		j2					
			Aaleniano		174,1±1,0		j1					
			Toarciano		182,7±0,7		j4					
		Inferior/ Temprano	Pliensbachiano		190,8±1,0		j3	J1				
			Sinemuriano		199,3±0,3		j2					
			Hetangiano		201,3±0,2		j1					
		Triásico	Superior/Tardío	Retiano	~208,5		t7	T3	T			
				Norian	~227		t6					
				Carniano	~237		t5					
			Medio	Ladiniano	~242		t4	T2				
				Anisiano	247,2		t3					
			Inferior/ Temprano	Olenekiano	251,2		t2	T1				
				Induano	252,17±0,06		t1					

Tabla 5 Estratigrafía, Montes et al, 2.015

	Eonotema Eón	Eratema Era	Sistema Periodo	Edad	GSSP	Notación Era	Notación Eón
Precámbrico <i>Pε</i>	Proterozoico <i>PR</i>	Neoproterozoico	Ediacárico	Ma		<i>NP3</i>	<i>NP</i>
			Criogénico	~635	📌	<i>NP2</i>	
			Tónico	850	⌚	<i>NP1</i>	
		Mesoproterozoico	Esténico	1000	⌚	<i>MP3</i>	<i>MP</i>
			Ectásico	1200	⌚	<i>MP2</i>	
			Calímmico	1400	⌚	<i>MP1</i>	
		Paleoproterozoico	Estatérico	1600	⌚	<i>PP4</i>	<i>PP</i>
			Orosírico	1800	⌚	<i>PP3</i>	
			Riácico	2050	⌚	<i>PP2</i>	
			Sidérico	2300	⌚	<i>PP1</i>	
	Arcaico <i>AR</i>	Neoarcaico		2500	⌚		<i>NA</i>
		Mesoarcaico		2800	⌚		<i>MA</i>
		Paleoarcaico		3200	⌚		<i>PA</i>
		Eoarcaico		3600	⌚		<i>EA</i>
	Hádico			4000	⌚		HA
				4600			

1.8.1. Estratigrafía en las cordilleras Colombinas

Los proyectos de túneles viales en Colombia están destinados a construir en las cordilleras Oriental, Central y Occidental, por tal razón es importante conocer la estratigrafía en ellas (ver Figura 15), de tal manera que en la Tabla 6 se han plasmado los datos de la estratigrafía de cada una de las cordilleras teniendo en cuenta la descripción que presenta el mapa geológico colombiano 2.015 y las tablas estratigráficas del mismo.

Según los datos de las tablas del Catálogo de dataciones radiométricas de Colombia suministradas por Montes et al 2.015, la estratigrafía y litología para las cordilleras en las siguientes planchas numeradas (ID REFERENCIA) son:

Tabla 6 Estratigrafía en la Cordillera Occidental, Montes et al, 2.015.

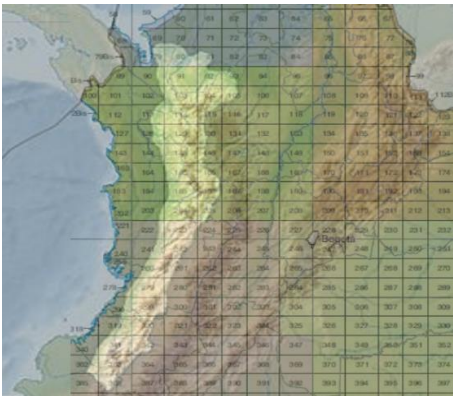
Cordillera Occidental	ID REFERENCIA		La estratigrafía de la zona demarcada de la Cordillera Occidental es de la época: Paleoceno (E1), Periodo: Paleógeno, Era: Cenozoico CZ y Eón: Fanerozoico FZ. Litología: Entre los materiales analizados se encontraron: Sedimento Orgánico, Arcilla, Carbón vegetal y Lodo fibroso.
	79	185	
	80	186	
	81	204	
	91	205	
	92	223	
	93	241	
	103	242	
	104	260	
	113	279	
	114	299	
	129	319	
	130	320	
	145	341	
	165	363	
	166	364	

Tabla 7 Estratigrafía en la Cordillera Central, Montes et al, 2.015.

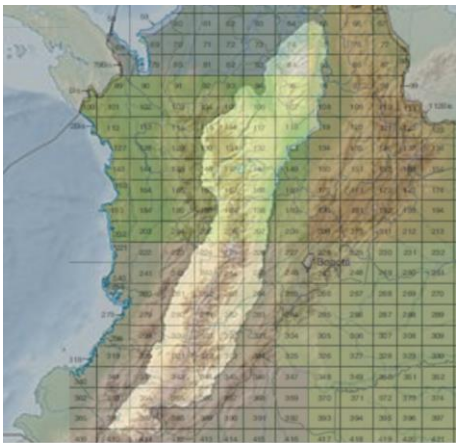
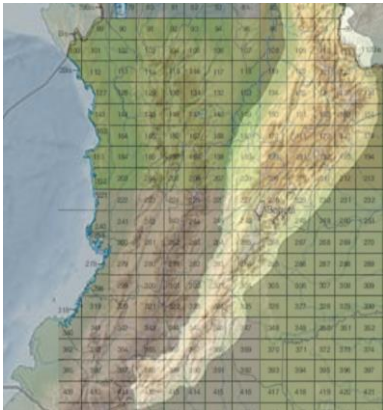
Cordillera Central 	ID			La estratigrafía de la zona demarcada de la Cordillera Central es de la época: Superior tardío (T3), Periodo: Triásico, Era: Mesozoico MZ y Eón: Fanerozoico FZ. Litología: Entre los materiales analizados se encontraron: Madera Carbonizada, Carbón vegetal, Turba, Apatito, Roca total y Sedimentos orgánicos.
	REFERENCIA			
	74	14	24	
	75	14	24	
	84	14	26	
	94	16	26	
	95	16	26	
	105	18	28	
	106	18	28	
	107	20	28	
	115	20	30	
	116	20	30	
	117	22	30	
	118	22	32	
	130	22	32	
	131	24	34	
132	24	34		

Tabla 8 Estratigrafía en la Cordillera Oriental, Montes et al, 2.015.

Cordillera Oriental	ID REFERENCIA				La estratigrafía de la zona demarcada de la Cordillera Oriental es de la época: Inferior temprano (K1), Periodo: Cretácico, Era: Mesozoico MZ y Eón: Fanerozoico FZ. Litología: Entre los materiales analizados se encontraron: Carbón vegetal, Sedimentos, Turba, Material vegetal quemado, Concha de molusco, Concha y Roca total.
	57	121	171	246	
	67	122	172	247	
	68	123	173	248	
	76	134	189	264	
	77	135	190	265	
	78	136	191	266	
	86	137	192	283	
	87	138	193	284	
	88	149	208	285	
	97	150	209	303	
	98	151	210	304	
	109	152	211	323	
	110	153	227	324	
	111	154	228	345	
119	169	229	346		

2. CAPITULO 2 - GENERALIDADES EN TÚNELES VIALES.

Un túnel es una obra subterránea cuyo objetivo es permitir la comunicación entre dos o más lugares. Entre los principales usos a estas obras subterráneas están: el abastecimiento de agua, el transporte de vehículos, el uso de ferrocarriles o metros, las galerías de servicios y el uso peatonal. El interés para esta investigación es el de transporte de vehículos, metro, tren y personas; cuyo objeto es recortar distancias atravesando diferente obstáculos naturales (montañas, ríos o mares) y contribuir al mejoramiento de la red vial brindando beneficios como seguridad, ahorro de tiempo y trayecto vial.

Este capítulo presenta los aspectos generales sobre túneles viales, como son los análisis preliminares al proyecto, normatividades, las partes que lo componen y su clasificación, identificando los principales métodos y herramientas que se han utilizado para su desarrollo.

2.1. GEOMETRÍA DEL PROYECTO.

El manual para diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera en Colombia, en gestión de Martínez C. y García Henry, 2.015 informa que los túneles carreteros se deben diseñar de tal forma que se controlen las posibles fallas en el terreno cumpliendo condiciones de seguridad, eficiencia, facilidad de construcción, vida útil y el mantenimiento de su operación. De tal manera que se deben contemplar los siguientes aspectos:

- Evaluar el comportamiento del terreno frente a las características y condiciones específicas del proyecto que influyen la excavación.
- Cumplir con los requerimientos socio ambientales (ruido y vibración), interrupción del tráfico, contaminación o cambios de la calidad del agua,

subsistencia, levantamiento del terreno, efectos sobre estructuras vecinas, efectos producidos en el paisaje circundante, flora, fauna y alrededores, disposición de materiales producto de excavación y de procesos constructivos.

- Evaluación de la actividad sísmica
- Efectos de presión de agua interna y externa, nivel freático y cantidad de infiltraciones de agua.

2.1.1. Diseño geométrico.

Martínez y García, 2015 describen las recomendaciones y parámetros mínimos en cuanto al diseño geométrico de túneles viales en carretera, además comentan que los diseños en planta y perfil se deben hacer de acuerdo a el Manual de Diseño Geométrico del INVIAS del año 2008 y que es de importancia considerar las siguientes pautas.

- Criterios para la localización del túnel
- Radio mínimo de curvatura
- Secciones transversales de servicio
- Secciones del cuerpo del túnel
- Bahías de parqueo
- Galerías de evacuación

López (1.997) explica que en el diseño geométrico podemos encontrar las características del túnel, entre ellas su pendientes, distancia entre conexiones, definición de la altura, trazado en planta y alzado, sección transversal, calzada, andén, ventilación, tipo de tráfico, condiciones geotécnicas y demás. La Tabla 9 hace referencia a distintos parámetros necesarios como parte de la elaboración del diseño geométrico para túneles.

Tabla 9 Consideraciones para el diseño geométrico. Modificado de López, 1.997.

TRAZADO EN PLANTA	CONSIDERACIONES
La geotecnia local del macizo a atravesar	Tener a disposición información de tipo general sobre las condiciones geotécnicas del macizo a atravesar, generando el posible trazado.
Afectación a obras subterráneas existentes	Las empresas que han construido obras subterráneas generan informes de los procesos realizados, pero no son publicados o reportados; lo que trae como consecuencia caer en errores al momento de construir obras cercanas.
Afectación a obras exteriores existentes	Se debe realizar un trazado lo más lejos posible a otras obras para mitigar el asentamiento.
TRAZADO EN ALZADO	CONSIDERACIONES
Carreteras	La pendiente máxima debe ser de 5%, de lo contrario la ventilación presentaría inconvenientes.
Autopistas	Se recomienda que no sean superiores al 2% > 0.5 km; 4% < 0.5 km

2.4. NORMATIVIDAD.

Colombia al igual que muchos otros países que han venido desarrollando una gran experiencia adquirida a través de la historia en muchos proyectos de obras subterráneas, tienen que cumplir algunas normas y parámetros mínimos

establecidos por normatividades de la actualidad, ya que el objetivo de un túnel fundamentalmente es prestar un servicio óptimo en la comunicación de dos lugares, pero es de gran importancia el aspecto visual y de elementos, tanto de seguridad como de ayuda de señalización además de la ventilación apropiada según la longitud.

El instalar los apropiados elementos como luminarias, señalización y sistemas de ventilación conllevan a disminuir la sensación de inseguridad por la disminución de la sección, riesgo de humos, fugas o incendios. Permitiendo mejorar la adaptación del usuario al entrar y salir del túnel; lo anterior ha generado que a través de la historia se estén realizando manuales con el fin de cumplir ciertos parámetros mínimos para este tipo de obras viales. Las siguientes normas están actualmente vigentes y están relacionadas principalmente con el diseño, tránsito, velocidad máxima, iluminación, ventilación, método constructivo y materias peligrosas:

- La normativa española IOS'98.
- Norma técnica complementaria a la IOS'98 de aplicación en Barcelona.
- (CETU) Es la normativa más restrictiva y completa que existe en la actualidad a nivel europeo, normativa francesa realizada por el Centro de estudio de los túneles.
- Normatividad (PIARC) (Asociación Internacional Permanente del Congreso de Carreteras)
- Manual AIPCR de túneles de carreteras - U.S.A.
- NFPA 502 – Norma nacional para seguridad frente a incendios en túneles de carretera- estados unidos.
- Normas técnicas sobre túneles,1.991 – Japón

Amaris y Mayorga (2.008) realizan un análisis muy completo referente a la normatividad Colombiana en túneles viales y de tal forma se pueden resaltar los siguientes objetivos de las normas actuales:

- Crear mayor responsabilidad en los usuarios al momento de transitar los túneles cumpliendo con las medidas de seguridad.
- Incentivar a las empresas a realizar las excavaciones de este tipo de obras con los equipos de seguridad más apropiados.
- Establecer un mantenimiento constante en los equipos e instalaciones del túnel.
- Tener en cuenta la metodología, experiencia e inconvenientes de otros proyectos al momento de construir este tipo de obras con el fin de no recaer en los mismos imprevistos.

Amaris y Mayorga (2.008) comentan que la normatividad en la construcción de túneles viales en Colombia se aplica por primera vez en el año de 1.995 con la construcción del túnel Bijagual entre Bogotá y Villavicencio, cumpliendo con requerimientos de la Norma NFPA 502 (*National fire protection association*) y las recomendaciones de la P.I.A.R.C (Asociación Internacional Permanente del Congreso de Carreteras). Algunos túnel que cumplen también con estas normas son el túnel de Sumapaz, túnel de la Línea y túnel de Occidente. Entre los túneles que han sido resaltados durante la construcción de obras subterráneas en Colombia es sin duda el túnel de occidente en Antioquia, este cumple con estándares de talla mundial y es destacado continuamente como el túnel más moderno de américa latina, entre las características de esta obra están:

42 cámaras de televisión, 800 bombillas, 220 kilómetros (km) de cableado eléctrico, modernos sistemas de ventilación e iluminación y uno contra incendios que consiste en tanques de agua que almacenan 142.000 litros de líquido.

2.4.1. Recomendaciones de normatividades para Colombia

En el numeral 2.4 se informó de varias normatividades a nivel mundial sobre la construcción de túneles viales, algunas de ellas son aplicadas y otras a considerar para Colombia. A través de las Tablas 10, 11 y 12 se conocerán los datos establecidos por las normatividades aplicadas: la normatividad PIARC y la normativa española IOS'98.

2.4.1.1. Pendientes máximas recomendadas para túneles viales de carretera en Colombia.

La Tabla 10 representa las pendientes máximas que se debe tener en un túnel según la longitud, se podría concluir que a mayor longitud la pendiente tiene que ser menor, algunos de los motivos es la dificultad en el control de la ventilación para la evacuación de la acumulación de CO.

Tabla 10 Pendientes máximas. Normatividad P.I.A.R.C., Ardila, 2.010.

Longitud del Túnel (m)	<250	250-500	500-1.000	1.000-3.000	>3.000
Pendiente Ascendente (%)	6	5	4	3	2
Pendiente Descendente (%)	8	7	6	5	4

2.4.1.2. Recomendaciones geométricas para túneles viales en Colombia.

Ardila (2.010) informa que según la normatividad P.I.A.R.C. se recomiendan las siguientes medidas (ver Tabla 11) para túneles en Colombia, teniendo en cuenta el tipo de red.

Tabla 11 Recomendaciones geométricas. Normatividad P.I.A.R.C., Ardila, 2.010.

TIPO	CARRIL (m)	BERMA (m)	ANDEN (m)	GÁLIBO	ANCHO TOTAL (m)
TÚNELES DE CARRETERA					
Red Primaria	2 carriles de 3,65	0,35	0,75	5,00	9,50
Red Secundaria	2 carriles de 3,65	0,25	0,5	4,60	8,80
Red terciaria	3,65	0,25	-	4,60	7,80

TÚNELES URBANOS					
Troncales	3,25	0,25	1,50 + 0,50	5,00	12,25
Vías Principales	3,50	0,25	1,50 + 0,50	5,00	9,50
TÚNELES PEATONALES					
Único	3,00	0,50	-	3,00	4,00
GÁLERIA VEHICULARES					
Único	3,65	0,25	-	4,60	4,15

2.4.1.3. Túneles bidireccionales.

Ardila (2.010) establece según información de la Normativa PIARC que los parámetros más apropiados para la construcción de túneles bidireccionales en Colombia son los siguientes (ver Tabla 12).

Tabla 12 Normatividad PIARC. Normatividad P.I.A.R.C., Ardila, 2.010.

RECOMENDACIONES (PIARC)					
Tipo de sección	Ancho de carril (m)	Sobre ancho (m)	Andenes (m)	Andenes montables (m)	Total entre paredes (m)
Mínimo sin andenes	3,5	0,75			8,5
Mínimo con andenes	3,5	0,75	0,6		9,7
Mínimo con andenes montables	3,5	0,5		0,6	9,2
Restringidos con andenes	3,5	2	0,6		12,2
Restringido con andenes montables	3,5	1,75		0,6	11,7
Sin restricción	3,5	3,5	0,6		13,2

2.5. ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE UN TÚNEL.

Según la asociación mundial de carreteras PIARC – AIPCR, 2.015 en los túneles carreteros la forma de la sección transversal es generalmente rectangular o circular, dependiendo del procedimiento constructivo, por otra parte las dimensiones del espacio de la sección transversal varían según los siguientes aspectos:

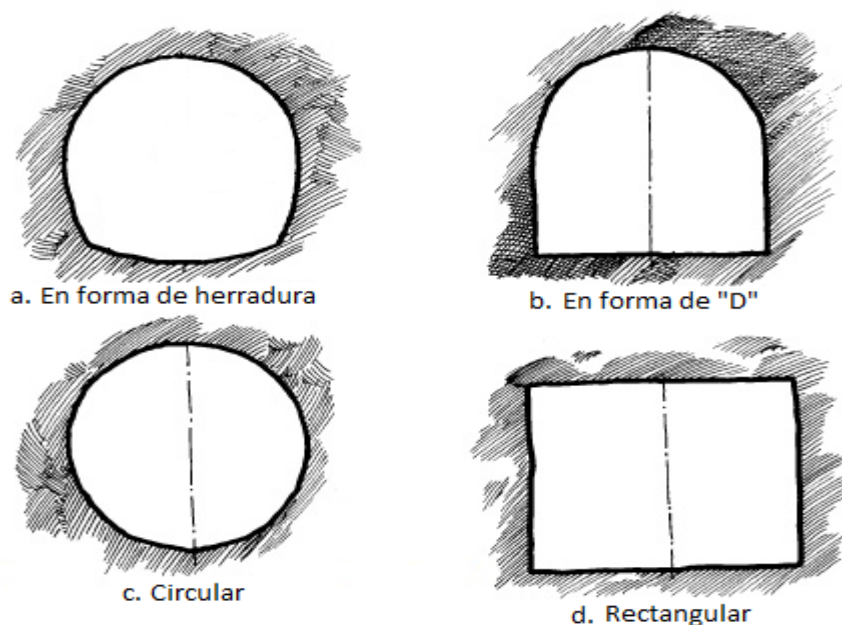
1. Volumen de tráfico e importancia del túnel.
2. Velocidad de proyecto, distancia de seguridad y distancia de visibilidad.
3. Espacio reservado para el equipamiento interior (señalización, ventilación, iluminación, circuito cerrado de televisión, control del tráfico, control de la calidad del aire, etc.)
4. Coste de la obra en función de las normas de seguridad requeridas.
5. Gestión del tráfico necesaria en caso de incidente en el túnel.
6. Normativa local de aplicación y disponibilidad presupuestaria.

En la Tabla 13 se nombran las diferentes secciones transversales existentes con su procedimiento constructivo habitual, los túneles se pueden construir a través de dovelas que son ensambladas por tuneladoras (TBM) que generan un anillo en forma de sección circular y que requiere la construcción adicional de la contra bóveda (ver Figura 16 - c), en secciones rectangulares para túneles falsos se utilizan prefabricados para generar parte de los hastiales y sustitución de la bóveda (ver Figura 16 - d), la sección transversal en forma de herradura es la más habitual y se construye a través de métodos de voladura o métodos tradicionales (ver Figura 16 - a), para finalizar la sección en forma de “D” es similar a la anterior, la diferencia radica en que no se construye la contra bóveda dado que la zona de excavación es de roca dura (la contra bóveda se construye generalmente cuando el terreno presenta terrenos blandos y se busca reforzar la estructura completamente).

Tabla 13 Secciones transversales y procedimientos constructivos habituales, PIARC, 2.015.

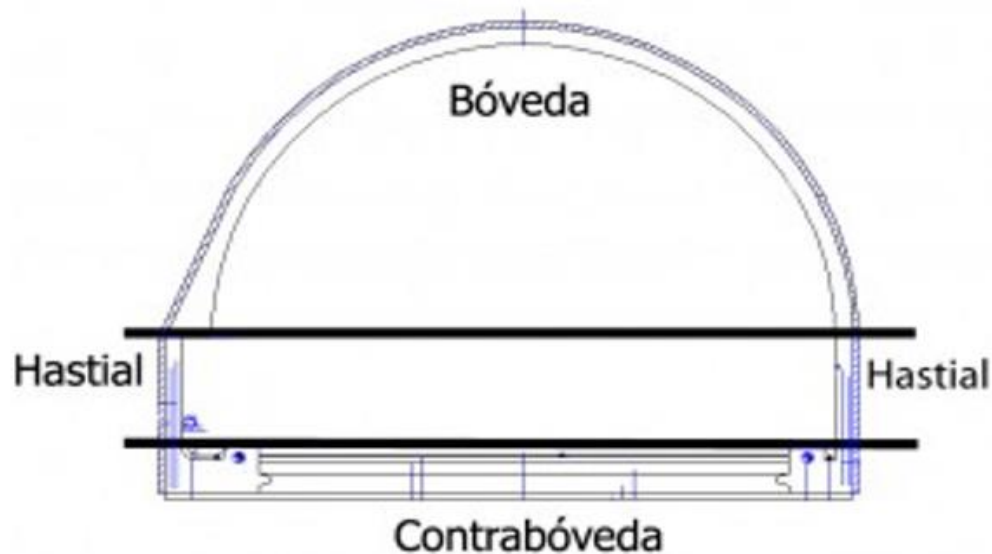
Nº	Sección transversal	Procedimiento constructivo habitual	Comentario
1	Circular	Tuneladora (TBM)	Recientemente extendido en Japón a sección rectangular
2	Rectangular	Túnel sumergido	En EEUU son comunes secciones circulares
3	Rectangular	Falso túnel	La utilización de prefabricados conduce a veces a secciones abovedadas
4	Herradura	Voladura	Utilizado en roca
5	Bóveda y contra bóveda	Métodos tradicionales de excavación y sostenimiento	En roca dura, la sección en herradura es habitual

Figura 16 Tipos de secciones de túneles, Guzmán, 2.009.



Durante el desarrollo de esta investigación fue necesario conocer que los túneles están conformados estructuralmente por tres elementos geométricos, el orden de construcción y procesos que tienen estos elementos y secciones será explicado a través de la Figura 17.

Figura 17 Elementos que componen un túnel. Barqueros, 2.009.



Barqueros (2.009) define los elementos de un túnel de la siguiente manera.

ELEMENTOS QUE COMPONEN UN TUNEL

- **Bóveda:** Es un elemento prefabricado curvo en la parte superior del túnel llamada también clave, unido por compresión para formar el revestimiento de una excavación subterránea.
- **Hastiales:** Son las paredes del túnel, estos soportan las cargas generadas de la bóveda.
- **Contra bóveda:** Es la parte inferior del túnel o piso, su ejecución se realiza simultáneamente con las aceras.

Portales: Son las zonas correspondientes a la entrada y salida del túnel (ver Figura 18).

Destroza: Es la excavación que se realiza en el centro del frente del túnel hasta la parte inferior (contra bóveda). Aunque no es un elemento fundamental del túnel es un proceso necesario para la construcción de los hastiales.

En la Figura 18 se describen las características exteriores que pueden presentarse y los portales.

Figura 18 partes de un portal para un túnel, normatividad PIARC, 1995.



2.6. HISTORIA EN LA CONSTRUCCION DE TUNELES.

Según Megan y Bartlett (1.988) las primeras obras básicas subterráneas se remontan al final de la Edad de Piedra con la construcción de minas que tenían como objetivo adquirir minerales como el sílex o pedernal, materiales utilizados para la fabricación de armas y herramientas. La construcción de minas se desarrolló principalmente en Europa, hace aproximadamente 2.000 A. C. En el cuarto milenio A. C. se utilizaban picas hechas de astas de ciervos, hachas de pedernal, cuñas de madera/piedra, cobre nativo y palas de hueso, con los años se confeccionaron herramientas como: martillos y cinceles. Las excavaciones se realizaban por secciones (métodos tradicionales) y su avance era dado por continuos sostenimientos de soportes de madera.

López (1.997) presenta en el capítulo 1 la historia de los túneles a nivel mundial, entre las primeras construcciones de túneles, están las que tienen como objetivo transportar agua (acueductos) desde las fuentes en las colinas hasta los pueblos y aldeas, guiándolas luego por tuberías de barro colocadas en zanjas excavada en el piso, también eran utilizados para drenajes y desagües de casas y calles. La Tabla 14 hace referencia y descripción a la construcción de las primeras obras subterráneas de ferrocarril y minas en diferentes lugares del mundo a través de la historia como parte fundamental de la evolución de estas obras subterráneas.

Tabla 14 Primeros túneles a nivel mundial. Modificado de López, 1.997.

TÚNEL	LONGITUD (m)	LOCALIZACIÓN	AÑO	OBSERVACIÓN
Cueva de león	-----	Cerro de Bomvu Ridge - Suazilandia	40.000 a.C.	La mina más antigua del mundo
Babilonia	1.000	Babilonia	2.200 a. C.	Considerado como el primer túnel
La isla de Samos	1.000	Samos, Grecia	530 a. C.	Construido por Eupalinos de Megara
Pausilippo	1.500	Cerca de Nápoles	35 a. C.	-----
La mina de Daroca	600	Provincia de Zaragoza- España	Entre 1.555 y 1.570	Primer túnel del renacimiento
Malpas	155	Cerca de Beziers	1.679	Primer túnel para canal de agua, se utilizó la técnica de voladura con pólvora.
Buco di Viso	75	Francia- Italia	Entre 1.475 y 1.480	
Urnerloch	64	Andermatt, en el cantón de Uri	1.707	Construido por Pietro de Ticino; es el primer túnel Suizo
Terre Noir	1.476	Francia	1.826	Primer túnel ferroviario
Mont Cenis	12.600	Los Alpes	Segunda mitad del siglo XIX	-----

San Gotardo	15.200	Los Alpes	Segunda mitad del siglo XIX	-----
Simplón	19.700	Los Alpes	Segunda mitad del siglo XIX	-----

López (1.997) describe que algunos pioneros de la construcción de túneles fueron los: noruegos, asirios, egipcios, romanos, hindúes, ingleses, alemanes y japoneses; quienes desarrollaron habilidades, soluciones y controlaron las etapas o procesos de construcción tales como: control de tierra, materiales, metodología, maquinaria, herramienta, precauciones, sostenimiento, entibaciones, ventilación, seguridad y saneamiento.

2.7. PROCESOS Y MÉTODOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES VIALES.

Palacios, 2.015 habla sobre los conceptos generales en suelos como un material no consolidado compuesto por distintas partículas sólidas, líquidas o gaseosas y que contiene una amplia variedad de materiales tales como grava, arena y mezclas arcillosas. En cuanto a las rocas las define como un agregado natural de partículas minerales unidas mediante grandes fuerzas cohesivas, El grado mínimo de dureza que caracteriza a una roca se ha fijado como la resistencia a compresión simple de 1 MPa. De tal manera que estos son los tipos de terrenos que pueden presentarse en la construcción de túneles.

Por consiguiente la construcción en obras subterráneas se puede clasificar según el geomaterial que se quiera excavar, hay dos clasificaciones de estudio, la primera que la zona a ejecutar presente características de roca dura y la segunda que sea en terrenos blandos (suelos), teniendo en cuenta estas especificaciones

se analizarán las herramientas, maquinaria, procesos, métodos de excavación y construcción.

La Tabla 15 establece el año en que se inició la implementación de métodos en la construcción de túneles para rocas y terrenos blandos.

Tabla 15 Clasificación de la construcción de túneles. Modificado de López, 1.997.

AÑO	CLASIFICACIÓN	HERRAMIENTAS / MAQUINARIA	PROCESOS
1.825	Terrenos blandos	Picas	Entibación
		Palas	
		Martillos	
1.851	Roca dura	Máquinas perforadoras	Encofrados, perforación y voladura,
		Maquinas mecánicas	
		TBM	

2.7.1. Clasificación de macizos rocosos.

Bersilli 2.015 habla que las propiedades que influyen en el comportamiento mecánico de un macizo rocoso son las dadas en la Tabla 16; además comenta que las frecuencias de discontinuidades tienen un gran efecto en las características mecánicas e hidráulicas de un macizo rocoso.

Tabla 16, propiedades del comportamiento mecánico de un macizo rocoso, Bersilli, 2.015.

Parámetros discontinuidades	Parámetros del material	Condiciones en alrededor
Numero de discontinuidades Orientación Espaciado Abertura Rugosidad Alteración (intemperismo)	Resistencia a la compresión Módulo de elasticidad (o deformación)	Flujo de agua y presión de agua Presión geostática en sitio (<i>stress</i>)

López (1.997) dice que el tener una estimación de la calidad del macizo rocoso es de gran importancia para ejecutar los procesos en la excavación de túneles, ya sea a partir de la observación en campo o a través de ensayos. Las rocas han sido clasificadas a través de ensayos, la siguiente es una lista de los métodos existentes para calcular la calidad.

- **Clasificación de la roca**

- Índice de calidad de las rocas, R.Q.D. (*Rock Quality Designation*), Deree y Miller (1.967).
- Bieniawski - R.M.R. (*Rock Mass Rating*), Z.T. Bieniawski (1.984).
- S.M.R. (Romana - 1.992).
- Índice Q de Barton (*Rock Mass Quality*), Barton (1.974).
- Terzaghi, 1.946.
- Índice de resistencia geológica GSI (*Hoek & Brown*), Hoek y Brown (1.994).
- R.S.R. (Wickham), 1.972.
- Protodyakonov, (principios del siglo XX).
- Lauffer, 1.958.

La valoración de la resistencia del macizo rocoso constituye tres factores fundamentales a considerar:

- Litología.
- La disposición y relación espacial de las partes constitutivas del macizo rocoso (la estructura por estratificación y la estructura por discontinuidades).
- El estado de conservación en el que se encuentra (su condición de frescura o alteración).

2.7.2. Clasificación de la roca intacta.

González de Vallejo (2.002) comenta que el comportamiento mecánico de las rocas está definido por su resistencia y su deformabilidad. La resistencia es el esfuerzo que soporta una roca para determinadas deformaciones. Cuando la resistencia se mide en probetas de roca sin confinar se denomina resistencia a compresión simple, y su valor se emplea para la clasificación geotécnica de las rocas (ver Tabla 17).

Tabla 17 Clasificación de la roca intacta. González de vallejo, 2.002.

I. Basada en la resistencia (σ_c)				II. Basada en el módulo relativo (E_r / σ_c)		
Clase	Descripción	Resistencia a compresión simple		Clase	Descripción	Módulo relativo
		MPa	kg/cm ²			
A	Resistencia muy alta	> 225	> 2250	H	Elevado módulo relativo	> 500
B	Resistencia alta	112 - 225	1120 - 2250	M	Módulo relativo	200 - 500
C	Resistencia media	56 - 112	560 - 1120	L	Módulo relativo bajo	< 200
D	Resistencia baja	28 - 56	280 - 560			
E	Resistencia muy baja	< 28	< 280			

Ensayo a compresión simple

Ramírez y Alejano, 2.004 describen el proceso del ensayo a compresión simple con el fin determinar la resistencia a compresión uniaxial de una probeta cilíndrica de roca de altura entre el doble y el triple del diámetro, el ensayo también proporciona las constantes elásticas de la roca, es decir su módulo de Young y su coeficiente de poisson, el conocer estos datos nos permite clasificar las rocas según su resistencia, es un parámetro importante en los criterios de la rotura más utilizados (Mohr – Coulomb y Hoek – Brown) y sirve para estimar la resistencia de los pilares en las explotación.

2.7.3. Índice de calidad de las rocas, RQD - “rock quality designation”.

González de Vallejo (2.002) explica el método de Deree y Miller (1.967), quienes desarrollaron el método RQD para estimar cuantitativamente la calidad del macizo rocoso a partir de testigos (fragmento rocoso) de sondaje.

El objetivo consiste en la recuperación modificada de un testigo (El porcentaje de la recuperación del testigo de un sondeo). Depende indirectamente del número de fracturas y del grado de la alteración del macizo rocoso.

El proceso consiste en separar solamente fragmentos iguales o superiores a 10 cm de longitud. El diámetro del testigo tiene que ser igual o superior a 5.74 cm y tiene que ser perforado con un doble tubo de extracción de testigo. Luego de tener la cantidad de fragmentos, se relaciona en la siguiente formula y según sea el resultado se determina la calidad de la roca (ver Tabla 18):

$$RQD = \frac{\Sigma(\text{longitud_fragmentos} \geq 10\text{cm})}{\text{longitud_total_perforada}} \times 100$$

Tabla 18 Clasificación de la roca – RQD, González de vallejo, 2.002.

RQD (%)	Calidad de la roca
< 25	muy mala
25 - 50	mala
50 - 75	regular
75 - 90	bueno
90 - 100	excelente

2.7.4. Clasificación de Bieniawsky – RMR - (1.984).

La clasificación de Bieniawsky (RMR) básica se obtiene estimando el rango de valores de los ensayos existentes de la clasificación de rocas, es decir cada uno de los siguientes ensayos contiene un porcentaje o variación al que se le asignó una calidad de roca, un valor o descripción; Bieniawsky le dio un puntaje a cada uno de esos resultados de los ensayos.

- El RQD
- Ensayo de compresión simple
- Espaciamiento de las diaclasas (desfavorable)
- Condiciones de las diaclasas (Bieniawsky 1973)
- Condiciones del agua subterránea
- Orientación de las diaclasas (favorabilidad de rumbo y buzamiento)

El método se aplica asignando la valoración correspondiente para cada parámetro, el factor de ajuste, definido cualitativamente, depende de la orientación de las discontinuidades y tiene valores distintos según se aplique a túneles, cimentaciones o taludes.

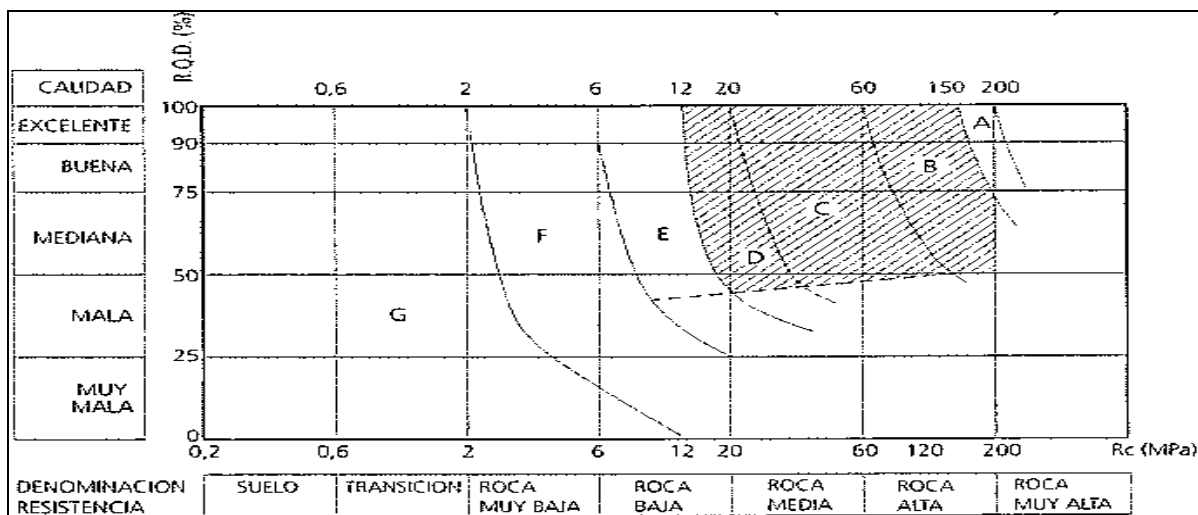
El resultado de la resta (el factor de ajuste es negativo) es el índice final RMR, que puede variar entre 0 y 100, y que clasifica los macizos rocosos en cinco clases (ver Tabla 19).

Tabla 19 Categoría de clasificación Geomecanica según Bieniawski, López, 1.997.

CLASIFICACIÓN GEOMECANICA FINAL (Bieniawski)		
R.M.R.	Calificación del Macizo Rocoso	Clase
81 -100	Muy bueno	I
61 - 80	Bueno	II
41 - 60	Medio	III
21 - 40	Malo	IV
0 -20	Muy malo	V

La Figura 19 presenta una clasificación de terrenos respecto a la excavación mecánica en presencia de rocas, en función de la resistencia a compresión simple y de su RQD, propuesto por Romana en el año 1.981; además en la Tabla 20 se especifica el mecanismo más apropiado para cada condición.

Figura 19 Clasificación de los terrenos respecto a excavaciones mecánicas. González de vallejo, 2.002.



La Tabla 20 se basa en los datos de la Figura 19. De acuerdo a la resistencia de la roca, ver Zona en la Tabla 20. Se propone la mejor opción de la maquinaria a utilizar con respecto a excavaciones mecánicas (topos o rozadoras).

Tabla 20 Propuesta de maquinaria según resistencia de rocas. Modificado de González de vallejo, 2.002.

Zona	TOPO		ROZADORA			MARTILLO	PALA
	$F_n > 25 \text{ t}$	$F_n < 25 \text{ t}$	$P > 80 \text{ t}$	$P 50-80 \text{ t}$	$P < 50 \text{ t}$		
A	Posible						
B	Adecuado	Posible	Posible				
C	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado			
D	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Posible	
E	Posible	Posible	Posible	Adecuado	Adecuado	Posible	Posible
F				Posible	Adecuado	Adecuado	Posible
G					Posible	Posible	Adecuado

F_n : Fuerza máxima de empuje por cortador en toneladas

t : toneladas

P : peso total de la rozadora

2.8. CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN ROCA – MAQUINARIA.

Para la excavación en rocas duras se utilizan procesos mecánicos (máquinas perforadoras) y voladuras. A continuación se realizara la descripción de las máquinas, procesos de voladura y perforaciones.

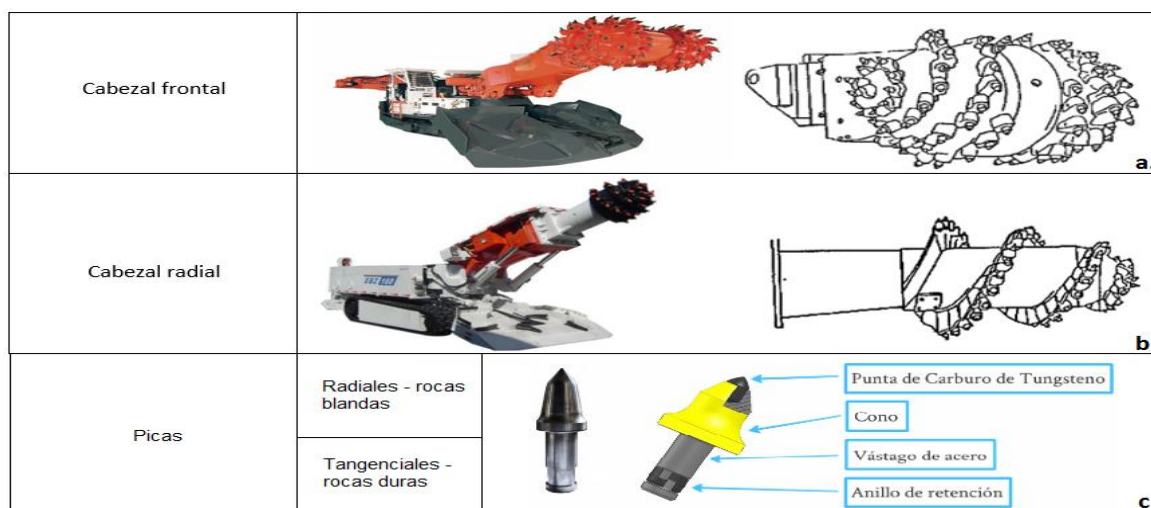
2.8.1. MÁQUINAS DE EXCAVACIÓN.

2.8.1.1. Rozadoras.

Son máquinas conformadas por un brazo mecánico y en el extremo un cabezal de rotación cuyo ataque es puntual en la zona de excavación, constituido por herramientas de corte “picas” (Ver Figura 20 (c) y 24), existen diferentes tipos, para terrenos blandos (delgadas y estrechas) o para rocas duras (gruesas).

CORNEJO (1.988) describe dos sistemas de corte: el *ripping* - frontal (ver Figura 20 (a) y 24); y el *milling* -radial (ver Figura 20 (b) y 24); el primer sistema gira en torno a un eje perpendicular al eje del tunel y esto hace trabajar dos cabezales al tiempo (excavacion frontal), el segundo sistema gira en torno a un eje longitudinal paralelo al eje del tunel (excavacion lateral, es 30 % mas eficiente en rocas duras que el *ripping*).

Figura 20 Máquinas rozadoras. Modificado de Torija, 2.012.



Máquina rozadora 5.3 - 8 m | MT520

Figura 21 Rozadora MT 520, direct industry, 2.015



Especificaciones:

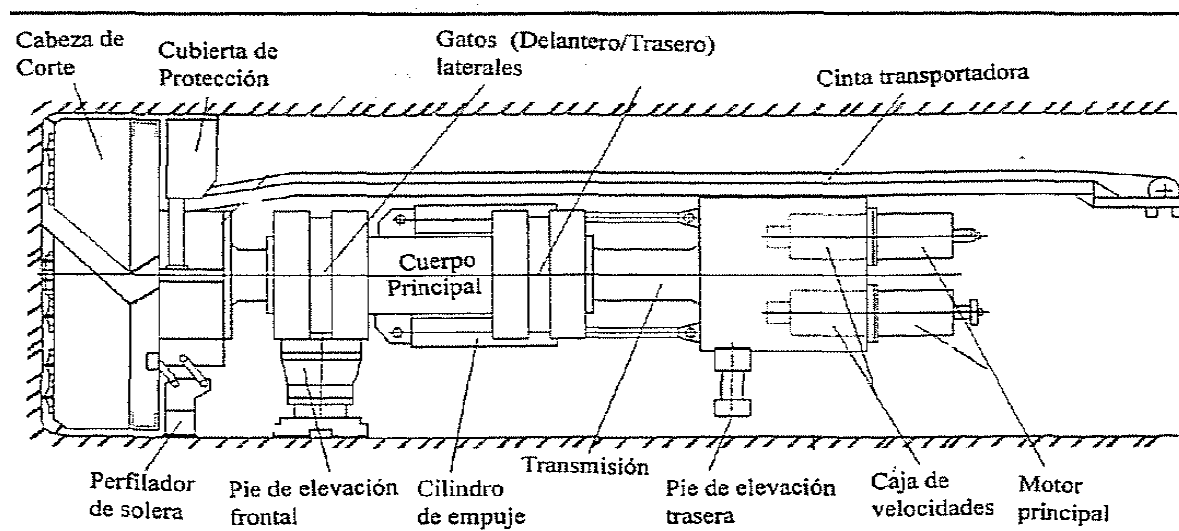
Máquina de ataque puntual

El minero del túnel de SANDVIK MR520 es una máquina de corte resistente, con un motor el cortador de 325 kilovatios con la altura máxima del corte de 5.3 m y de ancho máxima del corte de 8.3 M. Ofrece un diseño modular, y puede por lo tanto ser modificado para requisitos particulares para resolver varios usos específicos del corte, principalmente en perforar del túnel. La construcción es durabilidad y confiabilidad robustas y compactas, de ofrecimientos. El cortador también contiene una carga especial que detecta el sistema hidráulico que asegura el consumo de energía óptima, haciendo este cortador una maquinaria resistente rentable. También ofrece un sistema de alta presión del anillo del aerosol de agua, sistema de alta calidad de la ventilación de la cabina, matando el transportador de correa para el cargamento del carro, y mucho más funcionamiento que realza características.

2.8.1.2. Tuneladoras o topos.

La Figura 22, establece los elementos internos que componen la tuneladora: en el frente está la cabeza de corte que es giratoria y tiene instaladas picas o discos de rotación; los cilindros hidráulicos generan un empuje efectuado a la cabeza contra el frente de excavación, y de esta manera se genera una contribución a las zonas de rotación. El perfilador de solera se encarga de dar forma al elemento inferior del túnel, los gatos ejercen fuerza contra las paredes donde están los hastiales con el fin de mantener estable la máquina, un pie de elevación frontal y trasero que mantienen la máquina a los niveles verticales necesarios según el avance del terreno, en el cuerpo principal está el sistema de control y los cilindros de empuje, también está la transmisión que es la encargada de suministrar la potencia para la rotación y finalmente la parte de la cinta transportadora la cual inicia atrás de la cabeza de corte y termina después de los motores, el material extraído se puede tratar y reutilizar para actividades como la contra bóveda y acabados. Es aconsejable retirarlo mediante vagonetas cuando las longitudes son mayores a 1.500 m.

Figura 22 Esquema de maquina topo (TBM). González, 2.010.



Según Giraldo (2.009) las maquinas tuneladoras TBM (*Tunnel Boring Machine*) son equipos de gran tamaño y de forma cilíndrica que excavan a plena sección (todo el frente del túnel) - (ver Figura 23). Este equipo puede generar un sostenimiento de forma provisional o definitiva. La TBM trabaja por medio de motores eléctricos y sistemas hidráulicos.

La máquina tuneladora excava la roca, retira los escombros mediante una cinta transportadora e instala el revestimiento del túnel. Estas actividades están dirigidas por un sistema de control interno. También hay máquinas capaces de realizar otras funciones tales como: colocación de bulones, hormigón lanzado y cerchas.

Las máquinas TBM son diseñadas y construidas bajo pedidos e implementadas principalmente para proyectos de largas distancias debido a los altos costos que genera su construcción, transporte e instalación - (requiere entre cuatro a seis meses).

Figura 23 TBM utilizada en los Andes Peruanos. Desiree, 2.012.



Revestimiento a través de dovelas elaborado por TBM

Chamorro (2.005) describe las dovelas como estructuras en concreto reforzado con fibras de acero y barras corrugadas de acero. Estas son ensambladas por las máquinas tuneladoras o TBM para dar la forma y soporte del túnel (ver Figura 24).

La empresa TITÁN describe que el número de dovelas para conformar los anillos y la calidad de los materiales son definidos de acuerdo con la geometría y el diseño del túnel. Dependiendo de las condiciones del túnel, se acostumbra a utilizar anillos universales conformados por 6 a 11 dovelas, de las cuales hay una más pequeña que permite cerrar el anillo. Los extremos de los anillos no son paralelos lo que permite al túnel tener diferentes alineaciones. La fabricación de las dovelas requiere moldes de gran precisión y perfecta geometría, puesto que la tolerancia de los anillos es de pocos milímetros.

Figura 24 Dovelas. Mendoza, 2.012.



2.8.1.3. Martillos de impacto.

El martillo de impacto es una máquina de perforación ajustada a una retroexcavadora en su brazo hidráulico (ver Figura 25). Su rendimiento es excelente a comparación de los martillos manuales usados anteriormente, este equipo se usa en rocas blandas y fisuradas. Actualmente se puede lograr un rendimiento óptimo mediante la programación de la máquina con cierta fuerza y cantidad de golpes en una zona establecida.

Figura 25 Martillo de impacto. Catalogo – CAT, M317D2, 2.015.



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Martillo de impacto – CAT - M317D2

Figura 26 especificaciones técnicas, M317D2, 2.015.

MOTOR	
Modelo del motor	Cat® C4.4
Potencia neta	108.0 kW
Calibre	105.0 mm
Carrera	127.0 mm
Cilindrada	4.4 C
cilindros	4
Par máximo a 1.400 rpm	550.0 N·m
Emisiones	Equivalente a Tier 3 de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE.UU., Stage IIIA de la Unión Europea, Tier 3 de Corea y Stage II de China.
Potencia neta (ISO 14396) a 2.000 rpm	108.0 kW
Potencia neta: ISO 14396	108.0 kW
Potencia neta: ISO 9249/SAE J1349	101.0 kW
Clasificaciones	2000.0 rpm
PESOS	
Hoja topadora	750.0 kg
Estabilizadores	960.0 kg
Contrapeso: optativo	3900.0 kg
Contrapeso: estándar	3500.0 kg
Nota	* Peso de la máquina con brazo mediano, contrapeso de 3.900 kg, con el operador y el tanque de combustible lleno, sin la herramienta.
Nota (continuación)	El peso varía según la configuración.
Pluma One-Piece*: hoja topadora delantera, estabilizadores traseros	16290.0 kg
Pluma de una sola pieza*: solo hoja topadora trasera	15340.0 kg
Peso en orden de trabajo	15.300 a 17.500 kg (33.731 a 38.581 lb)
Brazos: largos (2.600 mm)	530.0 kg

2.9. PERFORACIÓN Y VOLADURA.

Bernaola, Castilla y Herrera (2.013) describen la perforación y voladura como un proceso de excavación aplicado para rocas de una resistencia media o alta (ver Tabla 17), se realiza mediante el uso de martillos o jumbos (perforación) y explosivos (voladura), inicialmente se establecen los lugares donde se hará cada perforación y luego se instalan y detonan los explosivos. El diámetro y profundidad de la perforación es establecida de acuerdo a las características de la roca al igual que la cantidad de explosivos que se deben utilizar.

De tal manera que se contemplan dos tecnologías: la tecnología de la perforación y la tecnología de diseño y ejecución de voladuras.

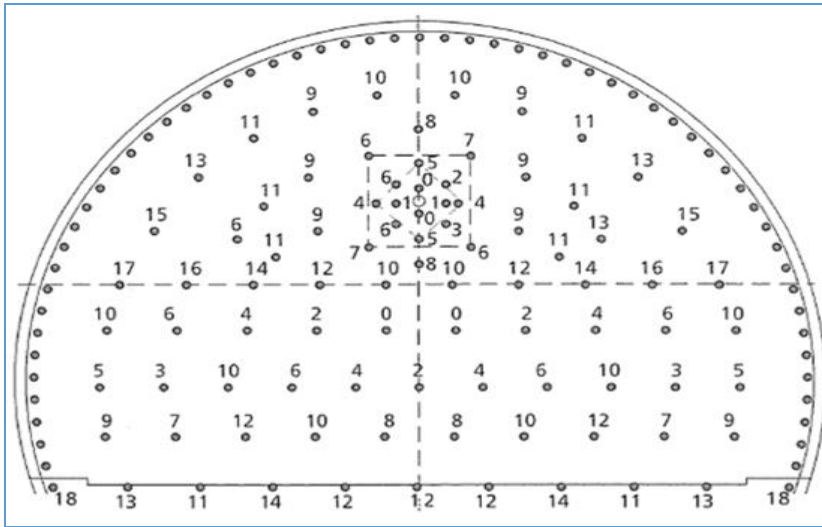
El orden de actividades de estas tecnologías se establece de la siguiente manera:

- Replanteo en el frente del esquema de tiro o malla de perforación
- Perforación
- Carga de explosivos
- Voladura y ventilación
- Retirada del escombros y saneo del frente, bóveda y hastiales.

2.9.1. Esquema de tiro o malla de perforación.

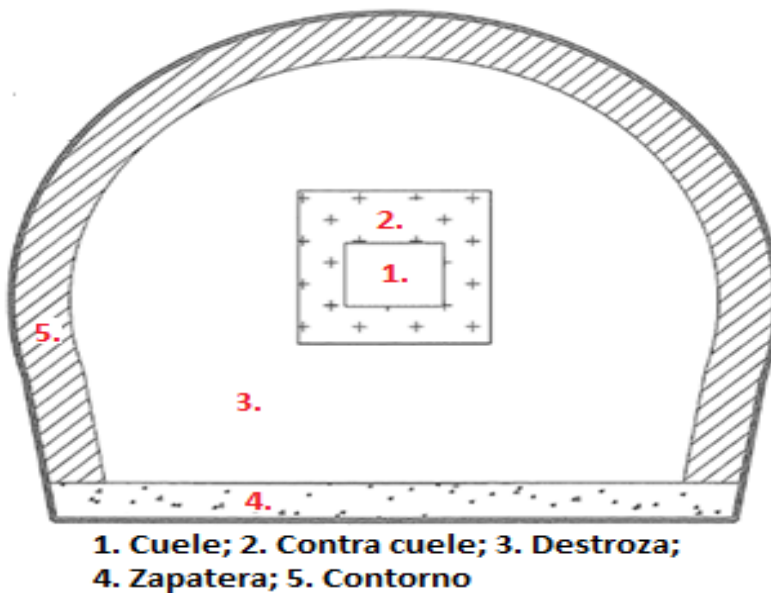
El esquema de tiro es un plano que nos indica el sitio exacto de cada perforación sobre el frente del túnel, la detonación se realiza en orden según la enumeración que se puede observar en la Figura 27.

Figura 27 Esquema de tiro. Rojas, 2.009.



El esquema de tiro está constituido en 5 zonas (cuele, contra cuele, destroza, zapatera y contorno) que se pueden ver en la Figura 28. Aunque en la Figura 27 los puntos de perforación se ven del mismo tamaño, no es así, en cada una de ellos la cantidad de explosivos, dirección, sistemas de detonación y diámetros de perforación son diferentes.

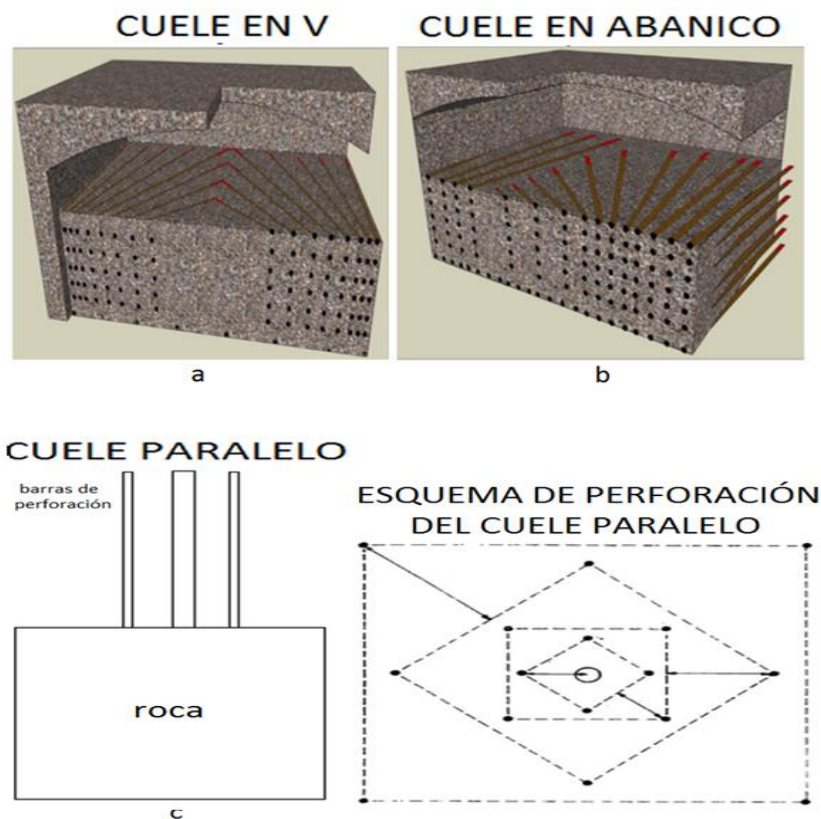
Figura 28 Zonas de detonación. Rojas, 2.009.



- **Cuele (1):** Es la primer etapa de detonación y la más importante, ver Figura 28, cumple el objetivo de crear la primer abertura en la roca siendo la guía de escape de las demas zonas de detonación, existen tres clases de cueles: en “V” (a), en abanico (b) y en paralelo (c) (ver Figura 29), los dos primeros no se utilizan a menudo dado a que no permiten grandes avances por voladura debido a que forman un agulo con respecto al eje del túnel.

El cuele en paralelo consiste en dejar una perforación de mayor diámetro que las demás en la parte central sin explosivos. Alrededor de este van las otras perforaciones con explosivos (ver Figura 29 (c)); en el momento que se presenta la detonacion, la onda de expansión viaja hacia la superficie libre del centro y esto evita el confinamiento, dando como resultado el agretamiento de la roca.

Figura 29 Tipos de cueles. Sena, 2.013.



- **Contracuele (2):** Es la segunda etapa de detonación y se encuentra alrededor del cuele, su proceso radica también en perforaciones con explosivos.
- **Destroza (3):** Es la zona de voladura más amplia y se encuentra alrededor del contracuele, el éxito de la detonación depende de las primeras dos etapas.
- **Zapateras (4):** Esta zona se encuentra en la parte inferior del túnel y requiere más cantidad de explosivos que las demás ya que es la última fase sobre el costado inferior y debe quedar sin grandes residuos rocosos de ser posible.
- **Contorno (5):** Es la zona que delimita el frente del túnel, se realiza mediante las siguientes técnicas: recorte y precorte; en la primera se realizan perforaciones de forma paralela al eje del túnel, a distancias entre 45 y 100 cm con muy poca cantidad de explosivos. La segunda se realiza a menores distancias, con un explosivo especial y en poca cantidad, fabricado en países como Noruega, Alemania y Portugal (GOMA-2 E-C o RIOMEX E20/40), la primera técnica es más usada ya que los costos de los explosivos de la segunda técnica son muy elevados.

2.9.2. Perforación.

La perforación es la segunda actividad del método de perforación y voladura, consiste en hacer unos orificios en la roca sobre el esquema de tiro con ayuda de martillos manuales hidráulicos o jumbos.

2.9.2.1. Martillo manual neumático.

Este martillo es neumático y cuenta con una manguera que está refrigerando la barrena (barra de acero) (ver Figura 30). Su uso no es cotidiano debido al peso y bajos rendimientos (0,02 m/hora), a comparación de otras máquinas tales como los jumbos (0,4 m/hora). (Bohórquez, 2013)

Figura 30 Martillo manual. BOHÓRQUEZ, 2013.



2.9.2.2. Jumbos.

La empresa Direct industry describe que son máquinas móviles acondicionadas con dos o tres martillos hidráulicos (ver Figura 31), actualmente existen sistemas electrónicos para controlar la dirección de los taladros, el impacto y la velocidad de rotación de los martillos e incluso pueden memorizar esquemas y perforar todos los puntos automáticamente.

Perforadora jumbo para túnel / de tres brazos - TZ3

Figura 31 Jumbo. Catálogo - Direct Industry, 2.015.



Especificaciones: Jumbo de tres brazos

Superficie cubierta:

Mín.: 0 m² (0 ft²)

Máx.: 180 m² (1937.5 ft²)

Altura de perforación:

Mín.: 0 m (0' 0")

Máx.: 13.08 m (42' 11")

Descripción - Perforadora jumbo para túnel / de tres brazos TZ3

Perforadora de rocas: La perforadora de rocas hidráulica adopta la tecnología estructural especial en combinación con la tecnología de construcción de túneles, caracterizándose por su alta resistencia a la flexión, alta velocidad de perforación y bajo consumo de barra de perforación, etc., para mejorar efectivamente el rendimiento de uso en la perforación lateral de túneles.

Impulsor: Dispone de la viga de aleación de peso ligero y alta resistencia, se caracteriza por la resistencia a flexión, torsión y la fatiga, con más larga vida útil.

Chasis: Adopta el motor de ahorro energético, protección ambiental y bajas emisiones, y sistema de traslación autoadaptable con fuerte potencia, todo terreno y todo accionamiento; adopta el armazón entero, dirección por rueda trasera, resultando en una alta estabilidad del vehículo completo.

Pluma de perforación: Adopta la técnica exclusiva para mantener la pluma de perforación en paralelo a 360°, con posicionamiento preciso; la estructura de la pluma de perforación adopta el diseño de resistencia igual, con estructura razonable, alta resistencia y larga vida útil.

Sistema de perforación: Tiene las funciones de protección automática contra el atasco de barra de perforación, protección contra la perforación vacía y retirada automática de la barra de perforación, para mejorar efectivamente la eficiencia de perforación.

El Catalogo de la empresa KRHAM (2.015) presenta una serie de accesorios como son: barrenos, brocas de perforación y los manguitos (ver Figura 32). A continuación se da una descripción de cada uno de estos elementos.

- **Brocas de perforación:** Herramienta de corte de metal endurecido (carburo de tungsteno). En forma de cruz, “X” o tipo botón; Diámetros: 45 – 102 mm.
- **Manguitos:** Son el accesorio de acoplamiento entre barra y barra, ya sea del mismo diámetro o diferente, para casos en los que es necesario perforar terrenos con un diámetro menor al que permite la barra de perforación, y así resolver problemas puntuales sin grandes inversiones.
- **Barrenos o culatas:** Son barras de acero con un conducto interior para el paso del agua de refrigeración y unas roscas en los extremos donde se acoplan las brocas o los manguitos.

Figura 32 Brocas de perforación, manguitos y barrenos o culatas. Modificado del Catálogo – KRHAM, 2.015.



Rodríguez, R., Adasme, E. y Pinto, A (2.012) comentan que la longitud de los taladros debe ser entre 5 a 10 % más largos del avance que se espera realizar, dadas las perdidas que se generan en la detonación (ver Tabla 21).

Tabla 21 Pérdidas en detonación. Modificado de Villagary, 2.014.

Taladro (m)	Longitud adquirida con la detonación (m)	Perdida (m)	% de perdida
3	2,8	0,2	6.66
3,5	3,2	0,3	8.57

2.9.3. Carga de explosivos.

Colombia cuenta con la Norma Técnica Colombiana NTC 3966 correspondiente al “transporte de mercancías peligrosas clase 1. explosivos. transporte terrestre por carretera”, donde especifican que hay 5 tipos de explosivos permitidos a utilizar que son los siguientes:

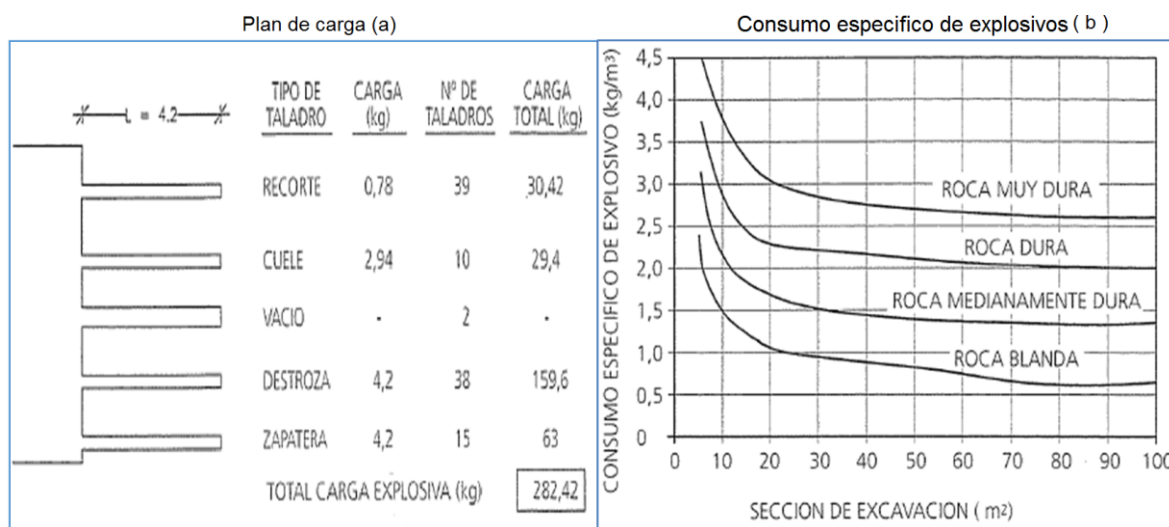
1. Sustancias compuestas por nitratos orgánicos líquidos.
2. Sustancias compuestas por una mezcla de nitrato amónico o nitratos inorgánicos con explosivos tales como el trinitrotolueno que no deben contener nitroglicerina, nitratos orgánicos, líquidos similares ni cloratos.
3. Sustancias compuestas por una mezcla de clorato potásico o sódico, o perclorato potásico, sódico o amoníaco.
4. Sustancias compuestas por una mezcla de nitratos orgánicos con materias combustibles como hidrocarburos o aluminio en polvo.
5. Sustancias que contienen agua, como ingrediente fundamental, y una gran proporción de nitrato amónico u otros oxidantes.

El uso del explosivo adecuado para túneles depende de las condiciones de la zona.

La cantidad de explosivos a utilizar depende de la resistencia que presente la roca (ver Tablas 17, 18 y 19), se pueden encontrar en condiciones: muy dura, dura, medianamente dura o blanda, el consumo específico de explosivos es proporcional a la resistencia como se describe en la Figura 33 (b).

En la Figura 33 (a) está el plan de carga desarrollado para el esquema de tiro de la Figura 27, además se describe las características desarrolladas para cada zona correspondiente a la cantidad de perforaciones con taladros y la cantidad de carga suministrada a cada perforación y de tal manera se puede calcular el total de carga explosiva.

Figura 33 Consumo específico de explosivos. Rojas, 2.009.



2.9.4. Voladura.

La voladura es la etapa final o detonación sobre el área del frente del túnel y se realiza luego de tener completas todas las perforaciones e introducir la cantidad adecuada de explosivos en cada uno de los orificios.

2.9.5. Retirada de escombros y saneo del frente, bóveda y hastiales.

Independientemente del proceso que es implementado para excavar, el material extraído debe de retirarse inmediatamente sea por medio de volquetas, vagones, bandas transportadoras o cualquier otro. Retirado el material se debe de aplicar el saneo, que usualmente consiste en aplicar concreto lanzado y de ser necesario instalar pernos o bulones.

2.10. NUEVO MÉTODO AUSTRIACO - (N.A.T.M.)

El NUEVO MÉTODO AUSTRIACO – [New Austrian Tunneling Method] - (N.A.T.M.). Es un método de construcción para túneles en el que se aplica todo lo relacionado con los métodos mecánicos, perforación y voladura.

Alonso (2.002) hace una descripción del N.A.T.M. el cual consiste en la integración del terreno en contorno a la excavación en el anillo estructural auto soportante formado entorno a la cavidad. El propósito de este método es llevar el estado tensional del macizo rocoso entorno al túnel hasta un punto de equilibrio en que el sostenimiento controla las deformaciones que se presenten. Esto se realiza a través de técnicas de auscultación y medida de convergencias, para controlar las deformaciones en todo momento y evitar que estas sean excesivas y de tal forma construir el túnel minimizando costos y generando más seguridad.

Los pasos de este método son:

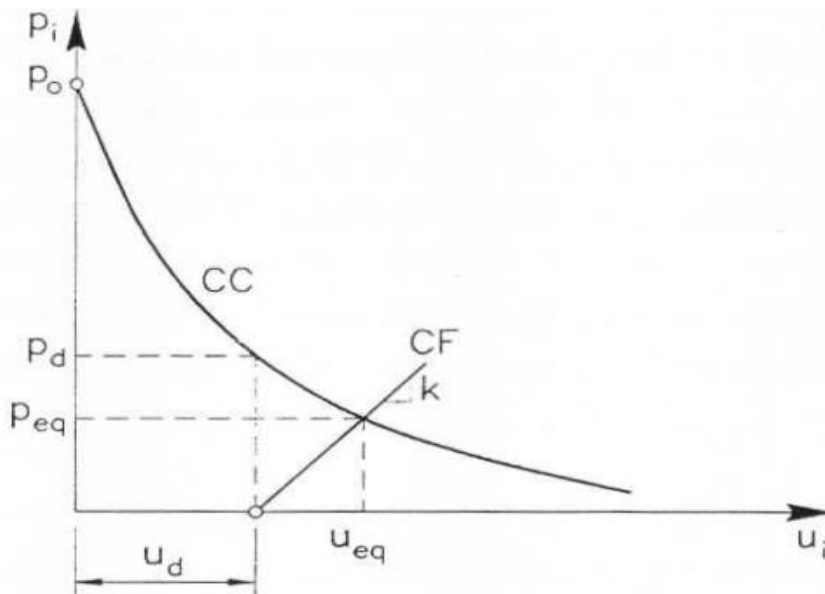
- Excavación cuidadosa del terreno
- Elección de la sección según características geomecánicas
- Sistema de ejecución adaptado a las condiciones del terreno
- Auscultación

Inicialmente el método N.A.T.M. estudia las curvas características del túnel para las distintas litologías a atravesar, con el fin de comparar si las excavaciones realizadas son acordes al estudio, a continuación se explicara el proceso.

En la Figura 34 se observa una curva característica de determinada litología (CC) y otra curva al sostenimiento (curva de confinamiento), ambas se intersectan en un punto, el cual es el punto de equilibrio entre el túnel y el sostenimiento, “cuando se alcancen la presión P_{eq} y el desplazamiento U_{eq} comunes a las dos curvas CC

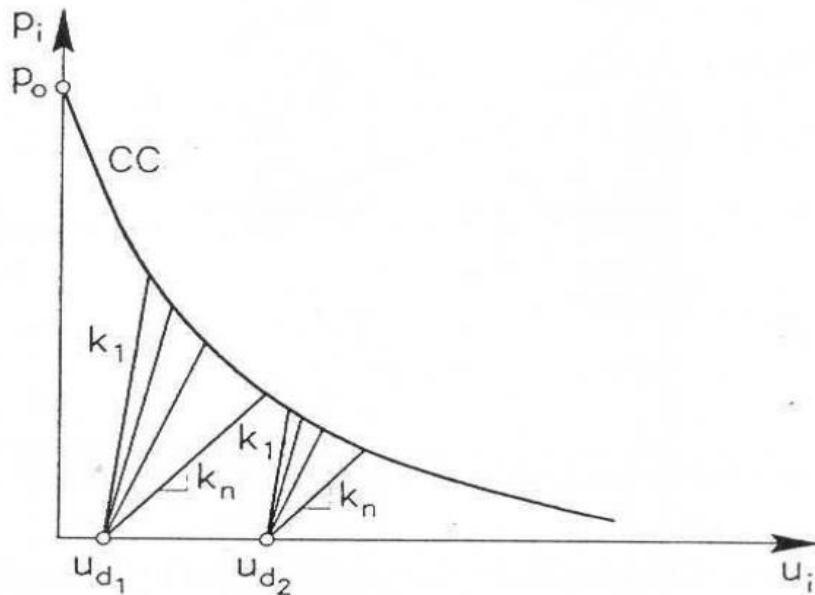
y CF. La distancia U_d , hace referencia a la distancia al frente de la excavación del sostenimiento colocado, e indirectamente, a la deformación transcurrida antes de colocar el mencionado sostenimiento.”

Figura 34 Curva de confinamiento. Abando, 2.015.



Conociendo el punto de intersección de estas curvas, el objetivo o propósito es el de controlar la convergencia del túnel a través del proceso de excavación y realizar el sostenimiento en el momento indicado en que el estado tensional del macizo rocoso llegue a su límite. En la Figura 35 se puede observar claramente los puntos en donde se realizan los sostenimientos (U_{d1} y U_{d2}), también se observan distintos tipos de rigideces (k_1 y k_n).

Figura 35 Interacción túnel-sostenimiento. Abando, 2.015.



Los tipos de sostenimientos que se aplican en este método son:

- Bulones
- Cerchas
- Hormigón proyectado (HP)

2.11. SISTEMAS DE SOPORTE Y REVESTIMIENTO

Echeverría (2.013) describe el soporte en la construcción de túneles como un dispositivo colocado con el objetivo de ayudar en la función de sostener las paredes de la excavación tales como: bulones, mallas electro soldadas, arcos metálicos, cerchas, pernos y concreto lanzado. Cumplen la función de reforzar el trabajo auto-portante del terreno al mismo tiempo que lo rigidiza. Se instala una vez se termina parcial o totalmente el retiro de material que compone la sección transversal del túnel, y su función puede tener el alcance de estabilizar el terreno para que los trabajos de excavación se adelanten en condiciones seguras para

luego completar el refuerzo con un revestimiento estructural que garantice la durabilidad de la obra.

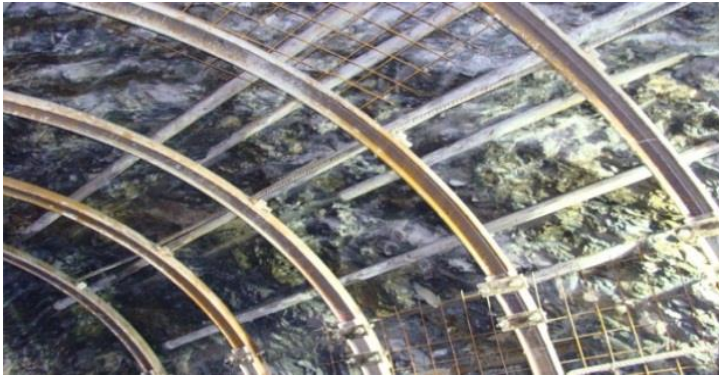
Echeverría (2.013) explica que el revestimiento, sirve para mejorar el aspecto estético y las características operacionales del túnel, ya que en su interior se alojan las instalaciones eléctricas, drenajes, redes de telefonía y cableado en general; por otra parte se mejora la rugosidad de las paredes internas dando un mejor aspecto visual y mejores condiciones para el flujo de aire, agua o cualquier otro fluido que se quiera transportar.

2.11.1. Cerchas y arcos metálicos.

Considerando la documentación de la empresa TEDENZA las cerchas son consideradas como un sistema clásico de sostenimiento pasivo, con utilización preferencial en terrenos de mala calidad – terrenos blandos. Los arcos de acero ofrecen la ventaja de ser resistentes tanto a los esfuerzos de tracción como de compresión, permitiendo de este modo la acción de cargas que lo exigen a flexión. Los arcos metálicos en el momento de la instalación deben quedar haciendo presión al terreno para que de este modo trabajen y den soporte al terreno.

La conformación de los arcos se realiza a través de perfiles en formas de I, H y U. Estos perfiles se seleccionan dependiendo de las características del macizo rocoso. En muchas oportunidades, cuando el arco y el macizo no se estabilizan, indicando de esta forma que no hay equilibrio de cargas, es necesario recurrir adicionalmente a los pernos y al concreto lanzado. El perfil del arco y la separación entre estos se determina por cálculos estructurales considerando la magnitud de la zona de descompresión, la fuerza que ejerce y la resistencia a la flexión del perfil (ver Figura 36).

Figura 36 Arcos. TEDENSA, 2.015.



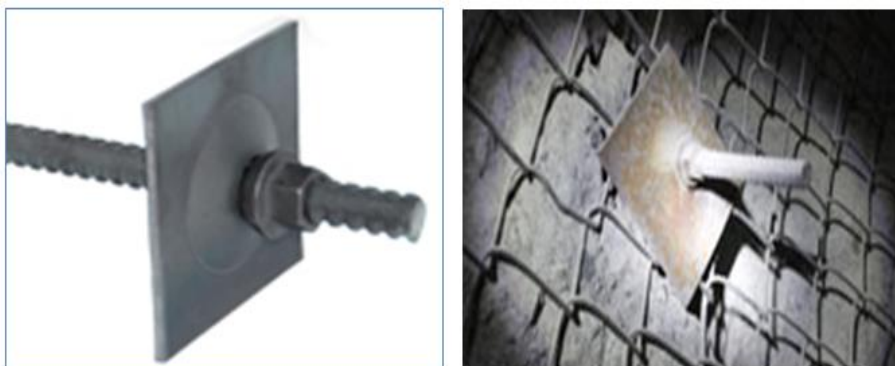
2.11.2. Pernos.

Martínez (2.011) describe estos elementos estructurales como compuestos de varillas de acero o polietileno. El perno se aloja en el barreno previamente ejecutado, anclándose a este mediante un dispositivo mecánico en la punta o un relleno en toda o parte de la longitud del hueco con mortero o cartuchos de resina epoxica. En el contorno del túnel el perno sobresale un poco exhibiendo una textura roscada, para luego mediante una platina y una tuerca ajustarse al macizo rocoso (ver Figura 37). Luego se realiza la prueba de carga con el fin conocer cuál es la carga máxima en psi que está ejerciendo el perno.

Barrett, 2.008 describe a través de “la guía minova para pernos con resina” el propósito de estos elementos, el cual es activar, conservar y aumentar la resistencia inherente (a la tensión y el cizallamiento) de los estratos y mantener su capacidad de sostenimiento de carga.

Estos elementos de refuerzo modifican el comportamiento interno de la masa rocosa denominados ‘métodos activos’ de soporte. Estos elementos están destinados a reaccionar ante el movimiento de la masa rocosa, desarrollar una fuerza de refuerzo y transferir esta fuerza de vuelta a la masa rocosa. Esto contrarresta la fuerza motriz y puede que se alcance el equilibrio.

Figura 37 Pernos. Catalogo - Garibaldi S.A., 2.015.



2.11.3. Concreto lanzado.

Martínez (2.011) explica los dos procesos para la aplicación del concreto lanzado en la actualidad, el concreto lanzado por vía seca y el concreto lanzado por vía húmeda (ver Figura 38). El primero se define como una mezcla de cemento, agregados gruesos con finos y aditivos, conducida a través de una manguera y proyectada neumáticamente a alta velocidad sobre una superficie, agregando el agua en la boquilla.

El concreto lanzado por vía húmeda sea reforzado o no con fibras, se define como la mezcla del cemento, agregados gruesos y finos, agua, aditivos y fibras, preparado en una planta dosificadora con anterioridad a la conducción y aplicación de la mezcla mediante la máquina impulsora.

Vargas, 2.011 dice que el concreto lanzado es un elemento de un sistema integral de soporte. Es relevante que la capa de concreto sea lo suficientemente delgada para que sea flexible y se acomode a los cambios de forma sin presentar grietas. Se sugiere que el concreto lanzado se aplique reforzado con mallas, fibras metálicas o fibras sintéticas, con el objeto de lograr una resistencia adicional a la flexión, este tipo de soporte primario es aplicado para terrenos blandos y en rocas con el objeto de dar el primer soporte en interacción con los pernos de roca

pasivos y los arcos de acero, como controlador del desarrollo de esfuerzos y deformaciones.

Los requerimientos principales de la mezcla para concreto lanzado por vía húmeda son los siguientes y se centran en la manejabilidad y durabilidad.

- Alta resistencia inicial.
- Buen bombeo (suministro de flujo denso).
- Adecuadas características de fraguado del concreto.
- Diseño de mezcla adecuado para lanzar.
- Manejabilidad adecuada para el operario.
- Rebote mínimo.

Figura 38 Concreto lanzado, Ochoa, 2.014.



2.11.4. Mallas metálicas.

Son elementos estructurales (ver Figura 39), que suministran resistencia a esfuerzos de tensión en el contorno del túnel utilizados con mayor frecuencia en terrenos blandos, en la actualidad se ha comprobado que la implementación de fibras sintéticas dan mejores resultados, las mallas metálicas además reducen los efectos de retracción de fraguado y disminuyen las pérdidas de materiales por rebote al emplear concreto lanzado.

Vargas, 2.011 comenta que la dosificación de la fibra sintética va de entre 3 y 20 kg/m³. Entre sus principales características están: resistencia a la tensión es de 550 MPa y un módulo de Young de 6Gpa. Dentro de sus beneficios esta la reducción de costos, capacidad de reforzar igual que el acero, mínimo desgaste en mangueras y bomba, cero corrosión, larga durabilidad, mejor manejabilidad comparada con las fibras de acero.

Figura 39 Mallas electro soldadas. Frutos, 2.015.



2.12. CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN MATERIALES BLANDOS.

En el siglo XX, a raíz del desarrollo de la construcción de túneles ferroviarios en diferentes países, se establecen diferentes métodos (ver Tabla 22) de excavación por secciones de acuerdo a las características del terreno, estableciendo nombres a los métodos tradicionales según donde se hayan construido. El método Belga es uno de ellos, su nombre fue asignado por la construcción de un túnel en Bélgica para el canal de Charleroi en el año 1.968 a través de una colina con arenas movedizas.

2.12.1. Métodos tradicionales.

Entre los métodos tradicionales más conocidos e implementados para la excavación de túneles en terrenos blandos son: método Inglés, método Belga, método Alemán y el método Austriaco. Conocidos como métodos tradicionales, ver Tabla 22 y Figura 40.

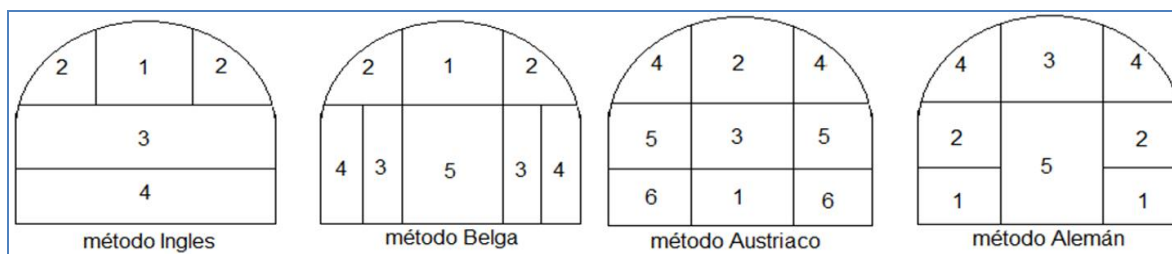
Tabla 22 Métodos tradicionales de excavación en túneles. Modificado de López, 1.997.

MÉTODO DE EXCAVACIÓN	PRIMER USO	AÑO
Método Inglés	Túnel bajo el Támesis	1.825
Método Belga	Túnel de Chaleroi	1.828
Método Alemán	Túnel en el canal de San Quintín	1.803
Método Austriaco	Túnel de Oberau	1.837

Según Rodríguez (2.014) en la excavación de terrenos blandos podemos encontrar materiales como: arcillas, areniscas, margas, argilitas y limolitas.

La Figura 40 presenta los métodos de excavación para terrenos blandos en túneles y describen mediante el orden numérico la secuencia de excavación en cada una de ellos, los cuales son por tramos y secciones; la metodología en cada uno de estos es similar ya que sin importar el orden de excavación siempre se procede a realizar un sostenimiento o entibación mediante apoyos y recortes de madera (ver Figura 41) en todas las caras (bóveda, hastiales y el frente de ataque), dando forma a un encofrado o revestimiento con el objetivo de dar seguridad, este proceso se realiza con cada sección hasta obtener la excavación total de los elementos del túnel, la implementación de algún método de estos depende de la condiciones de la zona o terreno y de la dimensión del proyecto.

Figura 40 Métodos tradicional para terrenos blandos. López, 1.997.



Para estos procesos de excavaciones (métodos tradicionales) se usa herramientas menores, martillos manuales y maquinaria para remoción de tierras. Los sistemas de sostenimiento o entibación deben ser apropiados para las condiciones que presente el terreno, si cambiaran las características de los suelos blandos a roca se tendría que implementar maquinaria de perforación o dado el caso de voladura.

Figura 41 Sistemas de sostenimiento en método tradicional. Modificado de Reyes, 2011.

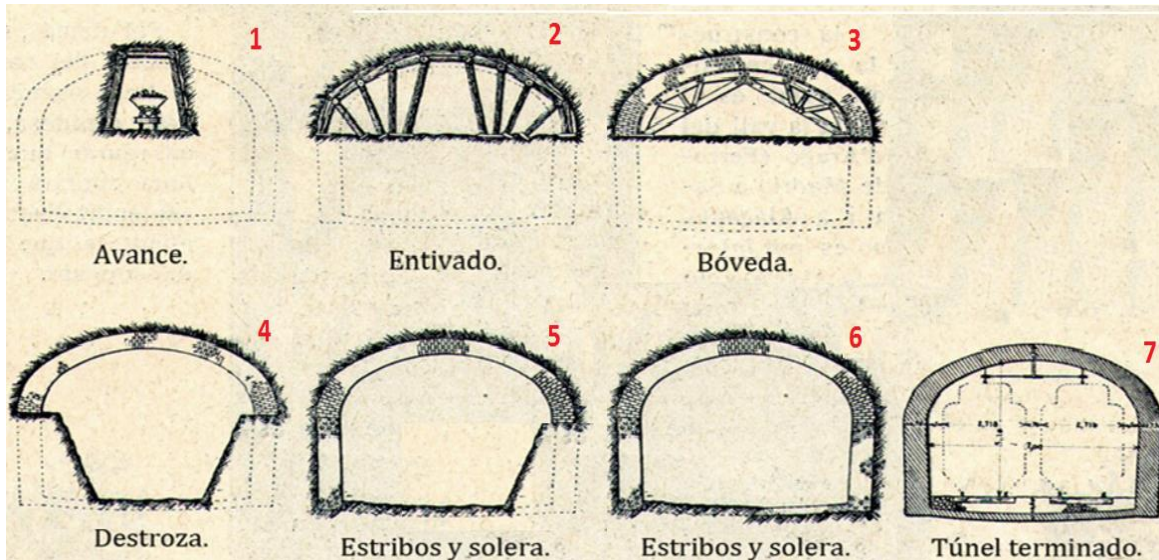


La Figura 42 describe a través del orden numérico el proceso completo de la excavación por secciones en el método tradicional. En todos los avances que se realicen se debe colocar apoyos de madera.

Rodríguez (2.014) explica el proceso del método tradicional, inicialmente se realiza una pequeña excavación o galería en el centro de la bóveda (1 m de ancho x 2,5 m de longitud de avance), luego se comienza a excavar a ambos costados para poder ubicar perfiles metálicos apoyados contra la parte inferior, En el tercer paso se procede al encofrado y hormigonado correspondiente a la bóveda. Luego se procede a excavar en la destroza dejando entre 1 a 1,5 metros de distancia de los

hastiales y avanzando hasta la contrabóveda, El quinto y sexto paso se realiza por excavación de bataches con gran precaución, primero en un hastial y luego en el otro, para terminar se excava la sección de la contrabóveda y se realiza el hormigonado.

Figura 42 Proceso del método tradicional. Modificado de Reyes, 2011.



2.12.2. Máquinas para terrenos blandos.

TBM para terrenos blandos

Bohórquez (2.013) da a conocer los diferentes tipos de TBM que se utilizan para suelos blandos, que son los siguientes:

2.12.2.1. TBM, tipo Hidroescudo Cerrado.

Se utilizan en sitios donde se tiene mucha inestabilidad en el frente de excavación debido a las condiciones geológicas y donde predominan los suelos granulares con mucha agua. La cabeza de corte de éstas tuneladoras trabaja inmersa en lodo bentonítico, al cortar transporta el lodo mezclado con el suelo hacia una cámara

de escombros donde la máquina controla la presión y compensa cualquier variación de presión de forma inmediata (ver Figura 43).

Figura 43 TBM – Hidroescudo. Bohórquez Néstor, 2.013.



2.12.2.2. TBM, Tipo Balance de Presión de Tierras Cerrado (EPB)

Se utilizan para excavar en suelos blandos, arcillosos, suelos arenosos y arenas limosas, éstas máquinas transmiten la presión a la cara por medios mecánicos a través de un suelo granular y la reducen a lo largo de un tornillo transportador (ver Figura 44).

Figura 44 TBM- Balance de Presión de Tierras Cerrado (EPB). Bohórquez, 2.013.



2.12.2.3. TBM, tipo Excavación Mecánica Abierta.

Son máquinas que excavan con discos cortadores en toda la cara para materiales granulares, poseen compuertas y guillotinas ajustables para el material cortado (ver Figura 45).

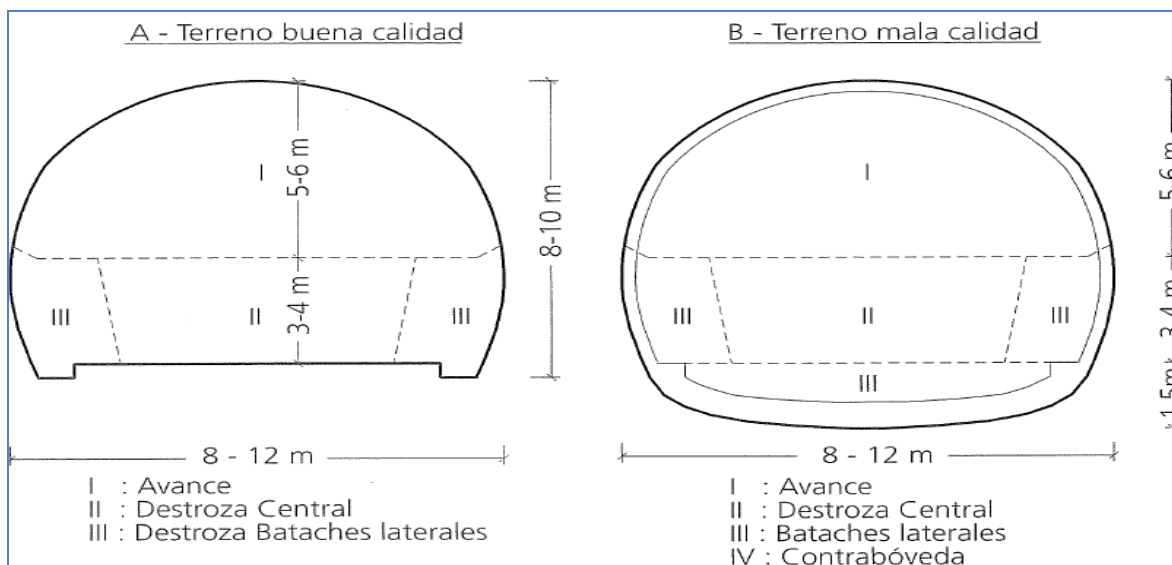
Figura 45 Tipo Excavación Mecánica Abierto. Bohórquez Néstor, 2.013.



2.12.3. Fases de excavación.

Los terrenos blandos los encontramos de buena calidad y mala calidad, la diferencia radica en la construcción adicional de la contra bóveda para terrenos de mala calidad (ver Figura 46), el motivo es de generar mejor cimentación y mejor distribución al soporte de carga por parte de los hastiales.

Figura 46 Fases de excavación. Modificado de Reyes, 2.011.



3. CAPÍTULO 3 – ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE TÚNELES VIALES EN COLOMBIA

El siguiente capítulo se obtuvo con información de documentos de investigación de la Pontificia Universidad Javeriana, la Universidad Nacional de Colombia, artículos de entidades públicas y privadas que interactúan e intervienen con la construcción y avances de túneles viales en Colombia además de investigaciones generadas por estudiantes o intelectuales conocedores del tema.

A través de la recopilación de datos ya mencionada se informara de las características de los túneles en Colombia como: nombre del túnel, año de construcción, ubicación, descripción del suelo o roca, longitud, ancho, pendiente, métodos y características de excavación entre otros; esta información se observara en sistemas gráficos para identificar los periodos de mayor y menor construcción de este tipo de obras. También se contará una breve descripción o reseña histórica de la evolución de la construcción de túneles viales en Colombia.

3.1. EVOLUCIÓN DE TÚNELES EN COLOMBIA.

A continuación se describirán las características y procesos constructivos de algunos túneles en Colombia a través de la historia, con el fin de conocer la evolución en la construcción en Túneles viales.

3.1.1. Siglos XVI – XIX

Ardila y Rodríguez (2.013) reportan que la evolución de túneles en Colombia inicio con los caminos precolombinos que fueron mejorados durante la ocupación española, resaltando un camino entre Sogamoso y Yopal construido entre los siglos XVI y XIX en el sector de El Morro y Labrazagrande, en aquel lugar existen dos túneles peatonales de una longitud no mayor a 25 metros; aunque son muy

pequeños, estos constituyeron las primeras muestras relevantes de túneles para el transporte de personas, bienes y mercancías.

3.1.2. Periodo entre 1.910 y 1.930.

En la página web de la alcaldía de Sibaté, Cundinamarca (2.015) se reporta que para poder movilizar diferentes tipos de productos en el año 1.895, se inició la construcción del ferrocarril del sur; este importante medio contribuyo al desarrollo de la región, su trazado fue proyectado entre Bogotá y Soacha, en 1.903 llegó a Sibaté y en 1.912 se inició el tramo que llevaría al Salto de Tequendama y que sólo se concluyó hasta 1.927. En ese último tramo se requirió demoler una gran zona, con tal laboriosidad que hoy se constituye en una de las más preciadas riquezas arquitectónicas que es el Túnel de Sibaté, el material de la zona es roca que fue tallada y moldeada (probablemente con ayuda de explosivos), labor que se realizó entre 1.916 y 1.921 aproximadamente. En la actualidad este túnel comunica a Sibaté con Fusagasugá y fue acondicionado como un túnel vial.

Mora (1.999) reporta que entre los primeros túneles ferroviarios en Colombia está el túnel de La Quiebra inaugurado el 7 de agosto de 1.929, luego de tres años de construcción, aunque fue un túnel ferroviario es de elogiar sus 3.742 metros de construcción para la época, pues en aquel entonces no se tenían a un estudios geológicos, maquinaria eficiente, métodos de construcción, ni experiencia, pero sin importar estas circunstancias fue ejecutado y llegó a ser el segundo más largo en América Latina y el séptimo en el mundo, se removieron cerca de 110.532 metros cúbicos de roca, se emplearon 540.000 libras de dinamita , se importaron 7.540 barriles de cemento además los estudios sobre el terreno se hicieron con taladro de diamante en varias perforaciones, con el fin de conocer la estructura geológica de la cordillera, la construcción se realizó en dos frentes, la metodología constructiva consistía en el uso de técnicas de sostenimiento (métodos tradicionales) y voladura, el revestimiento del túnel fue con arcos en concreto y

muros laterales de piedra y cemento; Son condiciones y actividades que se realizaron con gran esfuerzo humano y económico, pero que especialmente demuestran que se pueden desarrollar proyectos de gran magnitud con esfuerzo, persistencia y calidad.

Ardila (2.010) Señala el túnel ferroviario de Suesca, construido en 1.921 y que atraviesa el cerro Loma Larga en la vereda Chitiva Alto en el municipio de Suesca, su longitud no supera los 100 metros. El otro túnel reportado es el Túnel ferroviario de Avenida Cervantes, en la ciudad de Manizales inaugurado en 1.926 con una longitud de 71 metros.

Ardila y Rodríguez (2.013) comentan el abandono de los anteriores túneles ferroviarios ejecutados entre la primera y segunda década del siglo XIX:

1. Túnel de Sibaté (fue adaptado para túnel vial y comunica Sibaté con Fusagasugá).
2. Túnel de Suesca (está abandonado).
3. Túnel de La Quiebra – Antioquia. (está abandonado).
4. Túnel Avenida Cervantes – Manizales (fue adaptado para túnel vial hasta el año 1.990 cuando fue demolido).

3.1.3. Periodo entre 1.930 y 1.950.

Ardila y Rodríguez (2.013) reportan que después de la construcción del túnel de La Quiebra en 1.929 no se realizó ningún túnel vial hasta el año de 1.950. Por qué el transporte de carga a través de camiones dio inició con la construcción de nuevas carreteras en todo el país, la mayoría de las vías fueron construidas en terrenos montañosos uniendo los principales centros urbanos, durante este proceso surge la necesidad de emprender nuevamente la construcción de túneles por motivos de la orografía Colombiana fundamentalmente en el control de la estabilidad de taludes.

Aunque es de resaltar el proceso de construcción en los túneles ferroviarios especialmente en el túnel de La Quiebra y la adecuación de algunos de ellos como túneles viales, Colombia experimenta hasta el año 1.950 la construcción de los primeros túneles para vehículos.

3.1.4. Periodo entre 1.950 y 1.970.

Ardila y rodíguez (2.013) hacen un recuento de los primeros túneles carreteros en Colombia ubicados en el departamento del Valle del Cauca donde se construyeron cinco túneles en 1.950 e inaugurados en 1.966, en la Vía Buga – Buenaventura con longitudes entre 85 y 480 metros, los cuales comunican el Valle del Rio Cauca con el Pacífico, atravesando la Cordillera Occidental por el cañón del rio Dagua. Fueron construidos por medio de sistemas mecánicos, realizando sostenimientos con concreto lanzado primario, soportes con malla electro soldada y concreto lanzado secundario. La maquinaria usada fue jumbos, martillos de perforación, retroexcavadoras y volquetas. Actualmente están en servicio y destinados a complementar el Proyecto Loboguerrero – Cisneros.

Ramírez (2.012) habla que la construcción de túneles está ligada a la metodología constructiva, que es establecida por la autonomía del contratista, teniendo en cuenta las características del tipo de terreno: roca o suelos. Es usual que las excavaciones en túneles de carretera presente terrenos de roca, por lo tanto se implementan sistemas de perforación y voladura o excavación mecánica.

3.1.5. Periodo entre 1.970 y 1.990.

El SERVICIO DE INGENIERÍA LTDA (2.010) comenta que en 1.970 se inicia la construcción 15 túneles viales con longitudes entre 91 y 1.649 metros para una longitud total de 7.225 metros en la vía Guateque, Boyacá (ver Tabla 17), atravesando la Cordillera Oriental con la finalidad de construir el proyecto de

Chivor. El proceso constructivo de la gran mayoría de ellos se hizo por medio del método tradicional, designando el orden de excavación de las secciones de acuerdo a las condiciones del terreno, con sostenimiento de arcos metálicos, refuerzo con arcos de acero, estos con separación de 1.40 m, concreto neumático lanzado, mallas y pavimento de concreto hidráulico.

Tabla 23 Listado de los túneles de la carretera Guateque - Santa maría, SERVICIOS DE INGENIERÍA LTDA (2.010)

	Túnel	Longitud (m)
1	Las Juntas	207
2	Pozo Azul	292
3	El Infierno	490
4	El Volador	236
5	El Trapiche	91
6	EL Ventarrón	615
7	El Salitre	639
8	El Polvorín	1649
9	La Esmeralda	454
10	La Presa	472
11	Pluma de Agua	769
12	La Cascada	489
13	Moyas	351
14	Muros I	134
15	Muros II	337
	Longitud total	7725

También se construyó en el año de 1.970 en el departamento de Antioquia el primer túnel de Guarne con 270 metros de longitud en la carretera Medellín – Bogotá.

FONADE (FONDO FINANCIERO DE PROYECTOS DE DESARROLLO) (2.014)
Describe que en el proceso constructivo del Túnel Peñalista (208 m) y el Túnel La Llana (206 m) en el año 1.972 en el departamento de Nariño, ambos implementaron el mismo proceso: concreto convencional en los portales de entrada y salida, concreto lanzado y convencional en el interior, la superficie de rodadura es con pavimento flexible sobre pavimento de concreto y el revestimiento en ambos túneles fue con acero de refuerzo. El proceso de excavación fue con sistemas mecánicos y voladura.

Ardila (2.010) especifica que de 1.973 hasta 1.976 en el departamento de Caldas se construye el túnel El Espejo con una longitud de 125 metros, por otra parte en 1.975 se construyen los primeros túneles vía Bogotá – Villavicencio conocidos como Quebrada Blanca I y II con longitudes de 420 y 248 metros, contruidos con métodos de perforación y voladura sin ningún tipo de sostenimiento y revestimiento.

En la década de 1.980 se trabaja en la construcción de los túneles viales del Proyecto del Guavio en la vía Mambita Palomas hasta el año 1.989 entre los que está el túnel Ubalá y el túnel de Miraflores. Por otra parte se realizaron 5 túneles cortos de longitud total de 1.028 m, en la carretera Altamira – Florencia terminados en el año 1.993.

Es de importancia establecer que el auge en Colombia en la construcción de túneles viales fue finalizando el siglo XX y está marcado por los siguientes túneles: Misael Pastrana Borrero (Túnel de Buenavista), Argelino Durán Quintero (Túnel de Boquerón) y Fernando Gómez Martínez (Túnel de Occidente).

3.1.6. Periodo entre 1.990 y 2.000.

En 1.993 inicia la construcción del túnel de la Llorona con una longitud de 450 metros entre la vía Medellín al Golfo de Urabá y finaliza en 1.995. Por otra parte en la carretera entre Neiva y Florencia (Huila y Caquetá) se construyen cuatro túneles que suman una longitud de 1.125 metros.

En el departamento del Meta en la vía Bogotá – Villavicencio, se construye el túnel de Bijagual con una longitud de 189 metros en el año de 1.995, el cual fue muy importante por cumplir con diferentes normas y altas especificaciones (ver Tabla 24).

El periódico El Tiempo (1.997) reporto que el túnel Misael Pastrana Borrero o Buenavista con una longitud de 4.520 metros, inicio la construcción en 1.999 y

está en funcionamiento desde el 2.003 (ver Tabla 24). Fue construido con una estructura adecuada (soportes, pernos, malla electro soldada, concretos, impermeabilización y recubrimiento). Para ello se implementó sistemas de excavación mecánica.

Rey (2.006) describe que el túnel Argelino Durán o Boquerón terminado en 1.999 con una longitud de 2.405 metros y está situado a una altura de 3.020 m.s.n.m, siendo uno de los túneles viales más altos del mundo (ver Tabla 25). Se construyó por el sistema de perforación y voladura para media sección. La construcción se realizó con la tecnología del sistema N.A.T.M. y sistemas de excavación mecánica.

Tabla 24 Descripción de los túneles Bijagual y Buenavista. Modificado de Amaris y Mayorga, 2.008.

CARACTERISTICAS DE LOS TÚNELES ACTUALES		
	Túnel de Buenavista	Túnel Bijagual
Localización	km 77 + 830.00 – km 82 + 350.00 Vía Bogotá - Villavicencio	km 77 + 294.00 – km 77 + 483.00 Vía Bogotá - Villavicencio
Altura	633.27 m.s.n.m. - 750.21 m.s.n.m.	760.00 m.s.n.m. - 761.00 m.s.n.m.
Año de puesta en servicio	2.003	2.003
Número de túneles	1	1
Número de carriles	2	2
Tipo de tráfico	Bidireccional	Bidireccional
Longitud total	4,520 m	185 m
Pendiente del túnel	2,60%	1,00%
Diferencia de niveles entre portales del túnel	117 m	9,25 m
Ancho del túnel	8,44 m	8,44 m
Ancho de calzada	7,0 m	7.5 m
Galibo del túnel	4,5 m	4,9 m
Máxima altura del túnel	6,3 m	6,3 m
Área de sección	48 m ²	48 m ²
Perímetro de la sección	26 m	Perímetro de
Revestimiento de la sección	Concreto convencional	Concretó convencional
Altitud promedio	691,6 msnm	762,3 msnm

Tabla 25 Descripción del túnel Boquerón. Modificado de Amaris y Mayorga, 2.008.

CARACTERÍSTICAS DEL TÚNEL BOQUERÓN	
Localización	km 01 + 072.00 - km03 + 477.00 Vía Bogotá - Villavicencio.
Altura	2954.00 m.s.n.m. - 3010.00 m.s.n.m.
Número de túneles	1
Número de carriles	2
Tipo de tráfico	Bidireccional
Longitud total	2,405 m
Pendiente del túnel	2.4%.

El Túnel Fernando Gómez Martínez (Túnel de Occidente) inicio la construcción en 1.998 y fue inaugurado en 2.006 entre los municipios de Medellín y San Jerónimo, tiene una longitud de 4,6 km y está dotado con los mayores recursos tecnológicos. Tiene 42 cámaras de televisión, 800 lámparas y 220 kilómetros de cableado eléctrico. Cuenta con sistemas de ventilación e iluminación; el sistema contra incendios está conformado por tanques con capacidad de almacenamiento de 142.000 litros; también dispone de señalización general y modernos equipos de comunicaciones.

3.1.7. Siglo XXI.

Durante la primera década del siglo XXI se inició y finalizo la ejecución de varios proyectos de túneles viales entre ellos: el Túnel Sumapáz, Túnel Daza y Túnel San Jerónimo. Los túneles fueron construidos satisfactoriamente y se encuentran en funcionamiento, sus características de construcción son las siguientes.

La ANI (Agencia Nacional de Infraestructura) (2.014) describe el proceso del Túnel Sumapáz, comentando que tiene una longitud de 4.2 km, ubicado entre la localidad del Boquerón y el Hotel Malachí. En esta área se encuentran afloramientos del Cretáceo, compuestos principalmente por arenisca con intercalaciones de limolita, lidita, lutita y arcillolita y rocas del Terciario como areniscas conglomeráticas y conglomerados, cubiertas en algunos sectores por coluviones compuestos por grandes bloques de arenisca en una matriz areno - arcillosa. El proceso constructivo del túnel fue a través del método convencional

de perforación y voladura. La etapa de excavación, soporte y revestimiento se llevó a cabo entre Octubre de 2.006 y Abril de 2.010. El sostenimiento fue realizado en arcos metálicos, concreto lanzado reforzado con fibras y malla electrosoldada, en tramos específicos, y pernos metálicos. En cortos tramos del túnel se requirió la construcción de solera curva debido al comportamiento y las deformaciones registradas, con lo cual se buscó cerrar el anillo de la sección y la estabilidad de la misma.

Burgos (2.013) describe que el túnel Daza se construyó utilizando el método de perforación y voladura, con avances diarios entre 0,30 y 2,5 metros, según la calidad del terreno encontrado, el sostenimiento fue desarrollado con arcos tipo celosía, que son vigas formadas con varillas de acero unidas con soldadura y con concreto lanzado. Este concreto fue tratado con aditivos químicos para hacerlo manejable y acelerar el fraguado, y con fibras sintéticas para mejorar sus características mecánicas. Una vez terminada la excavación, el túnel se impermeabilizó para impedir el flujo de agua y posteriormente se le dio un acabado con concreto lanzado y fue inaugurado en el año 2.012.

En la actualidad Colombia ejecuta ambiciosos proyectos de altas especificaciones (diseño geométrico, longitud, iluminación, ventilación, seguridad y sistemas de excavación) como la construcción de la doble calzada en el sector Bogotá – Villavicencio (2.010 - 2.017).

La CÁMARA COLOMBIANA DE INFRAESTRUCTURA (2.010) informa que el proceso constructivo para los 19 túneles en la Vía Bogotá – Villavicencio con una longitud total de 14,5 km está siendo ejecutado a través del método N.A.T.M., en él se utiliza excavación mecánica como: jumbos, martillos de perforación, mini cargadores, retroexcavadoras y volquetas, además las rocas que se presentaron en las excavaciones son de mayor resistencia que las definidas en los diseños y esto tuvo como resultado tener mayores avances hasta de 2.5 m/día.

Para finalizar con el repaso de la evolución de túneles en Colombia está la culminación del túnel de la línea o segundo centenario (2.009 – 2.016).

La CÁMARA COLOMBIANA DE INFRAESTRUCTURA (2.011) describe que el proceso para el túnel de la línea fue el método N.A.T.M., a diferencia de los de Villavicencio en este se utilizó sistemas de perforación y voladura controlada en terrenos duros y métodos mecánicos en terrenos de baja resistencia. Para la excavación en roca, se prevé la ejecución de la excavación en varias etapas: para terrenos duros la excavación se desarrolla en dos etapas, Bóveda y Destroza; para terrenos blandos en tres etapas, Bóveda, Destroza y Contrabóveda.

Según Ardila y Rodríguez (2.013) ante el impulso y la acogida de estas obras subterránea por sus grandes beneficios, están en procesos de estudios los corredores de Mariquita – Manizales con 50 túneles cortos de longitudes inferiores a (1) kilometro, por otra parte el corredor Buenaventura – Orinoquia está proyectado para desarrollar 75 km de túneles viales y en zonas como Mulaó – Loboguerrero, Túnel de Mulaó con una longitud de 3.360 metros y ocho túneles cortos; además de la vía Tobia grande - Villeta- El Korán contemplando la construcción de ocho túneles y para Bucaramanga - Cúcuta un túnel de una longitud de cerca de un kilómetro.

Según Ardila y Rodríguez (2.013) es de importancia mencionar que el Gobierno Nacional, a través de su Agencia Nacional de Infraestructura y como parte del programa de mejoramiento continuo de la malla vial, ha decidido estructurar las concesiones de cuarta generación - (C4G), dentro de las cuales se encuentra el denominado proyecto Autopistas de la Prosperidad, antes Autopistas de la Montaña, proyecto que desde el punto de vista de túneles y obras subterráneas se convierte en el más ambicioso de todos los tiempos, contemplando la construcción en sus diferentes tramos de aproximadamente 150 túneles en una longitud superior a cien kilómetros, consolidando de esta manera la experiencia y

capacidad tanto técnica como institucional que el país ha adquirido en los últimos años con miras a la consolidación de la misma en la próxima década.

3.2. TÚNELES EN COLOMBIA

Osorio (2.013) resalta que durante las últimas décadas, Colombia está realizando diferentes obras subterráneas especialmente en túneles carreteros. De esta manera, se convierte en una potencia en túneles carreteros en América Latina. La Tabla 26 Informa los túneles viales construidos por el INVIAS e INCO antes del año 2.002.

Para el año 2.002 Colombia tenía aproximadamente 33 túneles los cuales sumaban 18 km de longitud, y que fueron suficientes para que las empresas nacionales INVIAS Instituto Nacional de Vías e INCO Instituto Nacional de Concesiones, tuvieran un proceso de aprendizaje e iniciaran con los propios retos de ingeniería y la construcción de nuevos proyectos de túneles. (Ver Tabla 26)

Tabla 26 Túneles construidos antes del 2.002. Modificado de INVIAS, 2.007.

Buenaventura - Buga		
Túnel	Metros	Constructora
No 1	220	INVIAS
No 2	130	
No 3	100	
No 4	89	
No 5	482	
Pasto- Mojarra		
Túnel	Metros	Constructora
Peñalisa	208	INVIAS
La llana	206	
Bogotá - Santa María		
Túnel	Metros	Constructora
Juntas	206	INVIAS
Pozo azul	289	
Infierno	492	
Volador	236	
Trapiche	91	
Ventarrón	615	
Salitre	618	
Polvorin	1.649	
Esmeralda	453	
Presa	474	
Pluma de agua	749	
Cascada	490	
Moyas	150	
Muros I	132	
Muros II	337	

Bogotá - Villavicencio		
Túnel	Metros	Constructora
Quebrada blanca I	420	INCO
Quebrada blanca II	248	
Bijagual	185	
Boquerón	2.325	INVIAS
Altamira-Florencia		
Túnel	Metros	Constructora
No 1	167	INVIAS
No 2	200	
No 3	379	
No 4	379	
No 5	223	
Irrá - La Felisa		
Túnel	Metros	Constructora
Irrá	60	INVIAS
Dabeiba - Mutatá		
Túnel	Metros	Constructora
La llorona	455	INVIAS
Medellín - Puerto triunfo		
Túnel	Metros	Constructora
Guarne	273	INCO
Guarne	283	
Medellín - Santafé de Antioquia		
Túnel	Metros	Constructora
Occidente	4.605	INVIAS
Constructora	Túneles antes del año 2002	Metros
INVIAS	28	9.819
INCO	5	7.889
Total	33	17.708

A partir del año 2.002 fueron construidos y terminados los siguientes túneles por empresas nacionales, INVIAS e INCO para un total de 9 túneles y cerca de 20 kilómetros de longitud, ver Tabla 27.

Tabla 27 Túneles construidos a partir del año 2.002. Modificado de INVIAS, 2.007.

Medellín - Santafé de Antioquia		
Túnel	Metros	Constructora
Fernando Gómez Martínez (San Jerónimo)	4.600	INVIAS
Cajamarca- Calarcá		
Túnel	Metros	Constructora
Piloto de la línea	8.554	INVIAS
La estrella	326	
Los robles	882	
Los chorros	8.554	
Bogotá- Villavicencio		
Túnel	Metros	Constructora
Túnel falso	120	INVIAS
Barrancabermeja-Bucaramanga		
Túnel	Metros	Constructora
San pablo	409	INVIAS
Bogotá- Girardot		
Túnel	Metros	Constructora
Sumapaz	4.200	INCO
dos quebradas - santa rosa		
Ascenso en espiral	142	INCO
Túneles terminados con posteridad a 2.002	Constructora	Metros
7	INVIAS	15.493
2	INCO	4.342
Total		19.835

El INVIAS E INCO también reportan una tabla de los túneles construidos a partir del año 2.008, además de los que se encontraban en proceso de construcción y que actualmente ya fueron terminados, excepto el túnel del segundo centenario y los túneles de la segunda calzada Bogotá - Villavicencio (ver Tabla 28).

Tabla 28 Modificado de INVIAS, 2.009.

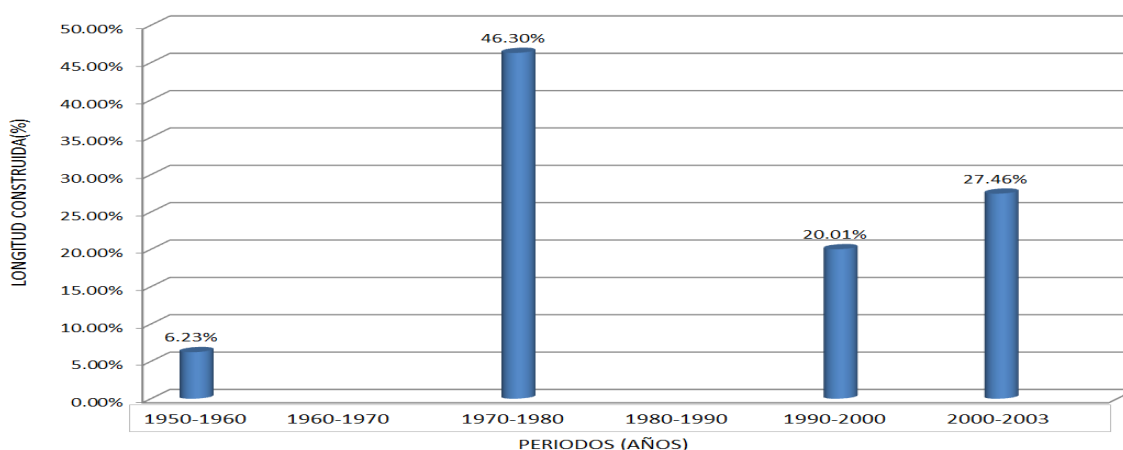
Túneles en construcción a partir del año 2.008																																																																																										
<table><tr><th colspan="3">Cajamarca - Calarcá</th></tr><tr><th>Túnel</th><th>Metros</th><th>Constructora</th></tr><tr><td>La Platanera</td><td>346</td><td rowspan="9">INVIAS</td></tr><tr><td>La Carmelita</td><td>271</td></tr><tr><td>El Oasis</td><td>129</td></tr><tr><td>Bermellón</td><td>215</td></tr><tr><td>Cinabrio</td><td>50</td></tr><tr><td>Australia</td><td>185</td></tr><tr><td>La Paloma</td><td>161</td></tr><tr><td>El Porvenir</td><td>171</td></tr><tr><th colspan="3">Buenaventura- Loboguerrero</th></tr><tr><th>Túnel</th><th>Metros</th><th>Constructora</th></tr><tr><td>Túnel No 1</td><td>800</td><td rowspan="13">INVIAS</td></tr><tr><td>Túnel No 2</td><td>570</td></tr><tr><td>Túnel No 3</td><td>615</td></tr><tr><td>Túnel No 4 y 5</td><td>1.395</td></tr><tr><td>Túnel No 6</td><td>700</td></tr><tr><td>Túnel No 7</td><td>735</td></tr><tr><td>Túnel No 9</td><td>620</td></tr><tr><td>Túnel No 10</td><td>1.450</td></tr><tr><td>Túnel No 11</td><td>275</td></tr><tr><td>Túnel No 12</td><td>410</td></tr><tr><td>Túnel No 13</td><td>150</td></tr></table>			Cajamarca - Calarcá			Túnel	Metros	Constructora	La Platanera	346	INVIAS	La Carmelita	271	El Oasis	129	Bermellón	215	Cinabrio	50	Australia	185	La Paloma	161	El Porvenir	171	Buenaventura- Loboguerrero			Túnel	Metros	Constructora	Túnel No 1	800	INVIAS	Túnel No 2	570	Túnel No 3	615	Túnel No 4 y 5	1.395	Túnel No 6	700	Túnel No 7	735	Túnel No 9	620	Túnel No 10	1.450	Túnel No 11	275	Túnel No 12	410	Túnel No 13	150	<table><tr><th colspan="3">Bogotá – Puerto salgar</th></tr><tr><th>Túnel</th><th>Metros</th><th>Constructora</th></tr><tr><td>Túnel T1</td><td>2.180</td><td rowspan="4">INCO</td></tr><tr><td>Túnel T2</td><td>960</td></tr><tr><td>Túnel T3</td><td>370</td></tr><tr><td>Túnel falso</td><td>300</td></tr><tr><th colspan="3">Girardot - Ibagué</th></tr><tr><th>Túnel</th><th>Metros</th><th>Constructora</th></tr><tr><td>Túnel Tualanday</td><td>1.810</td><td>INCO</td></tr><tr><th colspan="3">Buenaventura- Loboguerrero</th></tr><tr><th>Túnel</th><th>Metros</th><th>Constructora</th></tr><tr><td>Bogotá – Villavicencio, 19 túneles</td><td>14.640</td><td>INCO</td></tr></table>			Bogotá – Puerto salgar			Túnel	Metros	Constructora	Túnel T1	2.180	INCO	Túnel T2	960	Túnel T3	370	Túnel falso	300	Girardot - Ibagué			Túnel	Metros	Constructora	Túnel Tualanday	1.810	INCO	Buenaventura- Loboguerrero			Túnel	Metros	Constructora	Bogotá – Villavicencio, 19 túneles	14.640	INCO
Cajamarca - Calarcá																																																																																										
Túnel	Metros	Constructora																																																																																								
La Platanera	346	INVIAS																																																																																								
La Carmelita	271																																																																																									
El Oasis	129																																																																																									
Bermellón	215																																																																																									
Cinabrio	50																																																																																									
Australia	185																																																																																									
La Paloma	161																																																																																									
El Porvenir	171																																																																																									
Buenaventura- Loboguerrero																																																																																										
Túnel	Metros	Constructora																																																																																								
Túnel No 1	800	INVIAS																																																																																								
Túnel No 2	570																																																																																									
Túnel No 3	615																																																																																									
Túnel No 4 y 5	1.395																																																																																									
Túnel No 6	700																																																																																									
Túnel No 7	735																																																																																									
Túnel No 9	620																																																																																									
Túnel No 10	1.450																																																																																									
Túnel No 11	275																																																																																									
Túnel No 12	410																																																																																									
Túnel No 13	150																																																																																									
Bogotá – Puerto salgar																																																																																										
Túnel	Metros		Constructora																																																																																							
Túnel T1	2.180	INCO																																																																																								
Túnel T2	960																																																																																									
Túnel T3	370																																																																																									
Túnel falso	300																																																																																									
Girardot - Ibagué																																																																																										
Túnel	Metros	Constructora																																																																																								
Túnel Tualanday	1.810	INCO																																																																																								
Buenaventura- Loboguerrero																																																																																										
Túnel	Metros	Constructora																																																																																								
Bogotá – Villavicencio, 19 túneles	14.640	INCO																																																																																								

| Túneles en proceso de construcción | | |
| | Loboguerrero - Buenaventura | | | |-----------------------------|---------|---| | Túnel | Metros | Constructora | | Túnel 8 | 300 | INVIAS | | Cajamarca-Calarcá | | | | Túnel | Metros | Constructora | | Centenario (la línea) | 8.600 | INVIAS | | Cajamarca-Calarcá | | | | Túnel | Metros | Constructora | | Daza | 1.735 | INCO | | Constructora | Túneles | Metros totales de túneles en construcción | | INVIAS | 2 | 9.063 | | INCO | 1 | 1.735 | | Total | | 10.798 | | | |

El Ministerio del Transporte (2.009) representado en aquel momento por Andrés Uriel Gallego, afirmó que en túneles carreteros construidos y en ejecución, el país acumulaba 25 kilómetros. Según las previsiones oficiales, antes del año 2.015 el país debería contar con al menos 100 túneles viales. Considerando las tablas de túneles construidos por el INVIAS e INCO y dando como ejecutados los proyectos actuales, (ver Tablas 26, 27 y 28) se completarían 94 túneles.

Pérez (2.011) describe a través de la Figura 47 la construcción de túneles viales en décadas a partir del año 1.950 a 2.003. Se destaca la década de 1.970 a las demás, ya que para esta época principalmente se desarrollaron los proyectos de Bogotá – Villavicencio y Bogotá – Santa María.

Figura 47 Desarrollo de la construcción de túneles viales en Colombia. Modificado de Pérez, 2.011.



En la Figura 47 cabe aclarar que de acuerdo a la información descrita en el numeral 3.1.5. Para los periodos de 1.960 a 1.970 y de 1.980 a 1.990 si hubo construcción de túneles de acuerdo a lo registrado por El SERVICIO DE INGENIERÍA LTDA (2.010) por ende los datos mostrados variaran de acuerdo con la información bibliográfica consignada posteriormente.

Hasta los años 90 se requirieron como parte integral de los proyectos de Chivor y Guavio la construcción de 30 túneles viales y su posterior uso para desplazamiento entre las poblaciones vecinas.

También se realizaron los túneles de la carretera Bogotá –Villavicencio (túnel Quebrada Blanca), en la carretera Medellín – Turbo (túnel la Llorona), en la vía Medellín – Bogotá (los túneles de río negro), cinco túneles en la carretera Buga Buenaventura y dos en la vía Manizales Medellín. La Tabla 29 contiene datos específicos de la construcción de túneles viales en las décadas de 1.970 y 1.980, como complemento a la Figura 47.

Tabla 29 Descripción de túneles viales en las décadas de 1.970 y 1.980. Modificado de: (ver columna – FUENTE).

TÚNEL	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	LONGITUD	GEOLOGÍA EN LA ZONA	CARACTERÍSTICAS DE CONSTRUCCIÓN	FUENTE
Pasto - Mojarras - Túnel peñalista	1.972	1.973	208	Aglomerados volcánicos	Revestimiento de concreto hacia los portales en longitud de 67.4 m	Puerto,2.009
Pasto - Mojarras - Túnel la llana	1.972	1.973	206	Andesita fracturada	Revestimiento de concreto hacia los portales en longitud de 103 m	
Túnel el polvorín	1.973		1.640			Pérez, 2.011
Bogotá- Santa maría , túnel Las Juntas	1.974	1.975	206	Areniscas paleozoicas con algunos niveles de lutita	Sostenimiento esporádico. No revestido.	Puerto,2.009
Bogotá- Santa maría , túnel Pozo Azul			289			
Bogotá- Santa maría , túnel Volador			236			
Bogotá- Santa maría , túnel Trapiche			91			
Bogotá- Santa maría , túnel Ventarrón			615			
Bogotá- Santa maría , túnel Salitre			639			
Bogotá- Santa maría , túnel Polvorín			1.649			
Bogotá- Santa maría , túnel Esmeralda			453			
Bogotá- Santa maría , túnel Presa			474			
Bogotá- Santa maría , túnel Pluma de agua			769			
Bogotá- Santa maría , túnel Cascada			490			
Bogotá- Santa maría , túnel Movas			350			
Bogotá- Santa maría , túnel Muros 1			132			
Bogotá- Santa maría , túnel Muros 2	337					
Túnel de quebrada blanca , túnel 1	419				Ardila, 2.010	
Túnel de quebrada blanca , túnel 2	248					
Túnel de quebrada blanca , túnel falso	59					
Carretera Guateque, el secreto (15 túneles-	1.976	7.213				
Bogotá - Villavicencio , Quebrada Blanca 1	1.978		420	Areniscas cretácicas	Sostenimiento esporádico. No revestido	Puerto, 2.009
Bogotá - Villavicencio , Quebrada Blanca 2			248			
Túnel de Supia (Irra- La Felisa)	1.980		75			Pérez, 2.011
Bogotá- Santa maría , túnel infierno	1.982		492	Deposito Coluvial Areniscas paleozoicas	Sostenimiento continuo con arcos de acero, malla y concreto lanzado. No revestido	Puerto, 2.009

La siguiente información es tomada del documento desarrollo de túneles viales en Colombia (2.010) (Reunión del Concreto 2.010 - RC2.010 por parte de la Asociación Colombiana de Productores de Concreto, ASOCRETO, Jorge Ardila Rueda, GEOTUNELES, COLOMBIA.

Ardila (2.010) destaca el desarrollo aplicado a la construcción de túneles viales en la última década ha comparación de 1.970 ha sido mayor en longitud más no en cantidad (Ver Figuras 48 y 49) dado que para aquella época fueron muchos más, pero eran de poca longitud dadas las circunstancias de las zonas; actualmente se trabaja con mayor rendimiento, precauciones, calidad de maquinaria y altas especificaciones.

Figura 48 Desarrollo de túneles viales en Colombia. Modificado de Ardila, 2.010.

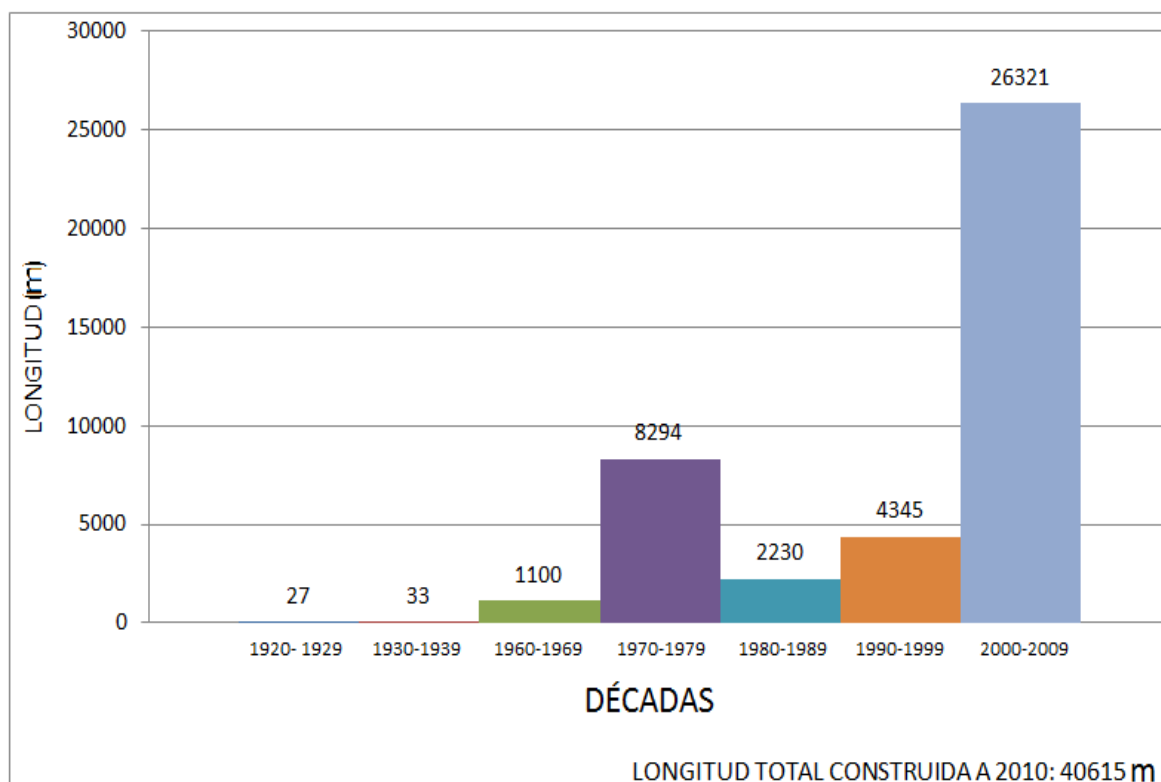
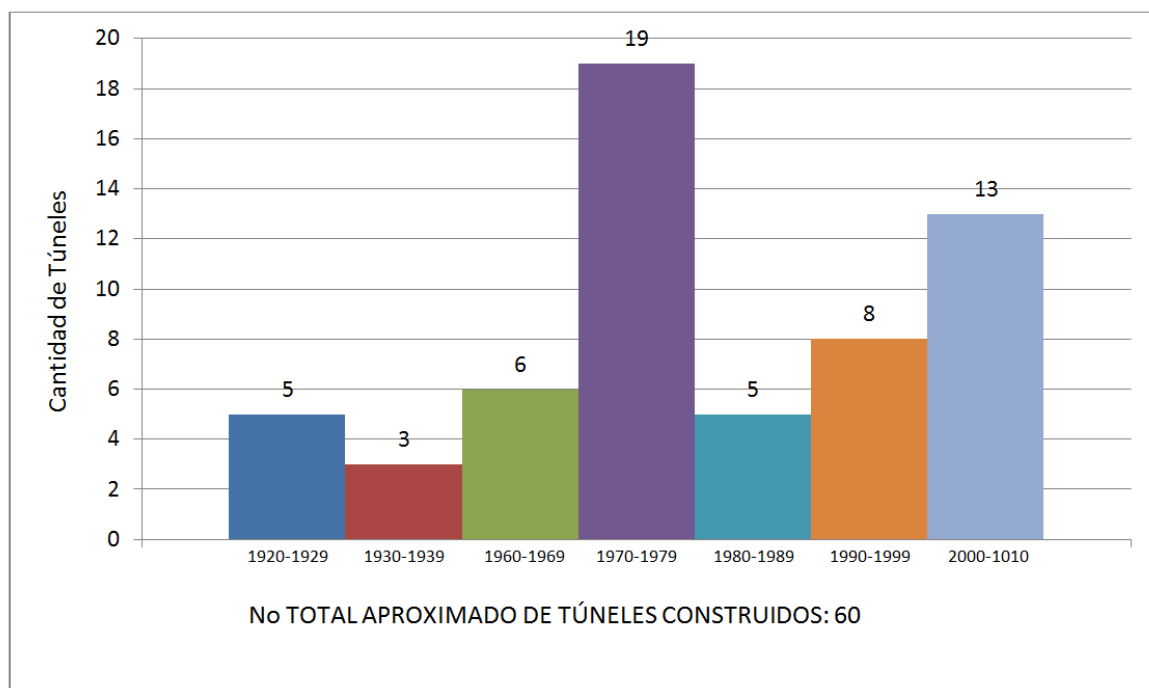


Figura 49 Desarrollo de túneles viales en Colombia. Modificado de Ardila, 2.010.



La Tabla 30 corresponde a la descripción de las Figuras 48 y 49.

Tabla 30 Descripción de la trayectoria de túneles viales en Colombia. Modificado de Ardila, 2.010.

LONGITUD TOTAL (m)	NÚMERO DE TÚNELES	AÑO
27	5	1.920
33	3	1.930
1.100	6	1.960
8.294	19	2.970
2.230	5	1.980
4.345	8	1.990
26.321	13	2.000
40.615	60	TOTAL

Ardila (2.010) comenta que las década del 70 y la primera del siglo XXI tuvieron gran relevancia en la construcción de túneles viales en Colombia, principalmente por la cantidad de kilómetros, sin embargo durante los años correspondientes entre 1.990 y 2.000 se realizaron proyecto de gran importancia que aportaron beneficios entre regiones como los túneles en la vía Bogotá – Villavicencio, la vía

Medellín – Santafé de Antioquia o la ruta Altamira – Florencia. Las Tabla 31 y 32 corresponden a algunos de los túneles viales en la década de 1.990.

Las características que se desarrollaron en la construcción de túneles viales en la década de 1.990 están dadas por la Tabla 31.

Tabla 31 Túneles viales en la década de 1.990. Modificado de Puerto, 2.009.

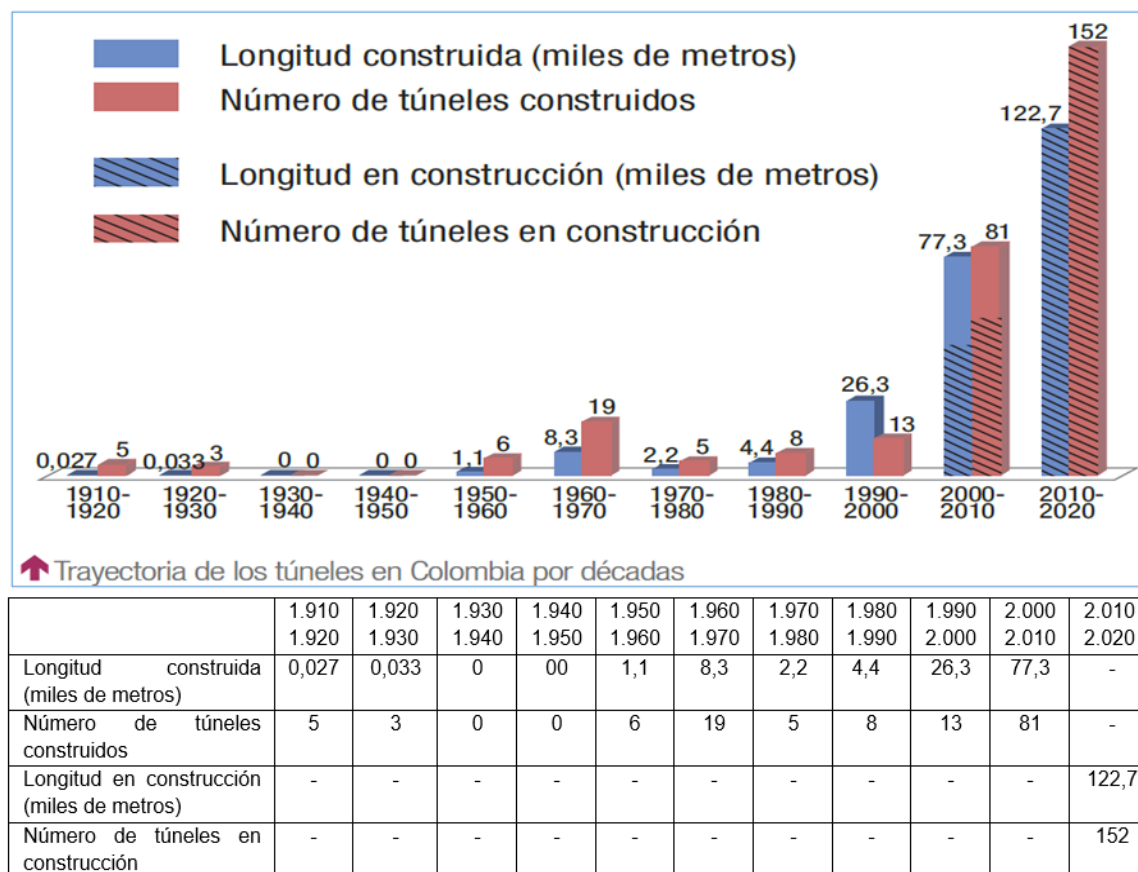
TÚNEL	AÑOS DE CONSTRUCCIÓN	LONGITUD (m)	GEOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
Altamira-Florencia no1	1.993	167	Rocas ígneas	Sostenimiento y revestimiento parcial
Altamira-Florencia no 2		200	Rocas ígneas	
Altamira-Florencia no3		379	Rocas ígneas	
Altamira-Florencia no4		379	Rocas ígneas	
Túnel Buenavista	1.994	4.520		
Altamira-Florencia no 5	1.995	228	Rocas ígneas	
Dabeiba-mutara túnel la llorona		455		
Bogotá - Villavicencio, bijagual	1.997	185	Arcillolitas	Revestimiento en concreto
Carretera Bogotá-Villavicencio (túnel de Argelino Durán o túnel de Boquerón)-(primer túnel de altas especificaciones)	1.997-1.999	2.405	Rocas sedimentarias constituidas por arcillolitas y areniscas del grupo Guadalupe y formación villeta	Ventilación artificial tipo longitudinal con dos ventiladores cada 160 m, sostenimiento continuo con arcos de acero, malla, pernos y concreto lanzado. Totalmente revestido en concreto
Medellín - Santafé de Antioquia, occidente	1.998 - 2.001	4.605	Cuarzodioritas en una parte y metasedimentos en otra	Ventilación semitransversal. Hastiales revestidos en concreto. Bóveda revestida en algunos sitios.
Medellín - Puerto triunfo, túnel Guarne 2	1.999	288	Neis biotítico foliado	Revestido en concreto lanzado

Tabla 32 Túneles viales de la década de 1.990. Modificado de las Referencias: (ver columna – Descripción, Fuente)

TÚNELES	DESCRIPCIÓN
	○ Túnel de Occidente, (Fernando Gómez Martínez) Antioquia, ○ Sector: Entre municipios de Medellín y san jerónimo ○ Vía: Medellín – Santafé de Antioquia ○ Tiempo de ejecución: 1.998 - 2.006 ○ Longitud: 4.605 metros ○ Fuente: El colombiano, 2.015
	○ Túnel Misael Pastrana Borrero (Buenavista); atraviesa la cordillera oriental ○ Vía: Bogotá – Villavicencio. ○ Fecha de construcción: 1.994 ○ Longitud: 4.520 metros ○ Obra premiada: premio nacional de ingeniería, SCI 2.003. ○ Fuente: Concreto, 2.003
	○ Túnel del Boquerón ○ Vía: Bogotá – Villavicencio. ○ Fecha de construcción: 1.994 ○ Longitud: 2.325 metros (Long. efectiva) ○ Pendiente promedio: 2 % ○ Fuente: El espectador, 2.014

En la Figura 50 se puede apreciar más claro y detallado el proceso actual de la evolución de la construcción de túneles viales, además en la Tabla 33 se presentan algunos de los túneles construidos más representativos después del año 2.000.

Figura 50 Túneles viales de carretera en Colombia. Modificado de Ardila y Rodríguez, 2.013.



En la Figura 50 cabe aclarar que de acuerdo a la información descrita en el numeral 3.1.2. Para los periodos de 1.910 a 1.920 no se construyeron túneles y de 1.970 a 1.990 se construyeron más túneles de los reportados por Ardila y Rodríguez de acuerdo a lo registrado por El SERVICIO DE INGENIERÍA LTDA (2.010) por ende los datos mostrados variaran de acuerdo con la información bibliográfica consignada posteriormente.

Tabla 33 Túneles viales en Colombia después del año 2.000. Modificado de las Referencias: (ver columna – Descripción, Fuente).

TÚNELES	DESCRIPCIÓN
	○ Túnel de Sumapaz (Guillermo León Valencia), Tolima, sector Melgar – Boquerón. ○ Revestimiento: concreto formaleteado ○ Tiempo de ejecución: 2.006 - 2.010. ○ Longitud: 4.200 m. ○ Fuente: Argos, 2.010.
	○ Túnel de Daza, Nariño, Variante de Pasto, Colombia. ○ Revestimiento: concreto hidráulico lanzado ○ Tiempo de ejecución: 2.009 – 2.012 ○ Longitud: 1.735 m. ○ Fuente: Argos, 2.012.
	○ Túnel helicoidal, Risaralda, Dos quebradas ○ Revestimiento: concreto hidráulico lanzado. ○ Tiempo de ejecución: 2.008 - 2.009 ○ Longitud: 142 m. ○ Fuente: Argos, 2.010.

3.3 MAPA DE TÚNELES VIALES EN COLOMBIA

Salazar (2.009) ubica y representa a través de un símbolo (herradura) en distintos colores los túneles proyectados, construidos y en construcción en un mapa de Colombia hasta el año 2009 (ver Figura 51 y Tablas 35 y 36), la mayoría de ellos se encuentran sobre las cordilleras oriental y occidental. Adicionalmente sobre este mapa se implanto un triángulo de color azul con café que describe los túneles proyectados a partir del 2.009 (ver Figura 51 y Tabla 34).

Tabla 34 Túneles posteriores al año 2.009. Modificado de SALASAR, 2.009.

TÚNELES EN CONSTRUCCION	
Cajamarca - Calarcá	
MÓDULO 2	
TÚNEL	LONGITUD (m)TOTAL
Carmelita	309
Bermellon 2	250
Envidia	80
Platanera	100
Cristales	160
El Cinabro	183
Australia	395
Uvo	85
La Paloma	210
Las Marias 1	64
La Luisa	125
La Luisa	129
El porvenir	189
Balconsitos	135
Los Alpes	87
Estrella - Itaic	85
Cajamarca - Calarcá	
MÓDULO 3	
Carmelita	309
Virgen Negra	272
Virgen Blanca	90
Rcn	80
Jamaica	175
Mirador	115
Vitrinas	130
Bogotá - Puerto Salgar	
Túnel T1	2180
Túnel T2	960
Túnel T3	370
Túnel falso	300
Buenaventura - Loboguerrero	
Túnel No 1	800

Túnel No 2	570
Túnel No 3	615
Túnel No 4 y 5	1.395
Túnel No 6	700
Túnel No 7	735
Túnel No 9	620
Túnel No 10	1.450
Túnel No 11	275
Túnel No 12	410
Túnel No 13	150
Doble Calzada Buga - Buenaventura	
12 Túneles	8.500
Doble Calzada Bogotá – Villavicencio	
19 Túneles	14.500
Conexión vial del valle de Aburra – río negro	
Túnel de Santa Elena, (2 túneles)	8.200
Autopista de la montaña	
6 Túneles	15.000
Ruta del sol	
10 túneles y 24 viaductos	5.400
Doble calzada Cajamarca - Calarcá	
Túneles de la línea 1 con longitud de 8,6 km y la línea 2 con longitud de 10,7 km y túneles cortos con longitud total de 1.768 m	21.680
TÚNELES PROYECTADOS	
Autopista Bogotá – La Calera	
Túnel la Aurora	1.200
Autopista Bogotá - Honda	
Túnel de Cocolo	6.100
Túneles urbanos	
Autopistas urbanas en Bogotá túneles cerros orientales, longitud 1.000 a 2.000 m.	2.000
Autopista urbana de Medellín	5.300
Vía Medellín - autopistas Mar y Mar	
Túnel del Toyo	9.750
TÚNELES CONSTRUIDOS	
Túnel de la Avenida Colombia - Cali	980
Túnel de Sumapaz (Guillermo León Valencia), Tolima, sector Melgar – Boquerón.	4.200
Nariño, Variante de Pasto	
Túnel de Daza,	1.735
Vía Bogotá – Villeta	
Túnel del Cune	200
Vía Gualanday – Buenos Aires.	
Túnel de Gualanday, Gualanday – Buenos Aires.	1.800

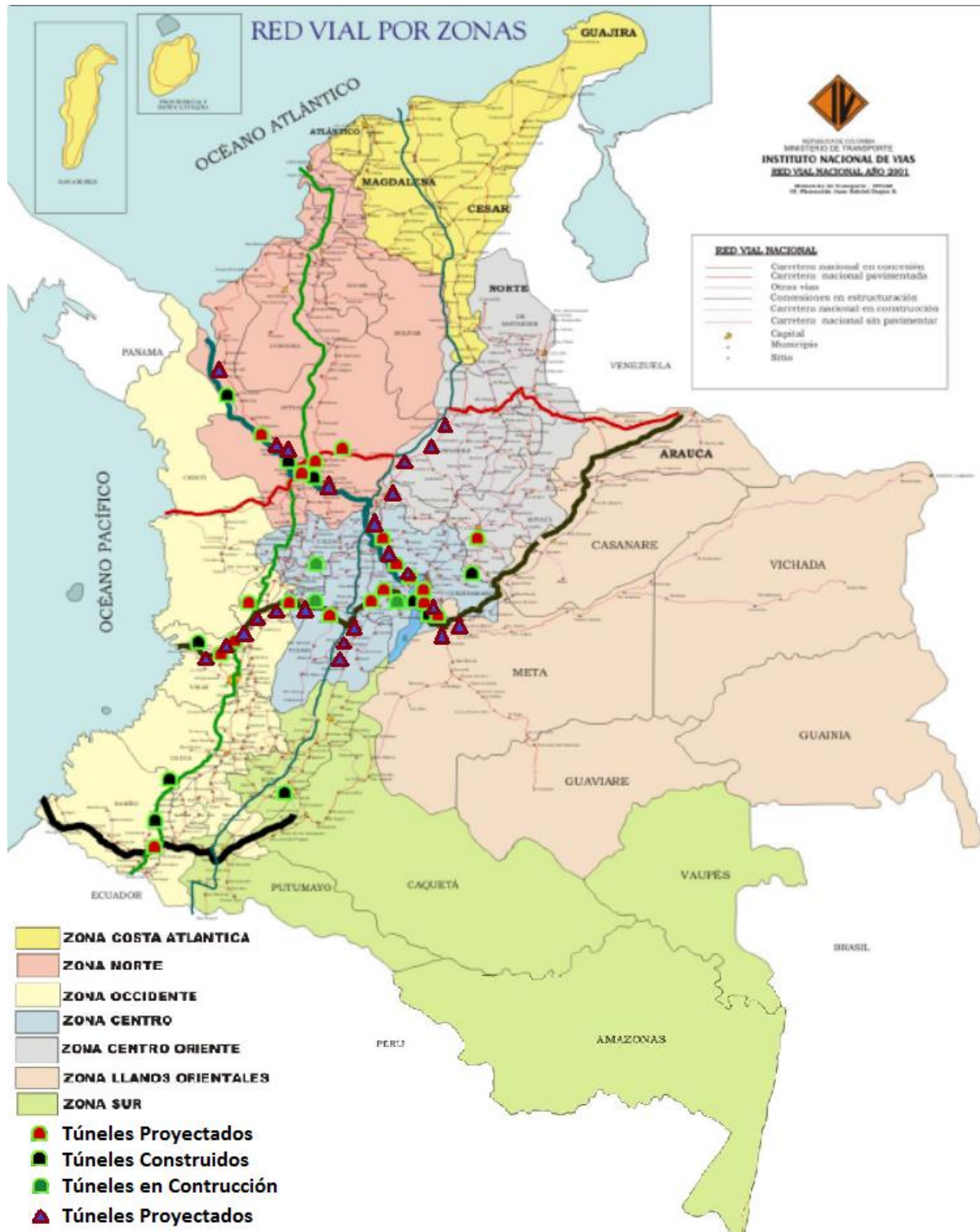
Tabla 35 Túneles en construcción, proyectados y construidos del 2.009 – 2.015.

Nombre del tunel	Código	Nombre carretera	LONG. (m)
LA LLORONA	6202	DABEIBA - TURBO	450.00
GUARNE	6004	MEDELLIN - BOGOTÁ	250.00
JUNTAS	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	204.96
POZO AZUL	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	292.00
INFIERNO	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	490.70
VOLADOR	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	236.00
VENTARRÓN	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	613.00
SALITRE	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	638.89
POLVORÍN SECCIÓN A	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	828.17
POLVORÍN SECCIÓN B	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	825.17
REBOSADERO	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	454.91
PRESA	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	475.20
PLUMA DE AGUA	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	772.55
CASCADA	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	490.04
MOYAS	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	351.62
MUROS I	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	137.16
MUROS II	5608	GUATEQUE- EL SECRETO	137.17
EL ESPEJO	2903	LA ESTRELLA - LA FELISA	125.00
ARGELINO DURÁN QUINTERO	4006	BOGOTA-V/CENCIO	2.414.65

Tabla 36 Túneles en construcción, proyectados y construidos del 2.009 – 2.015.

Nombre del tunel	Código	Nombre carretera	LONG. (m)
QUEBRADABLANCA		BOGOTA-V/CENCIO	440.00
QUEBRADABLANCA		BOGOTA-V/CENCIO	220.00
FALSO TUNEL QUEBRADABLANCA 1	4006	BOGOTA-VILLAVIENCIO	72.00
QUEBRADABLANCA 1	4006	BOGOTA-VILLAVIENCIO	440.00
FALSO TUNEL QUEBRADABLANCA 2	4006	BOGOTA-VILLAVIENCIO	72.00
QUEBRADABLANCA 2	4006	BOGOTA-VILLAVIENCIO	254.00
BIJAGUAL	4006	BOGOTA-VILLAVIENCIO	200.00
MISAEAL PASTRANA BORRERO (BUENA VISTA)	4006	BOGOTA-VILLAVIENCIO	4.520.00
LA LLANA		PASTO-MOJARRAS	200.00
PEÑALISA		PASTO-MOJARRAS	200.00
FERNANDO GOMEZ MARTINEZ (SAN JERONIMO)		MEDELLIN – SANTAFE	4.600.00
UNO	4001	B/VENTURA-LOBOGUERRERO	220.00
DOS	4001	B/VENTURA-LOBOGUERRERO	130.00
TRES	4001	B/VENTURA-LOBOGUERRERO	100.00
CUATRO	4001	B/VENTURA-LOBOGUERRERO	90.00
CINCO	4001	B/VENTURA-LOBOGUERRERO	490.00
UNO - CUATRO		ALTAMIRA - FLORENCIA	600.00
TOTAL			23.035.19

Figura 51 Ubicación de túneles en mapa de Colombia, Modificado de Salazar, 2.009.



Colombia actualmente cuenta con una gran cantidad de proyecto viales que contienen obras subterráneas (túneles viales) con el objeto de reducir los tiempos de recorrido o para mejorar a un más los ingresos de algunas regiones que desempeñan gran importancia en la economía nacional como lo es el departamento del Meta en la vía Bogotá – Villavicencio (doble calzada); a continuación se darán a especificar algunos proyectos (ver Tabla 37).

3.4. FUTURO DE TÚNELES EN COLOMBIA (ETAPA DE CONCEPCIÓN, DISEÑO O PRE CONSTRUCCIÓN).

Tabla 37 Futuro de túneles en Colombia, la tabla de transcribió de la original. Modificado de Ardila, 2.010.

TÚNEL	CARACTERISTICAS- PROPUESTA
Doble Calzada Buga - Buenaventura	12 Túneles, longitud total: 8,5 km
Doble Calzada Bogotá – Villavicencio	19 Túneles, longitud total: 14,5 km
Conexión vial del valle de Aburra – río negro	Túnel de Santa Elena, 2 túneles, longitud total: 8,2 km
Autopista de la montaña	6 Túneles, longitud total:15 km
Ruta del sol	3 Túneles, longitud total: 3,5 km
Autopista Bogotá – La Calera	Túnel la Aurora, longitud: 1,2 km
Autopista Bogotá - Honda	Túnel de Cocolo, longitud 6,1 km
Túneles urbanos como el de la autopista urbana de Medellín,	Túneles laterales, longitud 5.300 m y autopistas urbanas en Bogotá túneles cerros orientales, longitud 1.000 a 2.000 m.
Túneles Urbanos	Autopista urbana de Medellín: 5,3 km
Autopista cerros orientales Bogotá	Longitud: 2 km
Doble calzada Cajamarca - Calarcá	Túneles de la línea 1 con longitud de 8,6 km y la línea 2 con longitud de 10,7 km y túneles cortos con longitud total de 1.768 m
Doble Calzada Pasto – Chachagui -Aeropuerto	Túnel Daza, longitud: 1.735 m
Túnel de Gualanday: Longitud de 1.800 m	Tramo 2, corregimiento de Gualanday – Buenos Aires.
Concesiones Sabana de Occidente vía Bogotá – Villeta	Túnel falso del Cune, longitud: 215 m

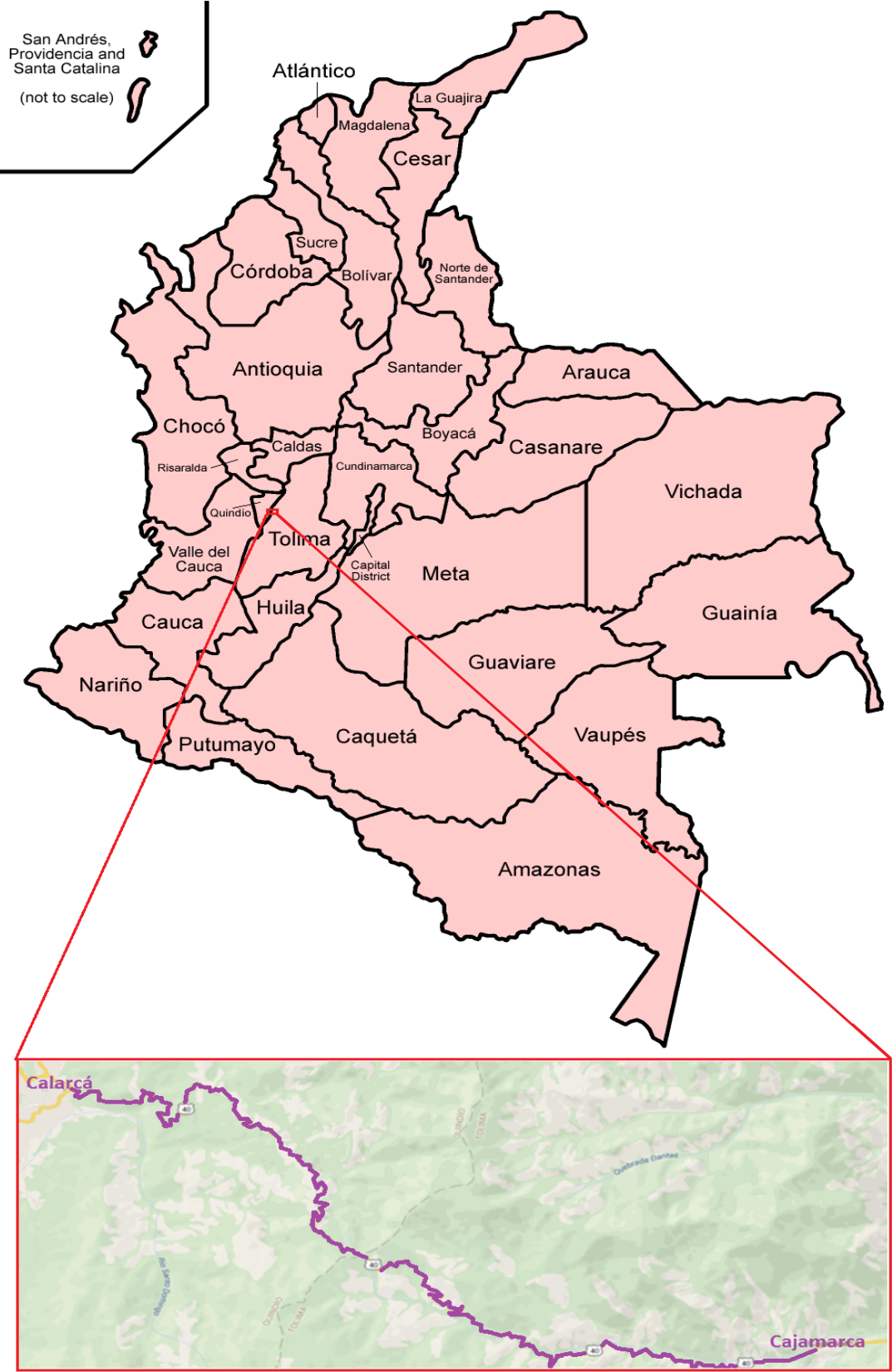
4. CAPÍTULO 4 - TÚNEL DE LA LÍNEA

El contenido de este capítulo consiste en relatar las actividades aplicadas en el proyecto más completo, ambicioso, costoso e innovador que reúne toda la experiencia nacional en obras subterráneas y que viene ejecutándose en el país desde el año 1.998, conocido como el túnel de la línea. Este atravesará la Cordillera Central y generará grandes contribuciones económicas principalmente a los municipios de Calarcá - Quindío y Cajamarca - Tolima, disminuirá los tiempos de viaje, los costos directos e indirectos de operación de importadores y exportadores, reducción en accidentalidad y ahorros en costos de operación. Este ahorro se da por la diferencia de transitar 22 km en vías con características deficientes de geometría ubicada en terreno escarpado a transitar una distancia de 11.9 km en terreno plano.

Esta obra es de gran importancia por su trazado geométrico ya que comunicará el centro del país y el Pacífico haciendo parte del corredor Bogotá- Buenaventura, sector por el que se moviliza cerca del 40 por ciento de la carga nacional, actualmente este túnel es más conocido como el Túnel del segundo centenario.

La zona del proyecto se presenta en el recuadro rojo de la Figura 52. Esta zona corresponde al corredor de Calarcá a Cajamarca donde se encuentra el túnel de la línea.

Figura 52 Mapa de Colombia, corredor Bogotá – Buenaventura, modificado, WIKIPEDIA, 2.015.



LA CÁMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA (2.009) habla sobre el túnel de La Línea o Segundo Centenario como uno de los proyectos más ambiciosos que se ha venido desarrollando en el País, su construcción traerá grandes beneficios a zonas aisladas y disminuirá el recorrido habitual del principal corredor vial del País (Bogotá – Buenaventura). El tramo Calarcá – Cajamarca presenta uno de los mayores índices de accidentalidad del país por las condiciones geométricas y climáticas de la zona. El número de accidentes por kilómetro es cuatro veces superior al promedio nacional. Con el proyecto, la accidentalidad se vería reducida en un 75%.

Por tales razones se hará una descripción detallada del proceso administrativo y constructivo que ha tenido esta obra, con el objetivo principal de conocer los métodos de construcción implementados.

4.1. HISTORIA

A través del CONFIS (2.007) y según El Consejo Nacional de Política Económica y social (CONPES) 2.007 durante la última década del siglo XX, el Gobierno Nacional aplicó todo tipo de estrategias para dar solución al cruce de la Cordillera Central en el sector de la línea (una montaña de 3.300 metros de altura), desde el año 1.998 el INVIAS contrató con el consorcio “LA LÍNEA” el estudio “Cruce de la Cordillera Central”.

Los resultados de los estudios presentados en el año 2.000, contemplaban la ejecución de una serie de proyectos de magnitud significativa, entre los cuales se encontraba la construcción de un túnel principal “Túnel de la Línea” de 8,6 kilómetros de longitud; 11 túneles menores con una longitud combinada de 4.3 kilómetros; 59 puentes y viaductos que sumaban una longitud de 6.3 kilómetros; la ampliación a doble calzada de 23.73 kilómetros de la vía actual; y, la construcción de 18.57 kilómetros de vía nueva para formar un par vial con la vía existente. El estudio explicado contemplaba la construcción del túnel de la Línea como el proyecto primordial para la reducción de tiempos y mejoramiento de la operación en el corredor.

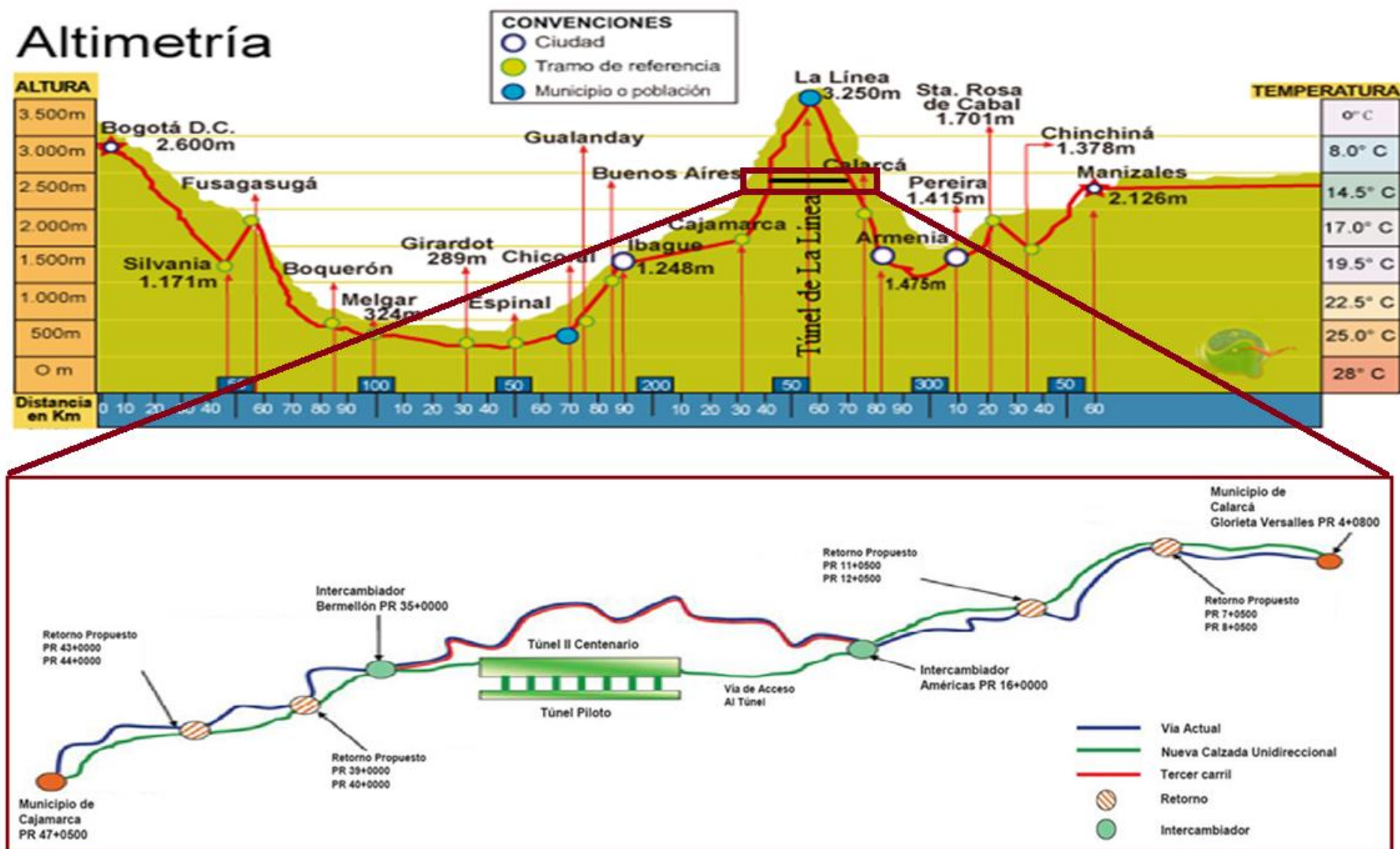
Mediante el documento CONPES 3084 del 14 de julio de 2.000, autorizó a la Nación para contratar créditos externos hasta por US \$218.2 millones destinados a financiar el proyecto Túnel de la Línea, hoy denominado “Túnel segundo Centenario”. En ese documento se presentaron dos alternativas de construcción para realizar el proyecto: la alternativa A (ver Anexo 1), que consiste en la construcción de un túnel principal con tráfico bidireccional, túnel paralelo de rescate y sistema de ventilación transversal; y la alternativa B (ver Anexo 2), que contemplaba la construcción de dos túneles paralelos, cada uno con tráfico unidireccional y sistema de ventilación longitudinal

Teniendo en cuenta lo estipulado por el Instituto Nacional de Vías – INVIAS en los años 2.001 y 2.002, se adelantaron tres procesos licitatorios con el fin de contratar el “Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento del Túnel de la Línea y Obras Anexas”, procesos que fueron declarados desiertos por falta de proponentes, quienes argumentaron problemas en la consecución de la financiación, la concepción de riesgo país y el riesgo geológico del proyecto.

De acuerdo con lo anterior, se identificó la necesidad de minimizar los riesgos geológicos, y teniendo en cuenta los estudios de posibles alternativas de construcción que se habían desarrollado en el estudio del “Túnel de la Línea”, se decidió adelantar la construcción del proyecto en dos Fases. La primera (Fase I), corresponde a la construcción de un túnel piloto, la cual se inició en enero de 2.005 y su terminación fue en 2.008. La segunda fase corresponde a la construcción del túnel principal y sus obras anexas, la cual se inició en el año 2.006 con la construcción de la vía de acceso al portal del Quindío a una altitud de 2.422 msnm y finaliza en el portal Bermellón (Tolima) a una altura de 2.505 msnm.

La Figura 53 nos indica la altimetría del corredor entre Bogotá y Manizales, donde se puede apreciar la altura (m), las distancias (km) y la temperatura (°C) de los municipios; en la parte inferior de la misma imagen se indica las diferentes vías (vía actual, nueva vía unidireccional y tercer carril) de interés de este capítulo (Cajamarca – Calarcá), además se aprecian los sitio destinados donde se establecerán los retorno y los intercambiadores de la vía ya comentada.

Figura 53 Características de altimetría, temperatura y distancia entre Bogotá y Manizales, Construcción Panamericana CPA, 2.012.



La fase III contempla la ampliación del túnel piloto a túnel definitivo en el sentido Buenaventura-Bogotá, para el cual no se ha establecido quien lo ejecutará.

Según la cámara colombiana de infraestructura (2.009), las excavaciones del túnel piloto demostraron que era posible la construcción de túneles en sitios de alta elevación sobre el nivel del mar. Además sirvió como fuente de conocimientos geológicos por la intervención en la cordillera debido a los escasos sondeos exploratorios. Dichos estudios eran limitados no sólo por la cobertura que presenta, llegando en algunos casos a profundidades mayores a 800 metros, sino también por las dificultades de ejecución por las características del terreno. Por otra parte este conocimiento adquirido ayuda para que el Gobierno Nacional en el momento de contratar este tipo de obras subterráneas, pueda tener un presupuesto más adecuado frente a las grandes posibilidades de imprevistos que puede llegar a presentar estas exploraciones.

Luego de la inauguración del túnel piloto se está trabajando con más de 300 hombres las 24 horas del día sin parar. Se realizan dos explosiones diarias con las que se avanzan tres metros en la excavación, con el objetivo de alcanzar el túnel definitivo. Se anuncia que el túnel tendrá dos carriles con capacidad para vehículos de carga pesada y uno adicional sólo para vehículos pequeños.

Arenas (2.011) describe el proyecto del túnel de la línea correspondiente a la Fase II y que está a cargo de la Unión Temporal Segundo Centenario (UNSC), inició con un presupuesto de 629.000 millones de pesos, su construcción mejorará y aumentará la movilidad del transporte de carga pesada entre la capital del país y Buenaventura (Valle), que constituye el 70 por ciento de los 4.200 vehículos diarios que actualmente transitan por La Línea. En total, el proyecto abarca 27 kilómetros entre Cajamarca (Tolima) y Calarcá (Quindío). Algunos de los avances del sector de excavaciones de este proyecto pueden apreciarse en la Tabla 38.

Tabla 38 Excavaciones correspondientes al túnel segundo centenario, ver Fuente.

	Fuente: INVIAS, 2.009 En esta figura se puede apreciar el sistema de ventilación, parte del sistema de bombeo para la extracción de agua (tuberías), la iluminación y una instalación de rieles utilizada para evacuar el material de excavado a través de vagones.
	Fuente: Dr. Álvaro Correa En este tramo se puede ver parte de los arcos metálicos, los pernos, concreto lanzado, la ventilación, la iluminación y las instalaciones de cables eléctricos.

Para junio de 2.014 el proyecto estaba en un 75 por ciento ejecutado, el faltante correspondía a terminar de excavar parte del túnel, pavimentarlo, instalar el revestimiento, implementar los sistemas de ventilación e iluminación y terminar las obras anexas (23 puentes y 18 túneles).

Continuando con el proceso del proyecto y según el INVIAS 2.015, tras el ultimátum del gobierno por parte del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) que dio como respuesta caducar el contrato por incumplimiento del consorcio UTSC (fecha de terminación: 30 de noviembre de 2.014). El gobierno tendrá que desembolsar nuevamente recursos (327.000 millones de pesos), para terminar

con los proyectos faltantes y establecer quien los construiría, proyecto que fue nombrado “por fin vea la luz”.

Los efectos de la caducidad traerían millonarias demandas contra el estado, aparte de la multa que el INVIAS le impuso por 60.300 millones de pesos a UTSC. Al igual que el contratista de la UTSC tiene demandado al INVIAS en más de 300.000 millones de pesos por las obras imprevistas realizadas anexas al contrato.

El INVIAS argumenta a su favor que giró al contratista el 98 por ciento de los recursos por los que se adjudicó el proyecto. Además, este es un contrato “llave en mano”, es decir, que las obras se contratan con precios y plazos fijos y el consorcio asume los imprevistos. Por eso, se niega a pagar sumas adicionales a las pactadas.

El costo real de la ejecución del proyecto, estaría sobre 1 billón de pesos con el dinero adicional asignado y el valor destinado eran 629.000 millones de pesos.

En aquel momento los afectados serían los consorcios y obras donde participa el ingeniero Carlos Collins - representante legal del consorcio UTSC. Adicionalmente la resolución de caducidad en su artículo quinto dice lo siguiente: “A partir de la firmeza de la presente decisión quedarán inhabilitados para contratar con el Estado en los términos del literal Numeral 1 del artículo 8 de la ley 80 de 1.993 todos los miembros de la Unión Temporal segundo Centenario”; consorcios: Promotora Montecarlo Díaz, Túneles de Colombia, Gayco, Tecniciviles, Construirte, HH Arquitectura, Condux (México) y Constructora Herreña Fonteca (España); Obras: doble calzada Bogotá-Girardot; la reparación del túnel del Sumapaz; la doble calzada Floridablanca-Piedecuesta y la construcción de una variante en Zipaquirá.

Durante el primer trimestre del 2.015 el gobierno, el ministerio de transporte y el contratista de (UTSC) llegan a un acuerdo para terminar el túnel de la línea. El INVIAS 2.015 informa que el proyecto contará con \$ 327.000 millones, que entrarán a una fiducia para ser administrados y serán desembolsados a medida

que se vayan realizando las obras indicó el director del INVIAS, Carlos García, quien recalcó el apoyo de la Procuraduría General para llegar al principio de acuerdo que permitirá que las obras estén en el menor tiempo y a menor costo para la Nación; estas labores de reinicio se pueden apreciarse en la Figura 54.

Figura 54 Reinicio de construcción de túnel de la línea, método de perforación, INVIAS, 2.015.



El acuerdo pactado luego de un mes de negociaciones, estableció concluir las obras (22) antes del 30 de noviembre del 2.016. Además la compañía de seguros de (UTSC) debe consignar \$ 30.000 millones, que son los recursos con los cuales la obra será reanudada. “La no consignación de este dinero y de cualquier incumplimiento ocasionará también la terminación anticipada de este acuerdo”, precisó el vicepresidente de la República, Germán Vargas Lleras.

En mayo del 2.015 el presidente Juan Manuel Santos en compañía del Vicepresidente Germán Vargas Lleras, la Ministra de Transporte, Natalia Abello Vives, junto con el director del INVÍAS, Carlos García Montes, y autoridades de la región, verifican la primera obra pactada correspondiente a la terminación de la excavación del túnel principal, que mide 8,6 kilómetros de las 22 establecidas, llegando el proyecto al 90 por ciento de construcción.

También se informó que en septiembre se abrirá la licitación para los equipos electromecánicos por 220.000 millones de pesos”, agregó el Presidente.

Algunas de las actividades a realizar aun en el túnel según Hernando Dávila, representante de la firma interventora Consorcio DIS S.A. sería la excavación de la parte inferior del túnel en un 10 por ciento. También falta revestir el túnel con una geomembrana para que el agua de infiltración pueda salir del túnel.

El megaproyecto actualmente incluye 23 puentes y 19 túneles, además, del túnel principal, que es el más largo y alto de Suramérica, pues se encuentra sobre los 2.500 metros sobre el nivel del mar.

Así mismo, dentro de las metas que debe cumplir el contratista se encuentra también el tratamiento ambiental de las fallas La Gata y La Soledad y la construcción de filtros y sistemas de drenaje de aguas superficiales, de lavado y derrame.

4.2. ESTUDIOS Y DISEÑOS

El contratista Unión Temporal Segundo Centenario hizo entrega al INVIAS de los diseños definitivos del proyecto durante los meses de junio y julio de 2010. En este sentido, la interventoría certificó el cumplimiento de la Meta 1 correspondiente a la elaboración y entrega de los diseños el 7 de julio del mismo año.

El proyecto del túnel se desarrollará en 3 módulos, respecto a las obras de los módulos II y III, los diseños definitivos entregados incluían una mayor cantidad de túneles cortos y viaductos que no habían sido previstos en los diseños iniciales. Esta modificación obedeció a las condiciones topográficas del terreno y la baja calidad del suelo, aspectos que provocaron un derrumbe en el punto conocido como Matallana, en el mes de octubre de 2.009, donde se realizaban trabajos para el desarrollo de una vía a cielo abierto.

En ese momento, el Contratista Unión Temporal Segundo Centenario, que originalmente había presentado un trazado con características geométricas restrictivas por las condiciones expuestas anteriormente, optó por rediseñar el

trazado de las segundas calzadas de los módulos II y III, desarrollando un total de 3.4 km en viaductos y 3.3 km en túneles cortos. Los túneles tienen longitudes entre 80 y 300 m. (Ver Tabla 39).

Tabla 39 Listado de túneles cortos – módulo 2 y 3, modificado de CÁMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA, 2.011.

KILOMETRAJE	ABSCISADO		LONGITUD	OBRA	No	NOMBRE
	INICIAL	FINAL				
MÓDULO 2						
km 36	k36+195,00	k36+440,00	245,00	Túnel	1	BERMELLON 2
	k36+590,00	k36+670,00	80,00	Túnel	2	ENVIDIA
km 37	k37+260,00	k37+420,00	160,00	Túnel	3	CRITALES
	k37+668,00	k37+851,00	183,00	Túnel	4	EL CINABRIO
km 38	k38+355,00	k38+750,00	395,00	Túnel	5	AUSTRALIA
	k38+760,00	k38+845,00	85,00	Túnel	6	UVO
km 39	k39+650,00	k39+860,00	210,00	Túnel	7	LA PALOMA
km 40	k40+943,00	k41+007,00	64,00	Túnel	8	LAS MARIAS1
km 41	k41+535,00	k41+660,00	125,00	Túnel	9	LA LUISA
km 42	k42+245,00	k42+374,00	129,00	Túnel	10	LA JULIA
	k42+706,00	k42+895,00	189,00	Túnel	11	EL PORVENIR
	k42+940,00	k43+075,00	135,00	Túnel	12	BALCONCITOS
km 43	k43+132,00	k43+219,00	87,00	Túnel	13	LOS ALPES
km 44	k44+265,00	k44+350,00	85,00	Túnel	14	ESTRELLA-ITAIC
MÓDULO 3						
km 8	k8+070,00	k8+379,00	309,00	Túnel	1	CARMELITA
	k8+419,00	k8+691,00	272,00	Túnel	2	VIRGEN NEGRA
	k8+760,00	k8+850,00	90,00	Túnel	3	VIRGEN BLANCA
km 9	k9+755,00	k9+835,00	80,00	Túnel	4	RCN
km 10	k10+615,00	k10+790,00	175,00	Túnel	5	JAMAICA
km 11	k11+475,00	k11+590,00	115,00	Túnel	6	EL MIRADOR
km 12	k12+430,00	k12+560,00	130,00	Túnel	7	VITRINAS

4.3. INFORME DE OBRA –TÚNEL DE LA LÍNEA

Según la ficha técnica del INVIAS 2.014 el proyecto **CRUCE DE LA CORDILLERA CENTRAL: TÚNELES DEL SEGUNDO CENTENARIO – TÚNEL DE LA LÍNEA Y SEGUNDA CALZADA CALARCÁ – CAJAMARCA** se divide por módulos de la siguiente manera:

4.3.1. MÓDULO 1: TÚNEL DEL SEGUNDO CENTENARIO, sentido Calarcá - Cajamarca.

El túnel a realizar es de tipo unidireccional (ver Figura 55) y se encuentra paralelo al túnel piloto. Las características son las siguientes:

Portal las Américas (Quindío); altitud: 2.417 msnm

Portal Bermellón (Tolima); altitud: 2.505 msnm

Andenes laterales: 1 m.

Sobre ancho: 2.50 m.

Longitud mínima: 8.8 km.

Ancho de calzada: 10.50 m (dos carriles, bermas y sobre ancho)

Los diseños establecen los siguientes aspectos:

- Pendiente máxima del 1% descendiendo hacia el Quindío
- Pilar de roca entre túneles máximo de 80 m
- Gálibo mínimo de operación vehicular de 4.90 m
- Con revestimiento definitivo en hastiales y bóveda
- Cien por ciento impermeable sobre hastiales y bóveda
- Área mínima de excavación 100 mts²
- Velocidad de diseño mínima de 60 km/h
- Calzada de 10.50 m en concreto hidráulico
- Franja de seguridad de 0.35 m a cada lado, en concreto hidráulico
- Mínimo 10 nichos para parqueo de emergencia
- Mínimo 60 nichos contraincendios
- Mínimo 17 galerías de emergencia (9 peatonales y 8 vehiculares)

REVESTIMIENTO EN CONCRETO LANZADO $e= 0.05$ a 0.10 , REFORZADO CON FIBRAS EN POLIPROPILENO

CONCRETO LANZADO DE SOPORTE $e= 0.03$ DONDE SE REQUIERA

SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN

SISTEMA DE RECUBRIMIENTO

LINEA TEORICA EXCAVACION

AREA EXCAVACION
 $A = 100m^2$

1.00 4.00

18.00

2.0%

2.0%

2.0%

SOBREAÑO 2.50m

CARGAMOS EN CONCRETO CONVENCIONAL

Proceso constructivo.

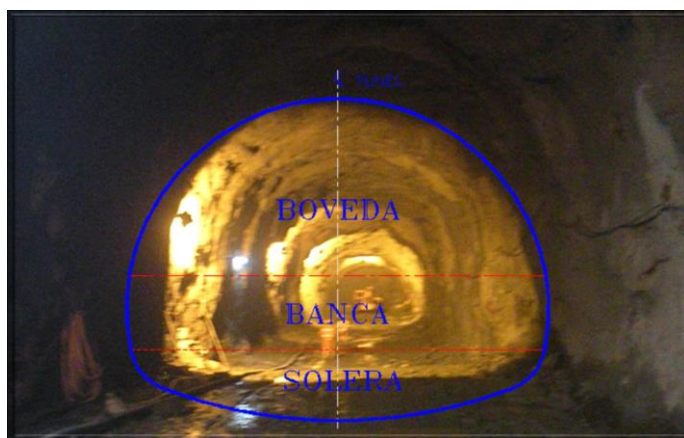
Los sistemas de soporte están dados por las características del terreno, en zonas donde el terreno es consistente se usó pernos y concreto lanzado; en terrenos de baja calidad se usó enfilajes, concreto lanzado reforzado con fibra metálica pernos de acero de 3 m. de longitud y estaciones de monitoreo regular con el fin de medir las deformaciones que viene presentando el terreno.

Por otra parte el material de la excavación del túnel es seleccionado y reutilizado para el tratamiento y manejo especial de los taludes, así como el mantenimiento permanente de la misma.

Los sistemas de excavación en terrenos duros fueron con perforación y voladura controlada en dos etapas, Bóveda y Banca; para terrenos blandos con métodos mecánicos en tres etapas, Bóveda, Banca y Solera. Las excavaciones son realizadas simultáneamente en diferentes galerías como se puede ver el anexo 3. Además el esquema que se está construyendo para el túnel Segundo Centenario corresponde a la Figura 56 y que a la vez corresponde a la de la descripción hecha en la Figura 46.

INVIAS (2.012) describe que el sistema de drenaje de agua subterránea es independiente del sistema de drenaje para aguas en la superficie de la vía.

Figura 56 Esquema del túnel Segundo Centenario, Cámara Colombiana de la infraestructura, 2.011.



En la Figura 57 (a) se puede ver parte del proceso constructivo utilizado en el frente Quindío, al igual que el frente Tolima (ver Figura 57 (b)). En ambos frentes se está perforando con una máquina jumbo, pero en esta zona del frente Quindío el terreno tiene una resistencia menor a comparación del frente Tolima por lo que se ve en la parte superior la implementación de arcos y concreto lanzado; En la Figura 57 (b) del frente Tolima se perciben las marcas donde se realizaran las perforaciones de la zona del contorno, al igual que la zona del cuele.

Figura 57 Frentes Quindío y Tolima – Túnel Segundo Centenario, Cámara Colombiana de la infraestructura, 2.011.



4.3.2. MÓDULO 2: SEGUNDA CALZADA DEL TOLIMA (construcción de la segunda calzada unidireccional del PR35+0000 – PR47+0500 de la vía existente Ruta 40 tramo 03)

En este módulo se construirá la nueva segunda calzada unidireccional entre la intersección Bermellón y la entrada del municipio de Cajamarca, se contará con dos nuevos retornos para conectar la calzada actual y la nueva. El tramo 2 tendrá una longitud aproximada de 9.176 m. Por otra parte, como se había comentado anteriormente este módulo requirió de un nuevo diseño geométrico que tuvo como resultado la necesidad de construir 14 túneles finalmente, algunos de ellos se pueden evidenciar a través de la Tabla 40, en la Tabla 40 (a) se realiza excavación mecánica en el Túnel La Julia. Entre los imprevistos se encuentra el fallo en un túnel corto por efectos de la inestabilidad del suelo, compuesto principalmente por cenizas volcánicas, Tabla 40 (b) describe este hecho y se puede evidenciar en el costado izquierdo del túnel.

Tabla 40 Túneles cortos – Módulo 2, CÁMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA, 2.012.



Los túneles cortos del módulo II requieren de mayor sostenimiento a través de instalación de pernos, arcos, concreto lanzado u otro proceso según lo requiera el terreno, esto sucede debido a la baja resistencia que presentan las zonas; en la Figura 58 se observa el momento en que son instalados los pernos continuo a cada voladura realizada en uno de los túneles.

Figura 58 Instalación de pernos radiales - Galería No 8 hacia Tolima, INVIAS 2.012.



4.3.3. MÓDULO 3: SEGUNDA CALZADA DEL QUINDÍO

En este módulo se construirá la segunda calzada unidireccional entre la glorieta Versailles y la intersección las Américas; que contará con dos nuevos retornos, el primero y el segundo para conectar la calzada actual y la nueva. El tramo 1 tendrá una longitud aproximada de 9.030 m.

Dentro de este tramo se ha incluido la construcción del intercambiador a desnivel de las Américas, y las obras de conexión necesarias para dar continuidad al par vial conformado por la carretera actual, la segunda nueva calzada y la vía de acceso a los Túneles del Segundo Centenario; este servirá de retorno entre la calzada actual y la nueva segunda calzada.

Los diseños geométricos establecieron finalmente la construcción de 7 túneles cortos para este módulo, la Figura 59 muestra la colocación de concreto lanzado del Túnel RCN - el método de construcción y de avance.

Figura 59 Construcción del Túnel RCN, Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2.011.

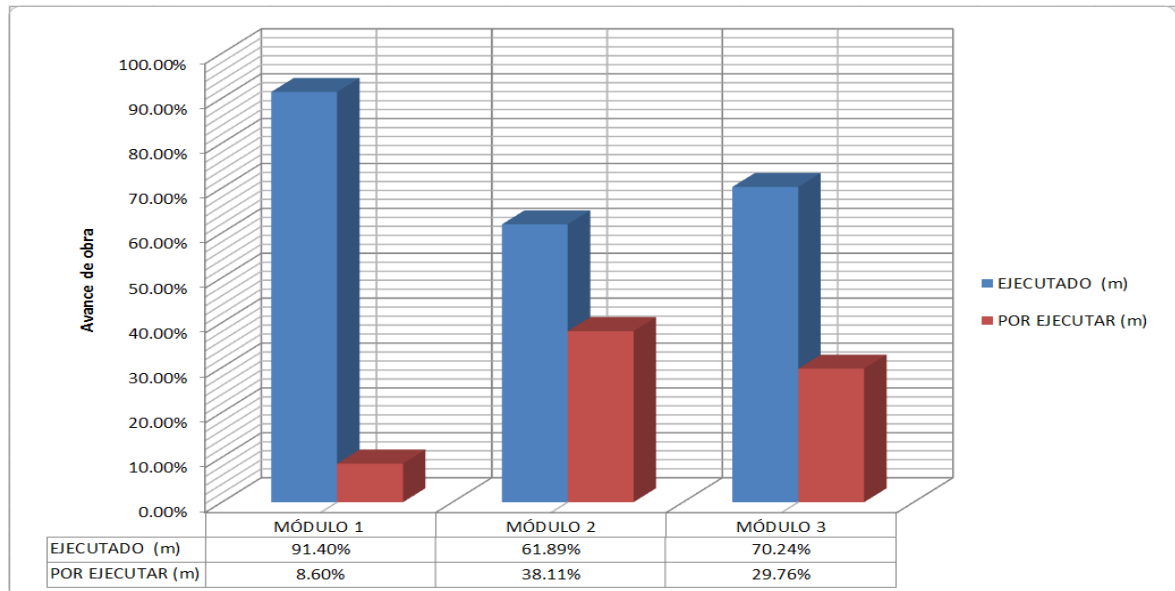


4.5. AVANCE DE OBRA.

El ultimo informe sobre el Túnel Segundo Centenario y segunda calzada calarcá – Cajamarca fue elaborado por el INVIAS en mayo de 2.014, a traves de la Figura 60 se reportan los avances de los 3 módulos correspondientes a el Túnel segundo Centenario (módulo 1), segunda calzada del Tolima (módulo 2) y

segunda calzada del Quindío (módulo 3). Además en las Tablas 41 y 42 se observan los avances de cada uno de los módulos.

Figura 60 Avances en túneles del Segundo Centenario y segunda calzada Calarcá – Cajamarca, modificado de INVIAS, 2.014.



INVIAS (2.014) reporta el avance en 15 galerías a través de la Tabla 41 con fecha del 31 de mayo de 2.014 en el Túnel Segundo Centenario.

Tabla 41 Galerías del Túnel Segundo Centenario, INVIAS, 2.014.

FRENTE		SECCION SUPERIOR (m.)		SECCION COMPLETA (m.)		ABSCISA	TIPO TERRENO ACTUAL
QUINDIO		504,80	504,80	504,80	504,80	K 0+504,80	V
GALERIA 1	HACIA QUINDIO	168,00	183,20	15,20	234,20	K 0+504,80	V
	HACIA TOLIMA	15,20		219,00		K 0+688,00	III
GALERIA 2	HACIA QUINDIO	295,00	641,60	0,00	13,00	K 0+688,00	III
	HACIA TOLIMA	346,60		13,00		K 1+329,60	V
GALERIA 3	HACIA QUINDIO	191,60	516,00	0,00	262,80	K 1+329,60	V
	HACIA TOLIMA	324,40		262,80		K 1+845,60	II
GALERIA 4	HACIA TOLIMA	124,95	219,35	0,00	0,00	K 2+064,95	V
	HACIA QUINDIO	94,40		0,00		K 1+845,60	II
GALERIA 5	HACIA TOLIMA	11,70	281,70	0,00	0,00	K 2+468,00	IV
	HACIA QUINDIO	270,00		0,00		K 2+186,30	III
GALERIA 6	HACIA TOLIMA	5,80	19,70	0,00	0,00	K 2+990,60	III
	HACIA QUINDIO	13,90		0,00		K 2+970,90	III
GALERIA 8	HACIA QUINDIO	17,50	49,50	0,00	0,00	K 3+825,50	IV

	HACIA TOLIMA	32,00		0,00		K 3+875,00	III
GALERIA 9	HACIA QUINDIO	136,50	192,50	0,00	0,00	K 4+215,50	III
	HACIA TOLIMA	56,00		0,00		K 4+408,00	V
GALERIA 10	HACIA QUINDIO	318,10	446,00	0,00	0,00	K 4+824,40	V
	HACIA TOLIMA	127,90		0,00		K 5+270,40	III
GALERIA 11	HACIA QUINDIO	404,70	580,30	0,00	0,00	K 5+354,30	IV
	HACIA TOLIMA	175,60		0,00		K 5+934,60	III
GALERIA 12	HACIA QUINDIO	381,40	424,60	31,00	74,20	K 5+934,60	III
	HACIA TOLIMA	43,20		43,20		K 6+359,20	III
GALERIA 13	HACIA QUINDIO	400,80	838,00	400,80	838,00	K 6+359,20	II
	HACIA TOLIMA	437,20		437,20		K 7+197,20	II
GALERIA 14	HACIA QUINDIO	44,80	58,45	44,80	58,45	K 7+197,20	II
	HACIA TOLIMA	13,65		13,65		K 7+255,65	IV
GALERIA 15	HACIA QUINDIO	480,85	601,65	480,85	509,35	K 7+255,65	IV
	HACIA TOLIMA	120,80		28,50		K 7+857,30	V
TOLIMA		794,27	794,27	794,27	794,27	K 7+857,30	V
TOTAL EXCAVADO		6.351,62		3.289,07			
		72,04%		36,88%			

La Tabla 42 describe los avances en el módulo 2 y 3, en la calzada Tolima se presentan avances en todos los túnel, excepto en los túneles El Cinabrio, Perales, Cristales, La paloma y La curva. Por otra parte en el módulo 3 no hay avance en los túneles Carmelita, Jamaica, El mirador y Vitrinas.

Tabla 42 Avances de la segunda calzada Calarcá - Cajamarca, modificado de INVIAS, 2.014.

MODULO 2 - SEGUNDA CALZADA TOLIMA				
TUNELES				
Sector	Abscisa inicial	Abscisa final	Longitud (m)	% de avance
CINABRIO	K37+258,00	K37+418,00	160,0	25,93
CINABRIO 2	K37+540,00	K37+620,00	80,0	0,00
PLAYITA	K37+690,00	K37+884,50	194,5	8,45
PERALES	K38+270,00	K38+662,00	392,0	0,00
CRISTALES	K38+750,00	K38+880,00	130,0	0,00
LA PALOMA	K39+660,00	K39+870,00	210,0	0,00
LAS MARÍAS	K40+960,00	K41+010,00	50,0	74,26
EL TOPACIO	K41+543,00	K41+678,00	135,0	44,27
LA JULIA	K42+243,22	K42+367,72	124,5	57,55
EL PORVENIR	K42+705,00	K42+895,30	190,3	83,00
BALCONCITOS	K42+940,00	K43+060,00	120,0	83,00
LOS ALPES	K43+131,00	K43+222,20	91,2	17,29

LA CURVA	K43+744,00	K43+796,00	52,0	0,00
ESTRELLA-ITAIC	K44+265,00	K44+350,00	85,0	83,00
MODULO 3 - SEGUNDA CALZADA QUINDIO				
TUNELES				
Sector	Abscisa inicial	Abscisa final	Longitud (m)	% de avance
CARMELITA	K08+070,00	K08+379,00	309,00	0,00
TÚNEL VIRGEN NEGRA	K08+413,50	K08+695,00	281,5	75,90
TÚNEL VIRGEN BLANCA	K08+758,00	K08+854,90	96,9	82,90
TÚNEL RCN	K09+750,00	K09+842,00	92,0	65,70
JAMAICA	K10+615,00	K10+790,00	175,00	0,00
EL MIRADOR	K11+475,00	K11+590,00	115,00	0,00
VITRINAS	K12+430,00	K12+560,00	130,00	0,00

Finalmente para noviembre de 2.016 el túnel del Segundo Centenario debe de entregarse y estar en funcionamiento completamente al igual que los 22 hitos que se quedaron de construir, la Figura 61 es la imagen más reciente de la construcción del túnel y fue publicada tras la suspensión de la obras el 21 de septiembre de 2.015.

Figura 61 Construcción de arcos en túnel de la línea, recubrimiento, INVIAS, 2.015.



4.2. IMPREVISTOS.

1. A través del artículo “el futuro del túnel de la línea” de la revista semana 2.014 algunos imprevistos fueron ocasionados por la ola invernal del 2.010 y por ende el ingeniero Carlos Collins asegura que ha invertido más recursos de los previstos en el túnel de La Línea para el revestimiento de la obra y para hacerle frente a los riesgos geológicos; circunstancias que tienen como resultado las demandas ante el INVIAS.
2. El gobierno dice que se han utilizado los recursos para otros proyectos; fallas geológicas; problemas ambientales por contaminación de fuentes de agua (como el caso de los más de 80 mil habitantes de Calarcá (Quindío) que perdieron la quebradas El Salado y San Rafael, la principal fuente hídrica que abastecía su acueducto); estudios que no previnieron - riesgos técnicos; cambio de diseños y hasta dudas sobre la gestión de la firma interventora.
3. Según el artículo “Los tropiezos del túnel de La Línea” publicado por EL TIEMPO 2.014 la Corporación Autónoma de Quindío (CRQ) impuso la mayor multa en sus 50 años de historia, luego de abrir pliego de cargos contra INVIAS por el incumplimiento de la resolución 238, vigente desde 2.012 y que suspendía el vertimiento de aguas residuales. La multa es de 2.927 millones de pesos y está en proceso de cobro.
4. Sepúlveda (2.014) relata que los trabajadores reclaman mejores condiciones laborales en el túnel de La Línea, dice que existen archivos en la Defensoría del Pueblo del Quindío y de la prensa local de testimonios de algunos trabajadores que afirman que la seguridad en las obras no es la adecuada, además de la exposición a la contaminación y demoras en los pagos de sus salarios.

5. Según el artículo “Suspendidas las obras del Túnel de La Línea durante 10 días” de EL TIEMPO 2.015 tras presentarse un accidente que dejó una persona muerta y tres heridas el Gobierno suspendió por diez días las obras de construcción del túnel de La Línea por falta de garantías en seguridad laboral y salud de los trabajadores.
6. Según el artículo de EL TIEMPO 2.015 “La CAR del Quindío impuso nueva sanción por obras al túnel de La Línea” por 860 millones de pesos. La sanción de la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) fue por el depósito de escombros provenientes de las excavaciones del túnel en tres quebradas de Calarcá. Según explicó el jefe de Procesos Ambientales, Sancionatorios y Disciplinarios de la autoridad ambiental, Alejandro Salcedo Jaramillo, la nueva sanción se dio por obras diferentes a las contempladas en los permisos de ocupación de cauces y por las disposiciones de escombros y materiales en sitios no autorizados.

Además se confirmó en segunda instancia una sanción que impuso la CRQ en enero de 2.014 por 3.080 millones de pesos en contra del constructor. La Corporación señaló que la UTSC contaminó la quebrada La Gata, afluente de la quebrada El Salado que abastecía el acueducto de Calarcá, además deterioró el ecosistema e interfirió en el repoblamiento natural de organismos.

CONCLUSIONES

Esta monografía se planteó como objetivo central el contribuir al conocimiento sobre la construcción de túneles viales en Colombia, considerando la geología, evolución y avances tecnológicos. Para lo cual, se recolectó, procesó y analizó diferente información sobre la geología colombiana, las características y la funcionalidad de los diferentes tipos de túneles viales y, de manera aún más específica, sobre la historia de la construcción de túneles viales, incluidos los proyectos a futuro, en el país. A partir del trabajo adelantado para el desarrollo de este objetivo, se puede concluir los aspectos que se relacionan a continuación.

La estratigrafía, topografía y petrografía es la etapa fundamental que se debe tener en cuenta para iniciar cualquier tipo de proyecto de excavación de túneles, más aún, cuando la zona a explorar presenta gran variabilidad, pues a través del análisis de esa información se determinara el método de excavación más apropiado para terrenos blandos o rocas, además de la maquinaria a implementar.

Colombia es un país que tiene una variabilidad muy alta en su estratigrafía y topografía, por lo tanto se debe recopilar la mayor información posible de la zona a ejecutar, con el objetivo de anticiparse a cualquier imprevisto y asumir los cambios del terreno de la mejor manera posible.

La construcción de túneles en Colombia data del año 1916, aunque se tienen antecedentes del desarrollo de túneles peatonales durante los siglos XVI y XIX. A través de la historia se destacan tres hitos importantes. El primero (1916-1929), asociado con la construcción de túneles férreos, en el que se destaca la construcción de los túneles de Sibate (Cundinamarca) y La Quiebra (Antioquía). En el segundo (1929-1950) el país estaba transitando del medio férreo al transporte por carreteras, dadas las condiciones topográficas y las necesidades de movilizarse, la construcción de carreteras se impuso como el principal medio para el transporte. El tercer hito se asocia con la construcción de túneles viales

(1950-actualidad), aparte de las adaptaciones de importantes túneles férreos a túneles viales como el de Sibate (Cundinamarca), los de la Avenida Santander en Manizales (Caldas) y los de Puerto Wilches (Santander), entre otros; se ve la necesidad de reducir algunos trayectos de carreteras de montañas con túneles viales, entre los desarrollos de proyectos de gran envergadura para el país están el túnel de Boquerón (Meta), Occidente (Antioquia), Sumapaz (Tolima - Cundinamarca), Daza (Nariño) y La Línea (Tolima – Quindío), entre otros.

De esta manera, en la actualidad el país cuenta con 94 túneles viales, ubicados en 11 de los 33 departamentos (principalmente en Santander, Antioquia, Caldas, Quindío y Meta) concentrados hacia la región andina, que es la zona del país que más requiere de estas adaptaciones en las vías. Estos túneles van desde los 20 metros hasta los 8600 metros. El tiempo establecido de la ejecución de estos proyectos es variado por la diversidad del suelo y rocas que presenta Colombia, encontrando proyectos de corta duración, como el del túnel de El Espejo (Caldas), que duró 3 años, hasta proyectos de alta duración como el del túnel Segundo Centenario (Tolima – Quindío), que toma 12 años por la complejidad del control de agua, cambios continuos en los tipos de roca y la contaminación ambiental.

La información sobre los procesos de construcción de túneles en Colombia en bibliotecas e internet es muy escasa, encontrándose principalmente aspectos generales como la longitud, la duración del proyecto, la ubicación y la enunciación del método aplicado; pero no las características específicas durante su desarrollo como el tipo de suelo o roca, los sistemas de sostenimiento, la maquinaria implementada e imprevistos. La información detallada de este tipo de obras se puede obtener a través del INVIAS o de la ANI mediante una solicitud con la información requerida.

Para los próximos años, se tiene previsto el desarrollo de 180 túneles viales en Colombia, entre los que se destaca el proyecto del túnel del Toyo (Nariño) que será el más grande del país con 9750 metros de longitud. Con el desarrollo de estos proyectos se espera abarcar una longitud adicional de 130 kilómetros en los

departamentos de Antioquia, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Tolima y Huila, entre otros.

El proyecto del túnel vial de La Línea lleva 12 años de construcción, encontrándose entre los más largos en Colombia, por su longitud. Este proyecto se estructura en 3 fases, inició en 2005 y actualmente se encuentra en ejecución la fase 2. Durante la primera fase, se aprovechó la oportunidad para estudiar la petrografía de la cordillera central para, así mismo, determinar los imprevistos en los posteriores trayectos. De hecho, estos estudios implicaron cambios en los tramos planeados inicialmente para la fase 3.

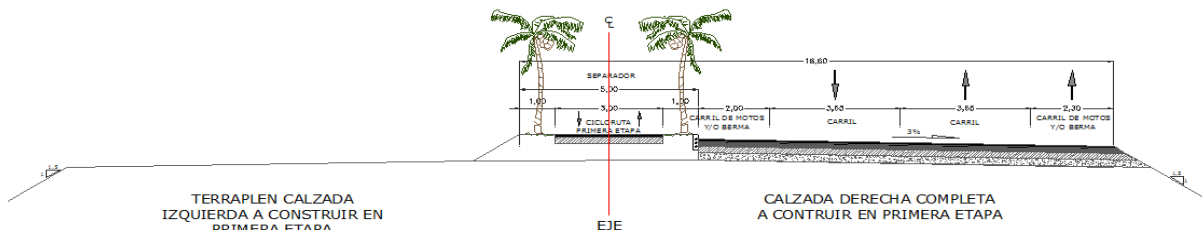
Esta monografía dedica un capítulo a este proyecto vial, por ser el que más ha presentado imprevistos de todo tipo (contractuales, ambientales y técnicos), convirtiéndolo en un excelente referente contemporáneo para los procesos constructivos de túneles viales en Colombia. Por ejemplo, de la experiencia hasta ahora referenciada, se identifica que no se realizó la recopilación de información suficiente de la zona a intervenir, de allí que el proyecto en su etapa de ejecución presente mayores costos económicos y ambientales a los previstos en su etapa de planeación.

ANEXO 1

ALTERNATIVA A TÚNEL

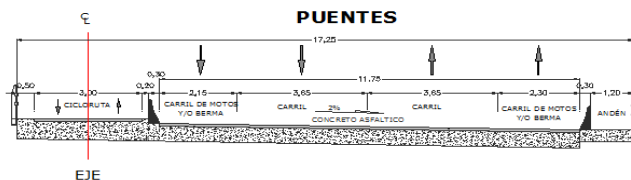
SECCIONES TÍPICAS PRIMERA ETAPA

VIA A SUPERFICIE



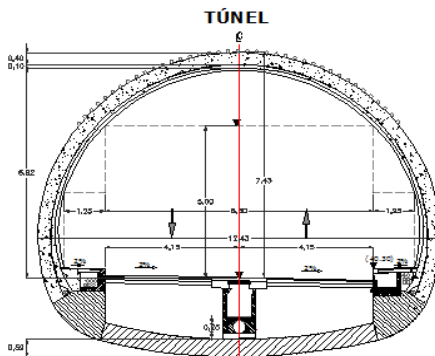
En la primera etapa se construirá el terrapleán completo y las obras de drenaje para las dos calzadas. Se construirá la estructura de pavimento de una sola calzada y el separador con la cicloruta.

PUENTES



En la primera etapa se construirá la calzada derecha del puente incluida la cicloruta.

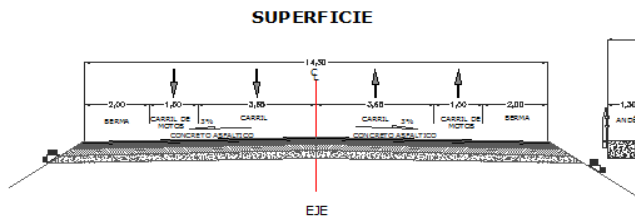
TÚNEL



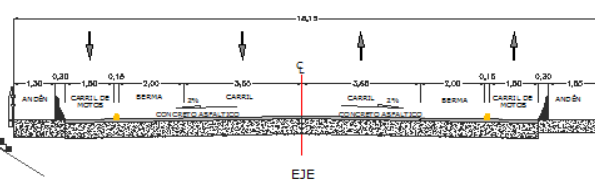
EN LA PRIMERA ETAPA SE CONSTRUIRA EL TUNEL DE LA CALZADA DERECHA

TRAMO SOBRE VIA ACTUAL

SUPERFICIE



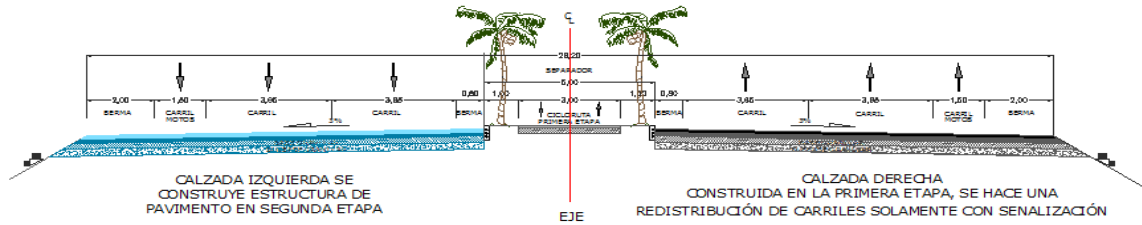
PUENTE NUEVO SOBRE PUENTE ACTUAL



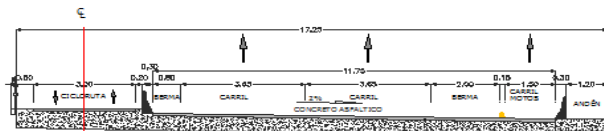
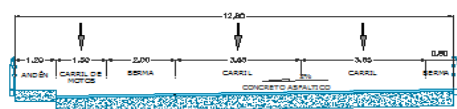
Adicionalmente en la primera etapa se hará la construcción de un puente nuevo, en una sola calzada, sobre el puente actual.

SECCIONES TÍPICAS SEGUNDA ETAPA

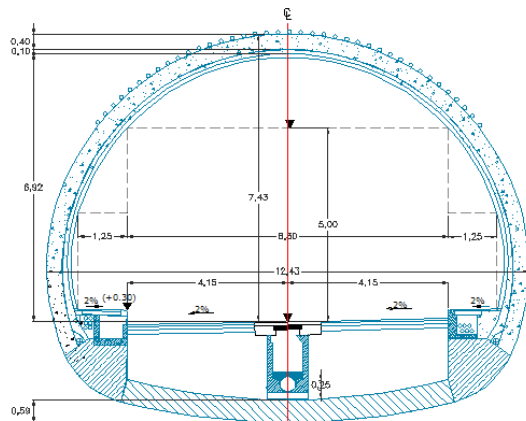
VIA A SUPERFICIE



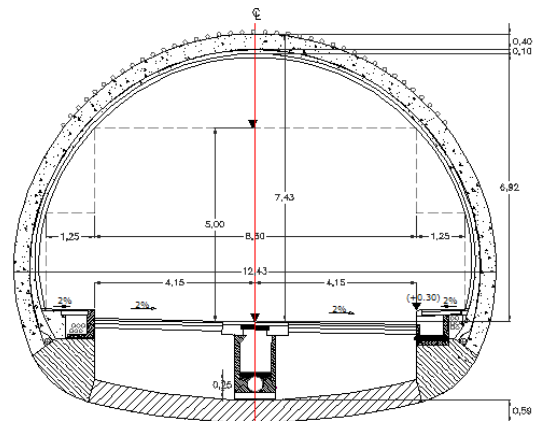
PUENTES



TÚNEL



TÚNEL

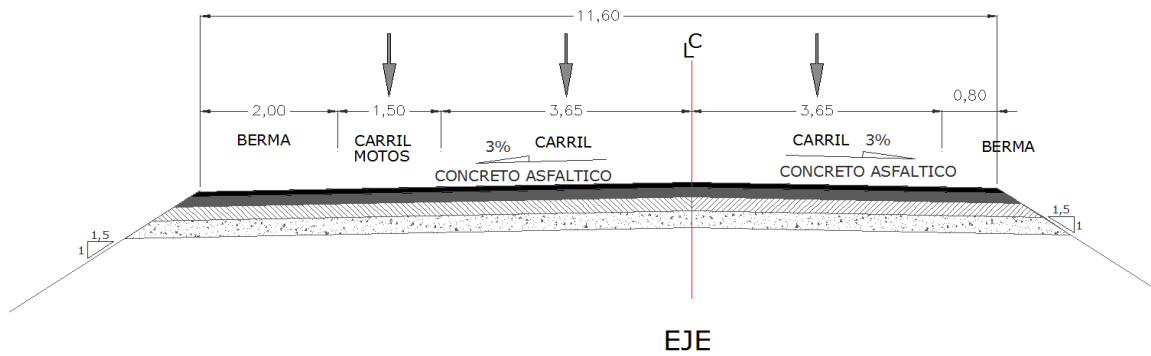


ANEXO 2

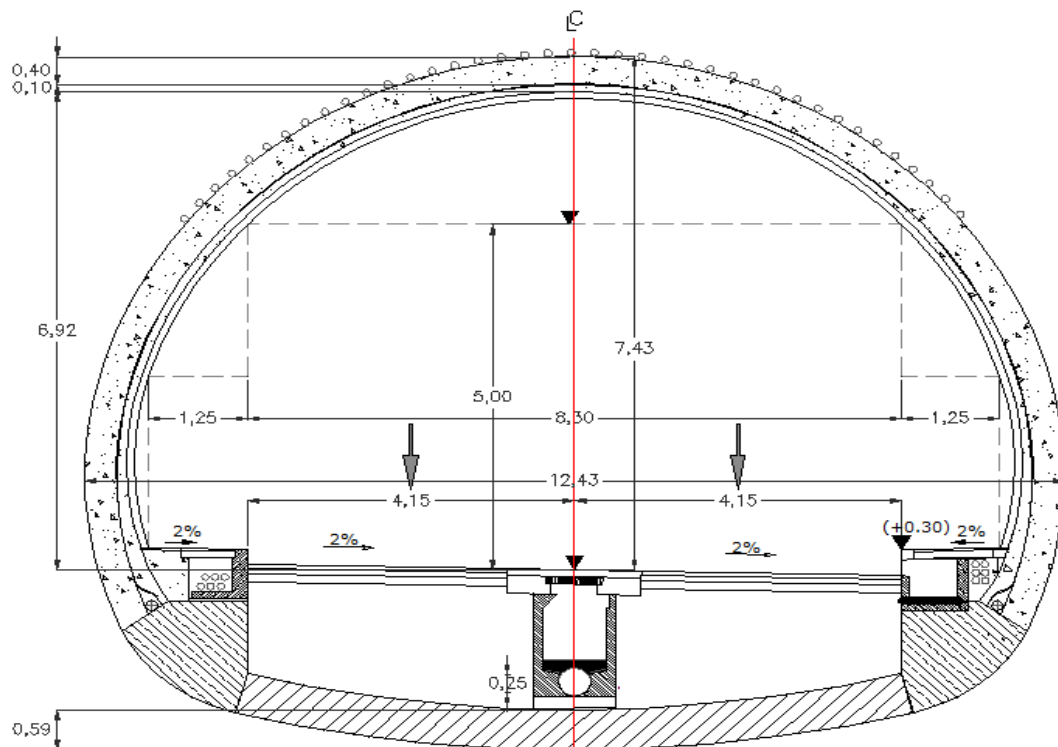
ALTERNATIVA B TÚNEL

SECCIONES TÍPICAS CALZADA IZQUIERDA

VIA SUPERFICIE



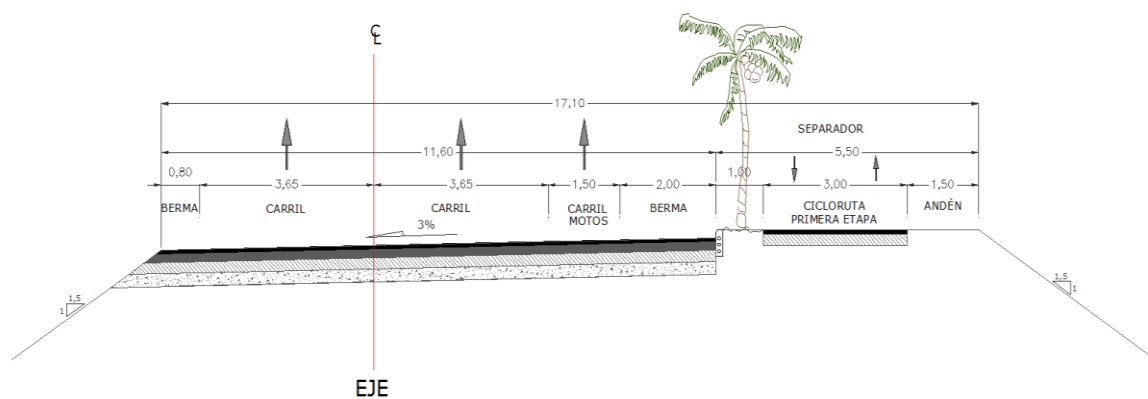
TÚNEL



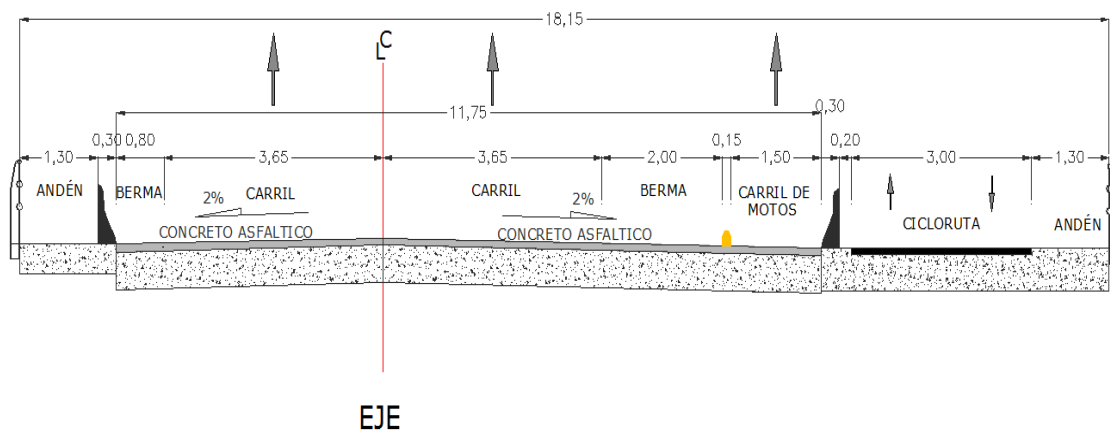
ESCALA 1:75

SECCIONES TÍPICAS CALZADA DERECHA

VIA SUPERFICIE



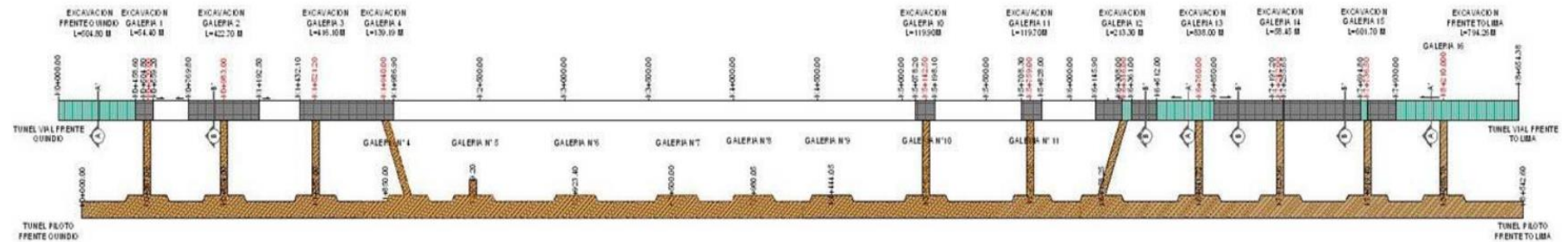
PUENTE NUEVO SOBRE PUENTE ACTUAL



ANEXO 3

ESQUEMA AVANCE DE EXCAVACIÓN
TÚNEL DE LA LINEA

Módulo 1: Tramo 3 - Segundo Centenario - Tunnel de la Linea



REFERENCIAS

ABANDO, D. Proyecto de ejecución de túnel carretero en la N-611, Universidad de Cantabria, escuela politécnica de ingeniería de minas y energía, 2.015.

ALCALDÍA DE SIBATÉ, [en línea] < <http://www.sibate-cundinamarca.gov.co/index.shtml#8>>, [citado el 19 de enero de 2.016].

ALONSO, E. Apuntes de la asignatura de Túneles. Teoría 2ª Parte: N.A.T.M., UPC, E.T.S.E.C.C.P.B. Edición, 2.002.

AMARIS, L. y MAYORGA, N. Análisis de la normatividad Colombiana referente a la seguridad de los túneles viales, Universidad de la Salle, 2008.

ANI (Agencia Nacional de Infraestructura), [en línea] <<http://ani.gov.co/>>, [citado el 25 de diciembre de 2.015].

ARENAS, F. Portafolio, el túnel de La Línea, un sueño de 50 años, el país espera la concreción del proyecto que ya arrancó, aunque no avanza al ritmo que debería, 2.011.

ARDILA, J. en Desarrollo de túneles viales Colombia. [En línea] <http://www.asocreto.org.co/rc_2010/pdf/Presentaciones_finales_RC2010/tuneles/7%20Desarrollo%20de%20tuneles%20viales%20en%20Colombia_Jorge%20Ardila.pdf>, [citado el 4 de octubre de 2.015].

ARDILA, J. y RODRÍGUEZ, A. Túneles viales de carretera en Colombia, una luz para la competitividad en nuestra movilidad, [en línea] <http://app.idu.gov.co/boletin_alejandria/septiembre2013/doc/ULTIMAS%20ADQUISICIONES/doc/TUNELES.pdf>, [citado el 27 de noviembre de 2.015]

ARGOS [en línea] < [http://bibliotecadeobrasargos.co/obras/detalle/tunel-de-sumapaz-o-guillermo-leon-valencia#prettyPhoto\[pp_gal\]/4](http://bibliotecadeobrasargos.co/obras/detalle/tunel-de-sumapaz-o-guillermo-leon-valencia#prettyPhoto[pp_gal]/4)>, [citado el 8 de noviembre de 2.015].

BOHÓRQUEZ, N. Maquinaria para construcción de túneles, Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, 2013.

BARQUEROS, I. Elementos que componen un túnel, Madrid, [En línea] <<https://ecomovilidad.net/madrid/tuneles-madrid-metodos-clasicos/>>, [citado en 15 de diciembre de 2.015].

BARRETT, P. La guía Minova para pernos anclados con resina, 2.008.

BERNAOLA, J., CASTILLA, A. y HERRERA, J. Perforación y voladura de rocas en minería, E.T.S. de Ingenieros de minas de Madrid, 2013.

BERSELLI, L. Geotecnia - Instituto de Geología, Fac. de ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2.015

BURGOS, C., Túneles viales en Colombia: Ingeniería del túnel de Daza, [En línea] < <http://blog.360gradosenconcreto.com/tuneles-viales-en-colombia-ingenieria-del-tunel-de-daza-narino/>>, [citado en 15 de diciembre de 2.015].

CABALLERO, V., PARRA, M. y BOHÓRQUEZ, R. Levantamiento de la cordillera oriental de Colombia durante el eoceno tardío – oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el sinclinal de Nuevo Mundo, cuenca valle medio del Magdalena, 2.010.

CAMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA. [En línea] < <http://www.infraestructura.org.co/> >, [citado en 15 de diciembre de 2.015].

CATÁLOGO - GARIBALDI S.A. Pernos helicoidales A440 y A630, [En línea] <<http://www.jennmar-la.com/catalogo.pdf>>, [citado el 23 de diciembre de 2.015].

CATÁLOGO – CAT. Martillos hidráulicos, [En línea] < <http://www.modelmotor.es/Caterpillar-323D-con-martillo-hidraulico-cat-h120e,-Norscot-55282-escala-150-a55~55282.html>>, [citado el 2 de diciembre de 2.015].

CATÁLOGO - DIRECT INDUSTRY. Jumbo [En línea] < <http://www.directindustry.es/prod/atlas-copco-mining-and-rock-excavation/product-59040-1053363.html>>, [citado el 15 de noviembre de 2.015].

CATÁLOGO – KRHAM. [En línea] <<http://www.krham.com/manguitos-perforacion.html>>, [citado el 25 de diciembre de 2.015].

CATÁLOGO – TEDENZA. [En línea] < http://www.dfdurofelguera.com/catalogo_tedesa/prod/prod_cat/carros_encofr/carros_encofr.pdf>, [citado el 5 de octubre de 2.015].

CHAMORRO, O. Análisis de los movimientos del terreno producidos por la excavación mecánica del túnel de la L9 en la zona de Santa Coloma de Gramenet, Universidad Politécnica de Cataluña, 2005.

CORNEJO, L. " Excavación Mecánica de Túneles", Ed. Rueda, 1988.

CONFIS (CONSEJO SUPERIOR DE POLITICA FISCAL), SOLICITUD DE AVAL FISCAL PARA LA PRIMERA ETAPA DEL PROYECTO “CRUCE DE LA CORDILLERA CENTRAL – TÚNEL II CENTENARIO – LA LÍNEA”, 2.007.

CONPES, Consejo Nacional de Política Económica y Social, modificación al conpes 3084 del 14 de julio de 2000 – aspectos técnicos y de programación para la ejecución del proyecto túnel de la línea, 2.001

Congreso Latinoamericano de Túneles y Espacios Subterráneos del CTES-Chile, El uso del espacio subterráneo en Latinoamérica, 2.014.

CONCRETO - RC por parte de la Asociación Colombiana de Productores de Concreto, ASOCRETO, Jorge Ardila Rueda, GEOTUNELES, COLOMBIA, 2.010.

CONCRETO. [En línea] <<http://concreto.com/tunel-buena-vista-misael-pastrana-borrero>>, [citado el 27 de noviembre de 2.015].

DESIREE, W. *TBM excavation conquers Peruvian Andes* [TBM excavación, conquista Andes peruanos]. [En línea] <<http://www.tunneltalk.com/TBM-Recorder-Jan12-TBM-conquers-Andes-at-Olmos.php>> [citado en 8 de enero de 2.016].

ECHEVERRÍA, J. Interacción suelo - túnel, con revestimiento sometido a carga anisotrópica. Maestría de Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia. [En línea] <<http://www.bdigital.unal.edu.co/10779/1/02300160.2013.pdf>>, [citado el 8 de julio de 2.015].

El Colombiano. [En línea] <<http://www.elcolombiano.com/antioquia/movilidad/cierre-nocturno-en-el-túnel-de-occidente-FB1300733>>, [citado el 15 de octubre de 2.015]

El Espectador. [En línea] <<http://www.elespectador.com/noticias/economia/mas-lunares-25-concesiones-articulo-522229>>, [citado el 3 de enero de 2.016].

El Tiempo. EL TÚNEL MÁS LARGO DE LATINOAMÉRICA, [en línea] <<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-520505>>, [citado el 19 de enero de 2.016]

ESCOBAR, G. Universidad Nacional de Colombia, Manual de Geología para ingenieros, 2.014.

ESTUPIÑÁ, S. Túneles viarios urbanos: diseño, instalaciones y elementos de seguridad, iluminación y equipos auxiliares, Universidad Politécnica de Cataluña Barcelona, 2.002.

FONADE (FONDO FINANCIERO DE PROYECTOS DE DESARROLLO), CORREDOR: SANTANDER DE Q.-CHACHAGÜI Y PASTO-RUMICHACA, 4 G CONCESIONES. GRUPO 2 CENTRO OCCIDENTE VOLUMEN VII DISEÑO CONCEPTUAL DE TÚNELES.

FRUTOS, C. Uso de concreto lanzado reforzado con fibras metálicas en túneles, Mallas electro soldadas, [en línea] <<http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=178215>>, [citado el 6 de noviembre de 2.015].

GIRALDO, M. Productividad de las Máquinas Túneleras tipo TBM Vs. Tipo de Roca. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG, 2009. Vol. 12 N° 23, 53-58 p.

GALVEZ, D. [En línea] <<http://fisica-alperit.blogspot.com.co/2014/06/como-es-el-interior-de-la-tierra.html>>, [citado el 12 de octubre de 2.015].

GONZALEZ H., NUÑEZ T. y PARIS Q. Geografía y geomorfología, mapa geológico de Colombia, memoria explicativa, 1.988,

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. Ingeniería Geológica. Madrid, 2002.

GONZALES, J. Métodos de excavación mecánica, maquinas topo, [en línea] <https://www.google.com.co/search?q=GONZALEZ,+Julio,+M%C3%A9todos+de+excavaci%C3%B3n+mec%C3%A1nica,+maquinas+topo,+2010&biw=1920&bih=955&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj767SezbbKAhVBRiYKHe7WAdUQ_AUIBigB#imgsrc=nmuA0Z62oyoiJM%3A>, [citado el 25 de noviembre de 2.015].

GUZMÁN RONALD, Perforación y Tronadura, Centro de Minería – UC, 2.009.

INCO (Instituto Nacional de Concesiones) / ANI (Agencia Nacional de Infraestructura), [en línea] <<http://ani.gov.co/>>, [citado el 25 de diciembre de 2.015].

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI, [en línea] <igac.gov.co:10040/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/nuestraentidad>, [citado el 27 de diciembre de 2.015].

INVIAS (Instituto Nacional de Vías), [en línea] <<https://www.invias.gov.co/>>, [citado el 27 de diciembre de 2.015].

LÓPEZ, C. Manual de túneles y obras subterráneas, ITGM de España, Segunda edición, 1.997. Madrid.

Manual AIPCR de túneles de carreteras - U.S.A, 2.015.

Manual de Luminotecnia. INDALUX 2pp, iluminación de túneles, 2.002. 235, 237 y 238 p.

Manual - Titán - Manufacturas de Cemento S.A – Gómez, J. Dovelas para túneles, [en línea] <<http://www.titancemento.com/espanol/component/titanpublications/?task=publicationDetails&publicationId=3>>, [citado el 23 de enero de 2.016].

Manual – ZITRÓN. Sistemas de ventilación para túneles, [en línea] <<http://www.canyonequipment.com/admin/files/06%20-%20VENTILATION%20-%20JET%20FANS.pdf>>, [citado el 7 de diciembre de 2.015].

MARTÍNEZ A., regiones naturales, [en línea] <<http://www.todacolombia.com/geografia-colombia/regiones-naturales-colombia.html>>, [citado en de 8 octubre de 2.015].

MARTÍNEZ, J. Análisis del concreto lanzado como revestimiento definitivo para túneles, Pontificia Universidad Javeriana de Colombia, 2.011.

MARTÍNEZ C. y García Henry, Manual para diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera en Colombia, en gestión de, 2.015.

MEGAN, T. y BARTLETT J. Túneles: Planeación, Diseño y Construcción. Noruega. Edición, 1.988.

MENDOZA, G. Dovelas, infraestructura, construcción y tecnología en concreto, [En línea], < <http://www.imcyc.com/revistacyt/sep10/infra3.htm>> [citado el 7 de noviembre de 2.015].

MINISTERIO DEL TRANSPORTE. Infraestructura y desarrollo, túneles para el sector de la infraestructura, 2.009.

MORA, A. El túnel de La Quiebra. Revista Credencial Historia, (Bogotá - Colombia). 1.999.

MONTES. N., ALCÁRCEL F., ALMANZA M., MADRID C. y GÓMEZ M. Mapa Geológico de Colombia, 2.015.

NAVAS, O. Anatomía geológica de Colombia, [en línea] < <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/03ana.pdf>>, [citado el 2 de julio de 2.015]

Normatividad NFPA 502. Norma nacional para seguridad frente a incendios en túneles de carretera- estados unidos, 2.004.

Normativa (CETU) Es la más restrictiva y completa que existe en la actualidad a nivel europeo, normativa francesa realizada por el Centro de estudio de los túneles, 2.004.

Normativa española IOS'98, 1.998.

Norma Técnica Colombiana NTC 3966 correspondiente al TRANSPORTE DE MERCANCÍAS PELIGROSAS CLASE 1. EXPLOSIVOS. TRANSPORTE TERRESTRE POR CARRETERA, 1.996.

Norma técnica complementaria a la IOS'98 de aplicación en Barcelona, 2.001.

Normatividad (PIARC) (Asociación Internacional Permanente del Congreso de Carreteras), 1.995.

Normas técnicas sobre túneles – Japón, 1.991.

OCHOA, R. Concreto lanzado para túneles y taludes, [En línea] <<http://www.revistacyt.com.mx/pdf/febrero2014/especial.pdf>>, [citado el 7 de octubre de 2.015].

OSORIO, J. Blog 360° en concreto, “Colombia de túneles: túneles carreteros”, [en línea] <<http://blog.360gradosenconcreto.com/colombia-de-tuneles-tuneles-carreteros/>>, [citado el 4 de enero de 2.016].

OSORIO, J. Blog 360° en concreto, “TUNELES, COLOMBIA, UN PAIS DE TUNELES, [en línea] <<http://blog.360gradosenconcreto.com/colombia-un-pais-de-tuneles/>>, [citado el 16 de noviembre de 2.015].

PALACIOS, S. Estudio comparativo de métodos de excavación de túneles en suelo mediante el método de los elementos finitos, Escuela politécnica, 2.015

PEREZ, D. Propuesta de técnica para la determinación del comportamiento del terreno en excavaciones subterráneas con base en un túnel exploratorio. Caso: túnel de la línea, Universidad Nacional de Colombia, 2.012.

PEREZ, R. Túneles viales en Colombia parte 1, 2.011, 9 diapositivas.

PUERTO, J. Desarrollo de túneles viales en Colombia; Pontificia Universidad Javeriana, túneles viales en Colombia parte 1, 2.009.

RAMÍREZ, P. Y ALEJANO, L. Mecánica de Rocas, Fundamentos e Ingeniería de Taludes, 2.004.

RAMÍREZ, P. Agencia Nacional de Infraestructura, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, Jornada académica sobre túneles en Colombia, Procedimientos constructivos, soportes y revestimiento e hidrogeología en túneles, 2.012.

Regiones de Colombia. [En línea] < <http://www.colombia.com/colombia-info/informacion-general/geografia/regiones/>>, [citado el 23 de julio de 2.015]

REY, A., Departamento de Constructoras y Grandes Obras de SIKA, S.A., 2.006.

REYES, A. Gran metropolitano de Barcelona, Proceso del método tradicional, entibación. [En línea] < <http://www.granmetro.es/historia/las-obras/>>, [citado el 27 de diciembre de 2.015].

RODRÍGUEZ, K. Subsistencia por la construcción de túneles en suelos blandos saturados, Universidad Nacional de Colombia, 2.014.

RODRÍGUEZ, R., ADASME, E. y PINTO, A. Perforación de avance de galerías y túneles con Jumbo. Universidad Tecnológica de Chile, 2.012.

ROJAS, S. Métodos de excavación de túneles. Zonas de detonación, Universidad de los Andes Mérida Venezuela, túneles, 2.009.

SALAZAR, H. Avances en el diseño y la construcción de túneles carreteros en Colombia, TALLER INTERNACIONAL DE TÚNELES Y OBRAS SUBTERRANEAS, 2.009, 12 p.

SENA, F. Desarrollo de una herramienta para diseño de voladuras en túneles, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, 2.013.

Servicio Geológico Colombiano, [en línea] <<http://d3tny1ui5p1e3y.cloudfront.net/detalles.html?id=12421>>, [citado el 24 de agosto de 2.015].

SERVICIO DE INGENIERÍA LTDA, [en línea] <<http://serviciodeingenierialtda.blogspot.com.co>>, [citado el 22 de noviembre de 2.015].

SIERRA, M., GARCÍA, C., NIETO, E. y ORTIZ, N. Geología y Geomorfología, origen de las cordilleras Colombianas, [en línea] <<http://geologygeomorfobosque.blogspot.com.co>>, [citado el 24 de agosto de 2.015].

TARBUCK Y LUTGENS, Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física – geomorfológica, 2.005.

TORIJA, M. Máquinas rozadoras, Rozadora MT520i. Nuevos desarrollos en rozadoras, excavación, SANDVIK Española, S.A. 32p, 2.012.

UPC - Universidad Politécnica de Cataluña, Tema V. Túnel circular en terreno elastoplástico. Curvas características, Opciones de sostenimiento. UPC, 2.010.

VARGA, M, análisis del concreto lanzado como revestimiento definitivo para túneles, Pontificia Universidad Javeriana, 2011.

VARGAS, C., PUJADES, L., UGALDE, A. y CANAS, J. Estado de deformación y esfuerzos en el territorio colombiano, Departamento de Geociencia, Universidad Nacional de Colombia, Bogota,D.C.,2002

VILLAGARY, A. CENTRO DE TECNOLOGÍA MINERA (CETEMIN), 2014.

WEGENER, A. El origen de los continentes y océanos. Edición de Francisco Pelayo. Clásicos de la Ciencia y la Tecnología, Crítica, Barcelona. 2009.