

**CUALIFICACIÓN CUANTITATIVA DE LAS PATOLOGÍAS EN EL PAVIMENTO
FLEXIBLE PARA LA VIA SIBERIA – TENJO EN LA SABANA DE BOGOTÁ**

DANIELA LISBETH ROMERO SARMIENTO

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL
BOGOTA D.C. 2017**

**CUALIFICACIÓN CUANTITATIVA DE LAS PATOLOGÍAS EN EL PAVIMENTO
FLEXIBLE PARA LA VIA SIBERIA – TENJO EN LA SABANA DE BOGOTÁ**



Autor: Daniela Lisbeth Romero Sarmiento

**Tesis presentada para cumplir con los requisitos finales para la obtención
del título de Ingeniera Civil**

Director: Ing. Ender Jhobany Orduz Duarte csv.

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL
BOGOTA D.C.
Octubre de 2017**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 14 de noviembre de 2017

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. INTRODUCCIÓN	10
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	10
1.3. ALCANCE GENERAL DE LA TESIS	12
2. GENERALIDADES DEL PROYECTO	12
2.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	13
2.2. OBJETIVOS.....	15
2.2.1. Objetivo general	15
2.2.2. Objetivos específicos.....	16
2.3. DELIMITACIÓN	16
2.3.1. Espacio Temporal y Geográfico	16
2.3.2. Contenido	16
2.3.3. Alcance.....	16
2.4. MARCO REFERENCIAL	17
2.4.1. Marco teórico.....	17
2.4.2. Marco conceptual	19
2.5. METODOLOGÍA	22
2.5.1. Tipo de estudio.....	22
2.5.2. Fuentes de información	22
3. ANTECEDENTES.....	23
3.1. CONCEPTOS GENERALES	23
3.1.1. Clasificación de pavimentos.....	23
3.1.2. Arcillas y minerales arcillosos	29
3.1.3. Desecación de arcillas.....	31
3.2. PAVIMENTO FLEXIBLE	42
3.2.1. Funciones de las capas de un pavimento flexible	45
3.2.2. Aspectos que debe cumplir un pavimento flexible.....	50
3.2.1. Tipos de fallas	52
4. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	66
4.1. GENERALIDADES	66
4.1.1. Localización.....	66
4.2. CLIMATOLOGÍA E HIDROLOGÍA	67

4.2.1. Temperatura	67
4.2.2. Precipitación	70
4.2.3. Evapotranspiración	76
4.2.4. Características hidrográficas	76
4.3. VEGETACIÓN Y USO DEL SUELO	76
4.3.1. Vegetación	77
4.3.2. Cultivos	78
4.4. AGUAS SUBTERRÁNEAS	78
4.5. GEOLOGÍA DEL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ	79
4.5.1. Geología	79
4.5.2. Estratigrafía	81
4.6. PATOLOGÍAS ASOCIADAS A LA VEGETACIÓN DE LA ZONA	84
5. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACION Y CALIFICACION DEL	85
PAVIMENTO	85
5.1. ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO (PCI)	85
5.2. INSPECCIÓN VISUAL	87
5.2.1. Tramo1	90
5.2.2. Tramo 2	92
5.2.3. Tramo 3	94
5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	95
5.3.1. Relación de patologías con aspectos ambientales, geológicos o de	98
uso del suelo	98
5.3.2. Incidencia de las patologías en la zona de estudio	99
6. CONCLUSIONES	101
7. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	104
BIBLIOGRAFÍA	105

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Patologías del pavimento flexible (Sebastián Pardo - 2014)	11
Figura 2 Índices del suelo Sondeo 1 y 2 (Pineda 2014)	15
Figura 3 Patologías generadas por cambios volumétricos del suelo (Pineda - 2014)	
.....	18
Figura 4 Tetraedro de Silicio (Schifter y Domínguez, 1992)	19
Figura 5 Capilaridad (White 1999)	20
Figura 6 Patologías (Rueda, 2012)	21

Figura 7 Pavimentación flexible (Loboguerrero, 1998)	22
Figura 8 la Parte figura (a) corresponde al antes de la vía pavimentada y la figura (b) al después de la vía pavimentada en el municipio de Santa Ana (Aguilar, 2015).	24
Figura 9 Capas que conforman un pavimento flexible (Martínez, 2015).....	25
Figura 10 Distribución de esfuerzos en pavimento flexible (Lekarp et al., 1997) ...	26
Figura 11 Capas de una estructura de pavimento rígido (CANACEM, 2014)	27
Figura 12 Elementos estructurales de un pavimento en adoquines (ASCE, 2010)	28
Figura 13 Estructuras atómicas básicas de los minerales de arcilla (a) Unidad tetraédrica y (b) octaédrica (Whitlow, 1994)	29
Figura 14 (a) y (b) Tetraedro de silicio, (c) Octaedro de aluminio, (d) Octaedro de magnesio, (e) Silice, (f) Gibbsita y (g) Brucita (Lambe y Withman, 2002)	30
Figura 15 Estructura Atómica de la caolinita (Mitchell y Soga, 2005)	31
Figura 16 Estructura atómica de la Montmorillonita (Mitchell y Soga, 2005)	31
Figura 17 Comparación entre el comportamiento volumétrico en secado (A) y compresión unidimensional (B) de la arcilla de Bogotá reconstituida a 350 kPa (Pineda y Colmenares, 2000)	33
Figura 18 Cuarzo Lodolita (Petrology, 2015).....	33
Figura 19 Hidrocarburos de Lutita (Martínez, 2014)	34
Figura 20 Argilita (Pardo, 2010)	35
Figura 21 Influencia de las raíces de los árboles en el equilibrio de humedad de un suelo arcilloso. (Roberts, Jackson y Smith; 2006)	36
Figura 22 Sistema Radicular (FUNDESYRAM, 2012)	37
Figura 23 Mecanismos probables de falla de la subrasante arcillosa de la vía Siberia - Tenjo: a) condición inicial de fracturamiento de la subrasante y pérdida de continuidad, b) falla de una columna de suelo y deformación de la estructura de pavimento, c) falla por corte de columnas intensamente fracturadas u ruptura del pavimento, (Vesga, Caicedo y Mesa; 2002).....	37
Figura 24 Relaciones entre la succión, el contenido de humedad y la contracción para la arcilla de Londres, Fuente: Beltrán (1979), adaptado de Black et al (1958).	38
Figura 25 Mapa hidrogeológico de la sabana de Bogotá (INGEOMINAS, 2000)...	39
Figura 26 Zona de depresión con fisuración de media luna en el Occidente de la Sabana de Bogotá (Rueda y Pineda, 2011)	42
Figura 27 Hundimiento en pavimento flexible (Villalobos, 2002)	42
Figura 28 Fisura de borde (GEOTEXAN, 2015)	43
Figura 29 Sección típica de un pavimento (Montejo, 2002).....	44
Figura 30 Estructuras de pavimento ensayadas en un HVS (Rondón y Reyes, 2007)	45
Figura 31 Desarrollo de deformación permanente en experimentos del Transport	

Research (Rondón y Reyes, 2007)	45
Figura 32 Propagación de la presión de la carga de rueda a través de la estructura de pavimento (Asphalt Institute Thickness Design Manual, 2014)	51
Figura 33 En la parte (a) se puede distinguir la orientación de la fisura longitudinal y en la parte (b) la de las fisuras transversales (INVIAS, 2006)	55
Figura 34 Fisuras en junta de construcción (a) longitudinales y (b) transversales (INVIAS, 2006)	56
Figura 35 Fisuras por reflexión de juntas en placas de concreto (INVIAS, 2006) ..	57
Figura 36 Fisura en medialuna (INVIAS, 2006)	57
Figura 37 Fisuras de borde (INVIAS, 2006)	58
Figura 38 Fisuras en bloque (INVIAS, 2006).....	59
Figura 39 Piel de cocodrilo (INVIAS, 2006)	60
Figura 40 Abultamiento (INVIAS, 2006)	61
Figura 41 Hundimiento (INVIAS, 2006)	62
Figura 42 Descascaramiento (INVIAS, 2006)	63
Figura 43 Bache (INVIAS, 2006)	64
Figura 44 Parche (INVIAS, 2006)	64
Figura 45 Separación de la berma (INVIAS, 2006)	65
Figura 46 Localización del área de estudio Siberia - Tenjo (Google maps)	67
Figura 47 Temperatura media anual de Cundinamarca (IDEAM, 2014)	69
Figura 48 Precipitación total mensual promedio histórico 1981-2010 vs mes de Julio de 2017 (IDEAM, 2014)	71
Figura 49 Precipitación diaria (a) Estación Bogotá – Centro y (b) Aeropuerto El Dorado – Bogotá D.C. (IDEAM, 2014)	71
Figura 50 Precipitación mensual (a) estación Bogotá D.C. y (b) Bogotá Centro (IDEAM, 2017)	72
Figura 51 Plantaciones de árboles como cercado en la zona de estudio. (Orduz, 2017)	76
Figura 52 Cercas vivas de pino ciprés (Rueda, 2012)	77
Figura 53 Complejo Guadalupe (INGEOMINAS, 2004)	78
Figura 54 Esquema geológico del cuaternario de la zona S de la Sabana de Bogotá	78
Figura 55 Formación Bogotá (Hoorn, 1988)	81
Figura 566 Tramo de inspección No. 1 (Google Maps, 2017)	86
Figura 577 Tramo de inspección No. 2 (Google Maps, 2017)	86
Figura 588 Tramo de inspección No. 3 (Google Maps, 2017)	87
Figura 59 Grieta de Borde	93
Figura 609 (a) Piel de cocodrilo (Autor, 2017) y (b) combinación de daños (Rueda, 2012)	95

TABLA DE TABLAS

Tabla 1 Leyenda del Mapa hidrológico de la Sabana de Bogotá (INGEOMINAS, 2000)	40
Tabla 2 Materiales de subbase (SCT, 2006)	46
Tabla 3 Materiales de base (SCT, 2006)	47
Tabla 4 Requisitos de los agregados para bases granulares (IDU, 2005).....	48
Tabla 5 Especificaciones granulométricas para materiales pétreos (Olivera, 2004)	50
Tabla 6 Causas y severidades de fisuras longitudinales y transversales (INVIAS, 2006)	55
Tabla 7 Causas y severidades de fisuras en juntas de construcción (INVIAS, 2006)	56
Tabla 8 Causas y Severidades de las fisuras en bloque (INVIAS, 2006)	59
Tabla 9 Piel de cocodrilo (INVIAS, 2006)	60
Tabla 10 Causas y Severidades de los hundimientos (INVIAS, 2006)	62
Tabla 11 Causas y severidades de descascaramientos	63
Tabla 12 Causas y severidades de los baches (INVIAS, 2006)	64
Tabla 13 Temperaturas máximas promedio de la región (IDEAM y FOPAE, 2004)	70
Tabla 14 Estación 2120136 STA INES (IDEAM, 2014)	73
Tabla 15 Estación: 2120557 PRIMAVERA LA (IDEAM, 2014)	74
Tabla 16 Fallas Asociadas a la Vegetación de la zona	82
Tabla 17 Rangos de Calificación del PCI (Ospina, 2010)	84
Tabla 18 Tramo 1 de Inspección (Autor, 2017)	87
Tabla 19 Tramo 2 de Inspección (Autor, 2017)	89
Tabla 20 Tramo 3 de Inspección (Autor, 2017)	91
Tabla 21 Porcentajes por tipo de daño (Autor, 2017)	92
Tabla 22 Porcentajes de daños (Desecación)	93
Tabla 23 Relación de Patologías por Tramos (Autor, 2017)	96

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El suelo del occidente de la Sabana de Bogotá está conformado en su mayoría por arcillas expansivas con una condición de desecación que se asocia directamente como la causa de algunas patologías presentes en la estructura de pavimento de la zona. Algunas conclusiones preliminares sobre el tema de múltiples investigaciones están relacionadas con la vegetación no nativa por la extracción masiva del agua, la evaporación en sequía y la extracción del agua subterránea para diferentes usos de los habitantes, las cuales se catalogan como las causas de algunas de las patologías que se presentan.

En la formación Sabana de Bogotá los depósitos sedimentarios de tipo arcilloso inicialmente eran suelos saturados que debido al peso que generan los sedimentos se han consolidado con el pasar del tiempo, en el cual también es sometido dicho deposito a cambios de humedad por la variación climática, la extracción de agua subterránea permanente y la evapotranspiración (Pinto, 2012).

El potencial de expansión y de contracción de las arcillas por pérdida de humedad, causa la pérdida de continuidad del suelo y por ende quitándole soporte a la estructura sobre el mismo, dejando a la exposición de los daños de la subrasante; este fenómeno es aún más fuerte en las zonas que presentan árboles y pastos cercanos, por la sección que realizan las raíces de los mismos en cualquier dirección radial (Pineda Jaimes, y otros, 2015).

El presente trabajo se concentra en la caracterización de los tipos de patologías presentes en la zona y la incidencia de las mismas en la funcionalidad de la vía y la seguridad del usuario, teniendo en cuenta la asociación de las patologías encontradas con los aspectos ambientales, geológicos y de usos del suelo; dichas patologías generan problemas para los procesos de mantenimiento y recuperación de la estructura de pavimento y por ende afectan en la seguridad y comodidad de los usuarios.

1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, los 12 Km de vía que conducen de Siberia a Tenjo, en su mayoría presenta grietas, hundimientos y baches de tamaño considerable que dificultan la adecuada movilidad de la región, además de ello la vía no cuenta con bermas ni

andenes para peatones, los cuales son comunes en la región por la actividad económica de la misma. todos estos aspectos afectan directamente a la movilidad, la seguridad y las velocidades de desplazamiento de los vehículos, además de tener una configuración geométrica que en algunos sectores no cuenta con el diseño horizontal adecuado para la movilidad de vehículos articulados que, aunque son poco frecuentes en la región, se presentan en ocasiones generando riesgo en la movilidad y pérdida de los niveles de servicio de la vía (Cruz, 2017).

En la actualidad, en la vía Siberia – Tenjo en el occidente de la sabana de Bogotá, se evidencian daños superficiales, entre los cuales los más llamativos son las grietas profundas, los hundimientos, las ondulaciones y en un segundo plano el descascaramiento y la piel de cocodrilo; estas patologías que presenta la vía están repercutiendo en la funcionalidad de la misma, en la seguridad del usuario y además debido a la cantidad de vegetación presente a lo largo del correo vial se presenta pérdida de espacio disponible para la movilidad por la invasión de esta vegetación sobre la calzada (Pardo, 2014)

Figura 1 Patologías del pavimento flexible



(Sebastián Pardo - 2014)

Las patologías que se evidencian en el pavimento se deben en su mayoría a la composición del suelo (arcillas expansivas), la estructura del pavimento en la cual se destaca la falta de drenaje superficial y la vegetación no nativa que funciona como cerca viva a lo largo de la vía, que ocasiona succión en los suelos arcillosos (Pinto, 2012) algunos autores han relacionado los tipos de vegetación con mediciones a la succión producida por diversos tipos de árboles y se propone que para la vegetación de la región puede tener presiones de succión que oscilan entre los 1000 KPa y los 1500 KPa (Arias, 2012); todos estos factores repercuten en la funcionalidad de la vía.

El desarrollo de este proyecto se realiza con el fin de analizar la incidencia de las patologías y el nivel de afectación que estas demuestran en el tramo de carretera

que conduce desde la vereda de Siberia en el municipio de Cota con el casco urbano del municipio de Tenjo en Cundinamarca, identificando la incidencia que tienen las patologías del pavimento en la movilidad del sector, es pertinente clasificar en el estudio las patologías ligadas a la fatiga de la carpeta de rodadura y los niveles de incidencia, así como las fallas asociadas a problemas de la estructura de pavimento, considerando con ello las posibilidades de que la falla dependan de las capas granulares o de la subrasante de la vía.

1.3. ALCANCE GENERAL DE LA TESIS

Con el presente trabajo de grado se busca identificar las condiciones de movilidad y afectación ocurrente por patologías en el pavimento, ocasionadas por aspectos normales de uso, por la influencia de los factores climáticos o por afectaciones de problemas geológicos en una zona del occidente de la Sabana de Bogotá en la que se encuentran suelos compuestos por arcillas expansivas, y se presenta una pérdida continua de humedad en los suelos localizados sobre el nivel freático. sobre las patologías existentes en la estructura de pavimento se espera establecer las relaciones con las características de la vía y condiciones de diseño geométrico y estructural (tales como el drenaje superficial, espesores de capas, entre otros), teniendo en cuenta al mismo tiempo las afectaciones sociales que conllevan para el entorno.

Identificar la relación del abatimiento del nivel freático con las patologías que se presentan en los suelos arcillosos y, además, el comportamiento del suelo en el sostenimiento de las cargas por la pérdida continua de humedad a causa de factores diversos. Se correlacionarán las patologías con la posible solución que mejore las condiciones de movilidad de la vía en términos de la funcionalidad y seguridad del usuario.

2. GENERALIDADES DEL PROYECTO

2.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El occidente de la Sabana de Bogotá es una zona principalmente agrícola, en esta zona debido a su actividad comercial y con su alto crecimiento residencial por efecto de la necesidad de muchas personas de alejarse de la congestión de la ciudad capital las vías son uno de los medios importantes para el desarrollo social y económico (Pardo, 2014). La estratigrafía de la región comprende la formación sabana dispuesta sobre una conformación geológica del cretácico de la cual aflora la parte superior (formación Guadalupe), formada principalmente por areniscas y con un espesor promedio de unos 500-600 m. Por encima de la formación Guadalupe (coniaciense-maestrichtiense) se encuentra la formación Guaduas, con unos 500-800 m caracterizados por marcar el tránsito de las condiciones marinas propias del cretácico a las continentales propias del terciario (Julivert, 1963)

En esta misma región y sobre las formaciones que emergen cuando se levanta el lecho marino se produce la formación Sabana conformada superficialmente por suelos arcillosos y limosos de origen lacustre, este relleno cuaternario se distingue depósitos detríticos torrenciales, limos y arcillas blancas con un espesores variables que en algunos lugares exceden los 500 metros y que varían con la cercanía a los afloramientos rocosos que dieron lugar a la configuración de la zona lacustre (Julivert, 1963). Fredlund (1994), plantea que los cambios de humedad de los materiales arcillosos están ligados intrínsecamente a variaciones en las presiones del agua de poros, aún si éstos se encuentran saturados en depósitos de suelo por encima del nivel freático. La influencia de los cambios de humedad en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos se hace evidente con las grietas que se perciben en suelos arcillosos en la superficie en las oleadas de calor.

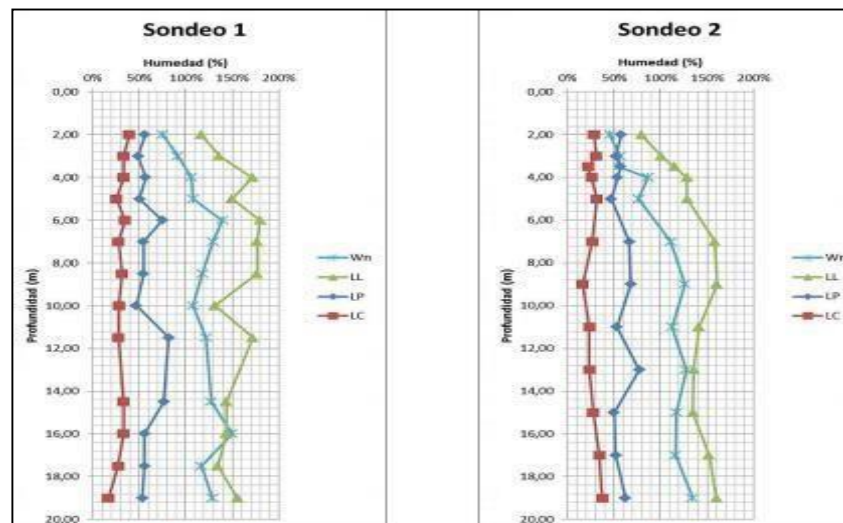
El corredor vial de la zona en estudio se encuentra en una región en la que predominan las actividades agropecuarias, el sector en general está cubierto de pastos y arboles como el pino, la acacia y el eucalipto que demandan humedad del suelo por la longitud de las raíces y la afectación del material, así como por la extracción de agua para la ganadería, la industria y el consumo, lo que ocasiona que el balance hídrico sea insuficiente, es decir, la cantidad de agua que se pierde del suelo no se logra compensar con el agua lluvia o de escorrentía, esto indica que se presenta desecación por pérdida de humedad hacia la atmosfera. Tal condición ocasiona que el nivel freático en el suelo haya presentado descenso medido entre 5 y 7 metros lo cual repercute negativamente en la estabilidad, durabilidad y funcionalidad de vías y estructuras livianas (Pardo, 2014).

En varias ocasiones autores como Vesga (2002), Vesga *et al* (2003) Rueda y Pineda (2012), Pineda y Arias (2015), Orduz (2017) entre otros, han estudiado la zona del corredor vial Siberia -Tenjo en el cual han encontrado diferentes patologías en niveles variables. Con los estudios realizados, han llegado a correlacionar aspectos como la composición del suelo, los contenidos de humedad, la relación de vacíos y la desecación que se presenta en la zona con dichos deterioros de la vía; y además de ello encontraron que dicha desecación causa el endurecimiento de las arcillas y contribuye a la profundidad de las grietas (Ordoñez, 2015)

Según lo analizado por Pineda (2014), la desecación y por ende la contracción volumétrica son factores que afectan directamente la funcionalidad en la vida útil de las estructuras apoyadas en suelos arcillosos expansivos, lo que conlleva a numerosas patologías entre las cuales la más enmarcada son las grietas profundas.

Por estudios realizados en la zona se ha encontrado que el limite liquido está en un rango de 100% a 190% y a través de sondeos se encontró que la humedad natural del suelo se encuentra muy cercano al límite plástico con valores de humedad entre el 50% y el 80%, pero en sondeos de 6 metros de profundidad se encuentran valores de humedad cercanos al 100%, en los cuales la diferencia de humedad se da por la vegetación y la absorción de agua del suelo, por ello se deduce que el primer sondeo sufre de desecación considerable, con lo cual se determinó que la zona de influencia de desecación oscila entre los 5 y 6 metros de profundidad (Pineda, 2014).

Figura 2 Índices del suelo Sondeo 1 y 2



(Pineda 2014)

Se encontró que en profundidades mayores a 6 metros la humedad y el límite líquido toman valores muy cercanos de lo que se interpreta que cuando varíe el contenido de agua en el suelo, el volumen de dicho suelo será variable por las características expansivas del mismo y la composición que presenta de montmorillonita e illita (Pineda, 2014)

En la vía la estructura de pavimento presenta unas deformaciones considerables en forma de hundimientos de la capa de rodadura, los cuales en su mayoría se encuentran localizados en las inmediaciones de los árboles y arbustos que se encuentran en la zona, además se evidencian grietas longitudinales en superficie y patrones de media luna, los cuales influyen en la movilidad y la eficiencia de la vía (Pineda Jaimes, y otros, 2012)

Cuando se presentan continuas repeticiones de carga en el pavimento, se presentan agrietamientos debido a que los esfuerzos cortantes y de tensión superan los admisibles por la estructura, es en este punto en el cual los materiales del pavimento pierden la capacidad de resistir por la presencia de cargas cíclicas.

Las fallas o daños por fatiga en una estructura de pavimento, llevan consigo la degradación estructural, la pérdida de resistencia y deformación acumulada que presenta la estructura de pavimento, los cuales evolucionan en su nivel de severidad a otros daños de mayor nivel que impacta de manera progresiva la estabilidad estructural del pavimento.

El pavimento de la vía en estudio (Siberia - Tenjo), está asociado a la desecación presente en la zona, lo cual implica la consideración de condiciones climáticas y de las variaciones de humedad/succión de los materiales que componen la subrasante, además de las cargas continuas y repetidas a las cuales está sometida la vía por ser una vía de flujo vehicular de carga pesada y además a la condición estructural que presenta el pavimento (Pinto, 2012).

2.2. OBJETIVOS

2.2.1. Objetivo general

Caracterizar los tipos y niveles de incidencia de las patologías existentes en la estructura de pavimento apoyada sobre suelos arcillosos desecados en el corredor vial que une el sector de Siberia con el municipio de Tenjo en Cundinamarca.

2.2.2. Objetivos específicos

- Identificar las patologías existentes en la vía, el nivel en el que se encuentran y la frecuencia con que se presentan.
- Relacionar las patologías con los aspectos ambientales, geológicos y/o de uso de la vía en la zona de estudio.
- Identificar la incidencia de las patologías en la funcionalidad de la vía y la seguridad del usuario.
- Identificar el índice de condición del pavimento mediante metodología PCI.
- Caracterizar las patologías de la estructura de pavimento de la zona de estudio asociadas a la desecación de la subrasante

2.3. DELIMITACIÓN

2.3.1. Espacio Temporal y Geográfico

El presente proyecto trata sobre la vía que conduce del municipio de Tenjo a Siberia en el occidente de la Sabana de Bogotá, sobre las patologías que presenta la estructura de pavimento flexible que se encuentra apoyada en un suelo compuesto por arcillas expansivas y un problema de desecación del misma. El cual se desarrolló durante los meses comprendidos de Mayo y Octubre del presente año.

2.3.2. Contenido

Mediante el desarrollo de este trabajo se busca establecer el nivel y la incidencia de las patologías de la estructura de pavimento flexible, la cual se encuentra apoyada en suelo de composición arcillosa con problemas de desecación, para lo cual fue necesario tener presente las investigaciones que se han desarrollado en el occidente de la Sabana de Bogotá sobre dicho tema y un trabajo de campo para la determinación de las patologías que están afectando la funcionalidad de la vía. En el documento se encontrarán desglosados cada uno de los temas y términos asociados a los aspectos geológicos y ambientales de la zona.

2.3.3. Alcance

A través de esta tesis se busca identificar las condiciones de movilidad y afectación ocurrente por patologías en el pavimento, las cuales son debidas en su mayoría a la vida útil o al servicio normal, por la influencia de los factores climáticos o por

afectaciones de problemas geológicos en una zona del occidente de la Sabana de Bogotá en la que se encuentran suelos compuestos por arcillas expansivas, y se presenta una pérdida continua de humedad en los suelos localizados sobre el nivel freático. Sobre las patologías existentes en la estructura de pavimento se espera establecer las relaciones con las características de la vía y condiciones de diseño geométrico y estructural (tales como el drenaje superficial, espesores de capas, entre otros). Teniendo en cuenta un proceso de campo para la inspección y medición de las patologías existentes, el estudio de los antecedentes e investigaciones que se han realizado en temas asociados a la presente investigación.

2.4. MARCO REFERENCIAL

2.4.1. Marco teórico

El suelo que constituye el occidente de la Sabana de Bogotá es de origen cuaternario, este se encuentra constituido por depósitos de arcillas finas, limos y algunos lentes de arena que se han depositado con el tiempo; este suelo en su superficie tiene una consistencia muy firme que presenta cambios de volumen como consecuencia de los cambios de contenido de humedad, pero aproximadamente a 7 metros de profundidad tiene una consistencia de blanda a muy blanda por debajo del nivel freático, esta profundidad puede ser variable dependiendo del lugar en el que se realicen las exploraciones de suelos, sin embargo, se encuentra de manera generalizada arcillas altamente reactivas a la acción de las variaciones del contenido de agua (Pineda y Colmenares, 2006).

Los constantes cambios de humedad son atribuidos al balance hídrico negativo de la zona en el cual es más el agua que se pierde producto de la evaporación, la evapotranspiración o la explotación de los pozos, que la cantidad de agua subterránea presente o por infiltración que anualmente se registra en la zona (Rueda y Pineda, 2011).

Los cambios constantes de humedad originan presiones de poros negativas debidas especialmente la succión matricial de los suelos por efecto de la capilaridad y la tensión superficial de las moléculas de agua contenida, en estos suelos parcialmente saturados, la capilaridad es responsable del control de presiones de poros negativas, que hacen que las partículas de suelo se junten y que se modifiquen las propiedades del mismo como lo son la resistencia al corte y la rigidez; esto conlleva la fractura interna del material y la aparición en superficie de grietas

de profundidades considerables y generación de discontinuidades de material de subrasante, que en el momento de la falla se producen hundimientos superficiales en el suelo; en las zonas en las que dicho material funciona como subrasante para carreteras, las fracturas hacen que se pierda nivel de servicio de la vía, debido que en superficie la carpeta de rodadura sufre las consecuencias de la pérdida de continuidad de la subrasante generando patologías como hundimientos, grietas de borde y media luna (Pinto, 2012)

Figura 3 Patologías generadas por cambios volumétricos del suelo



(Pineda - 2014)

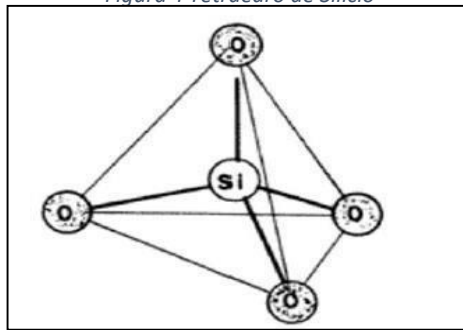
Cuando se realiza la construcción de una obra vial, se estima la vida útil de la misma, en la cual además se establecen los periodos de mantenimiento para recuperar en cierto porcentaje las condiciones iniciales de la vía, todo este proceso se prevé en la fase de diseños haciendo una adecuada planeación del tráfico esperado y se hacen los adecuados monitoreos al mismo con el fin de garantizar la durabilidad del mismo; pero en ocasiones se presentan daños superficiales antes del periodo de mantenimiento, los cuales se presentan en su mayoría por factores tales como, el clima, sobrecargas en la vía, la estratigrafía de la zona, entre otros; dichos factores influyen negativamente en la funcionalidad, comodidad y seguridad de la vía, y por ende afectan a los usuarios dado que reducen la calidad de la vía y se desmejora la calidad en la movilidad de la zona dado que se pierde nivel de servicio. (Grisales, 2013).

La evaluación de los deterioros se va a realizar por la metodología PCI, esta debido a que permite en forma más práctica y eficiente poder evaluar y determinar el grado de severidad de los diferentes tipos de fallas para implementar las acciones a ejecutar en una determinada superficie de rodadura con el fin de definir los límites de las áreas a reparar y así poder plasmar esa información en los planos de la vía, previo a la Inversión final y así garantizar la vida útil de la estructura del pavimento asfáltico y optimización de los recursos.

2.4.2. Marco conceptual

- **Arcilla:** Es un tipo de suelo fino compuesto de partículas con una estructura laminar y composición química reactiva al contacto con el agua, que poseen una distribución granulométrica muy fina y están compuestas en su mayoría por silicio, aluminio, oxígeno e hidrógeno en diferentes proporciones, así como otros minerales en menores cantidades (Domínguez y Schifter 1992).

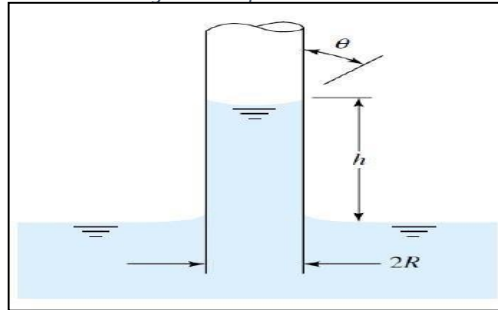
Figura 4 Tetraedro de Silicio



(Schifter y Domínguez, 1992)

- **Capilaridad:** Es un fenómeno que ocurre al interior de medios en los que los ductos de vacío están compuestos por espacios muy delgados en los que los líquidos debido a su tensión superficial, y a su vez de la cohesión o fuerza intermolecular del líquido, tienen la capacidad de ascender o descender por tales ductos delgados o tubos capilares. Esta condición se produce en contacto de la tabla de agua con la atmósfera, dado que la presión atmosférica que se produce sobre el área del agua al interior del tubo capilar es inferior a la presión que se ejerce entre las moléculas y a las paredes del ducto por la tensión interna del agua, lo que hace que esta ascienda como se muestra en la figura 4 o que en su defecto se quede suspendida al interior del suelo en la medida en la que la tabla de agua desciende (Duque y Escobar 2002).

Figura 5 Capilaridad



(White 1999)

- **Desecación:** corresponde a la pérdida continua de humedad en los suelos localizados sobre el nivel freático; es originado por diversas causas como la presencia de especies vegetales foráneas cuyas raíces inducen la pérdida de agua libre del suelo, la disminución del nivel potenciométrico del agua subterránea que ocasiona la disminución del nivel de agua libre, y la presencia de mayores tasas de evaporación que de infiltración en una zona dada; en el caso de las arcillas la pérdida de humedad aunque normalmente ocurre de manera lenta debido al tamaño de los ductos por los que se pierde humedad, la afectación es considerable dado que se conjuga con la tensión superficial del agua y produce reacomodamiento de las partículas de arcilla, lo que hace que el material en su conjunto se vea sometido a cambios volumétricos y en la mayoría de los casos a fracturas cuando la cantidad de humedad desciende hasta los límites de contracción (Jaimes, 2013).
- **Patologías del pavimento:** Son aquellas lesiones o deterioros sufridos en la infraestructura vial debidos a fallas en los materiales, agentes atmosféricos o por otros agentes externos. Las diferentes lesiones patológicas habituales se clasifican según su causa o agente causante y van desde simples descascaramientos o fallas leves en la carpeta de rodadura hasta la pérdida completa de la banca de la vía o la inestabilidad total de la estructura del pavimento. (Vesga, 2003).

Figura 6 Patologías



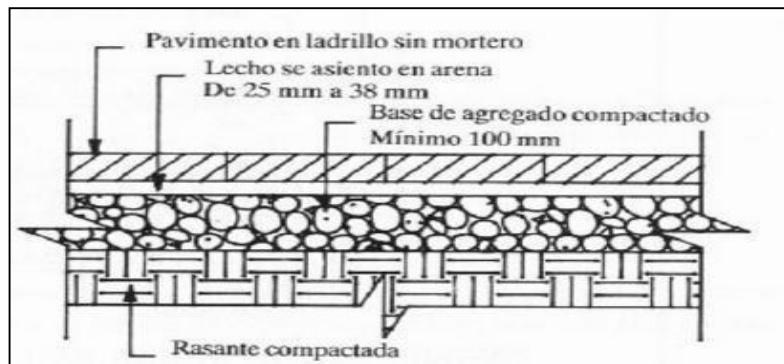
(Rueda, 2012)

- **Pavimento flexible:** Son aquellos cuya capa superior de la estructura deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él., por lo que su uso es en zonas de abundante tráfico, en este tipo de estructuras para pavimento se tiene una carpeta que simplemente se encarga de mantener la superficie de rodadura adecuada para la libre movilidad, y todas las cargas aplicadas son transmitidas a las capas granulares para ser distribuidas de manera homogénea a la subrasante y con ello disminuir al máximo los esfuerzos que a esta lleguen (Fonseca, 2002).

Las capas de un pavimento flexible suelen ser:

- La capa superficial o capa superior que es la que se encuentran en contacto con el tráfico rodado y que normalmente ha sido elaborada con capas asfálticas.
- La capa base es la capa que está debajo de la capa superficial y está, normalmente, construida a base de agregados y puede estar estabilizada o sin estabilizar.
- La capa subbase es la capa o capas que se encuentra inmediatamente debajo de la capa base. En muchas ocasiones se prescinde de esa capa subbase

Figura 7 Pavimentación flexible



(Loboguerrero, 1998)

2.5. METODOLOGÍA

2.5.1. Tipo de estudio

El presente documento hace referencia a un texto de tipo retrospectivo, debido a que en el mismo se trabajó con investigaciones realizadas por diferentes autores, los cuales realizaron acercamientos y estudios sobre el suelo y estructura en estudio; pero del mismo modo se realizó la inspección y medición de las patologías en la vía.

2.5.2. Fuentes de información

En la elaboración del documento, se realizaron consultas de las investigaciones realizadas anteriormente por diferentes autores, dentro de estas fuentes se encuentran de tipo personal como las tesis de Rueda (2012), Orduz (2017); de tipo documental en las cuales se relacionan los documentos científicos realizados o de información como Pineda- Jaimes (2015), Arias (2015), Rivera y Rojas (2013), García y Pineda (2014), entre otros; y además se utilizaron fuentes de interés público como el Manual de inspección de Pavimento Flexible (INVIAS), el libro Ingeniería de Pavimentos para Carreteras (2002), entre otros; los cuales contribuyeron en la construcción de la presente tesis.

3. ANTECEDENTES

3.1. CONCEPTOS GENERALES

El desarrollo del país está determinado, entre otros factores, por el estado y funcionalidad de las vías que, mueven el comercio de las regiones, así como la necesidad que posee una sociedad para la movilidad en desarrollo de la cotidianidad, por lo cual se hace indispensable no solo contar con vías, sino que estas sean funcionales de acuerdo a su tipo, características geométricas o volúmenes de tránsito que demandan su uso, lo que favorece a una adecuada movilidad (Grisales, 2013).

Con el fin de permitir una circulación con niveles adecuados de seguridad y comodidad, se establece según las consideraciones preliminares de diseño, una estructura de pavimento; ésta consiste en un conjunto de capas superpuestas que se diseñan y construyen técnicamente con materiales que sean apropiados y debidamente instalados, esta estructura se encuentra apoyada en la subrasante, obtenida por el movimiento de tierras con capacidad suficiente de soportar los esfuerzos de las cargas repetidas del tránsito en un periodo de vida útil o periodo de diseño de la estructura de pavimento (Fonseca, 2002).

Las cargas externas como el tráfico y el clima, generan en la estructura de pavimento esfuerzos y deformaciones internas que afectan a toda la estructura, es por ello que se debe tener un cuidado meticuloso al momento de establecer el tipo de pavimento a emplear y a su vez los materiales que lo conformaran, con el fin de obtener una estructura segura y cómoda para el usuario (Chang, 2014)

Es fundamental tener en cuenta que una estructura de pavimento debe brindar una adecuada serviciabilidad o comodidad a los usuarios, la durabilidad de la estructura y la seguridad de los vehículos al brindar una buena fricción adecuada entre los vehículos y la superficie de rodadura (Chang, 2014)

3.1.1. Clasificación de pavimentos

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los

esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el período para el cual fue diseñada la estructura del pavimento (Fonseca, 2002).

Figura 8 la Parte figura (a) corresponde al antes de la vía pavimentada y la figura (b) al después de la vía pavimentada en el municipio de Santa Ana



(a)

(b)

(Aguilar, 2015).

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe ser durable, económico, presentar condiciones adecuadas de drenaje, resistir las cargas impuestas por el tránsito y los agentes de intemperismo o meteorización, además, la textura superficial debe estar diseñada para las velocidades previstas y resistir el desgaste producido por las llantas de los vehículos, entre otros aspectos que busquen ofrecer una adecuada seguridad al usuario (Acuña, y otros, 2012)

Desde principios del siglo XX los pavimentos han experimentado una evolución tecnológica para proveer vías de transporte eficientes; existen diferentes métodos de pavimentación, que gracias al desarrollo de los materiales de construcción se han ido perfeccionando en el tiempo, esto con el fin de obtener un mejor resultado en la vida útil de este tipo de estructuras (Chang, 2014).

La utilidad que se le va a dar al pavimento, define las características que se hacen necesarias para elegir los materiales adecuados y la metodología de pavimentación propuesta para el mismo; en este sentido, la estructura propuesta de acuerdo con las demandas, debe cumplir con las especificaciones técnicas respecto a que tenga la capacidad de soportar las cargas y además los factores climatológicos durante el periodo de servicio para el cual se diseña.

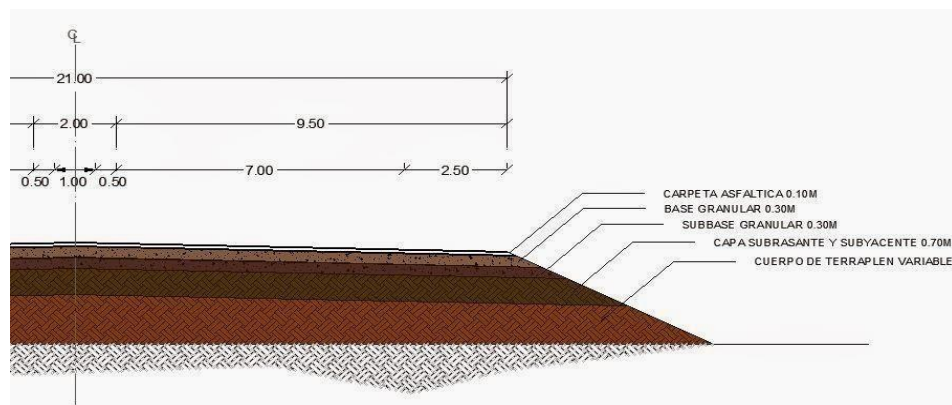
La selección de la alternativa más viable para una estructura de pavimento, es fundamental realizar un análisis estructural y funcional empleando modelos que simulen el desempeño en las condiciones de carga determinadas, los cambios de temperatura y humedad; esto con el fin de establecer los niveles de serviciabilidad y la

probabilidad de la aparición de fallas, y así verificar si satisfacen los niveles de tolerancia exigidos por norma.

□ **Pavimento flexible**

Este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase (ver Figura 9). No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra (Fonseca, 2002).

Figura 9 Capas que conforman un pavimento flexible

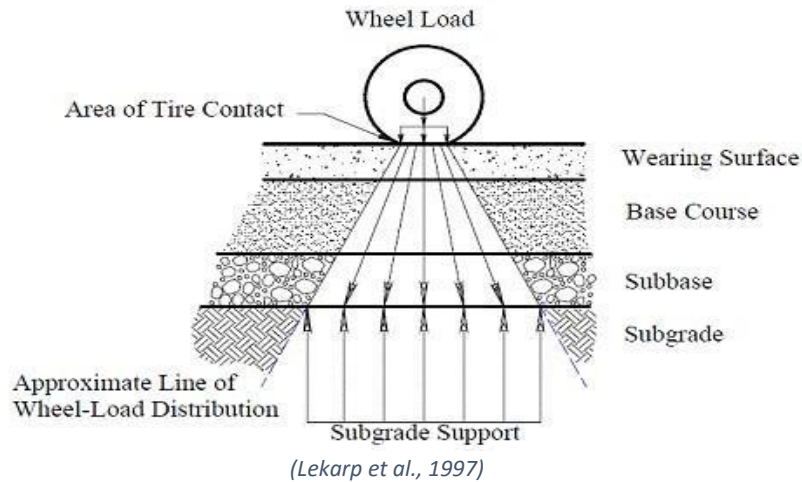


(Martínez, 2015)

La carpeta bituminosa es una carpeta asfáltica que conforma arena gravosa y alquitrán, los cuales son materiales bituminosos, es decir, sustancias de color negro, sólidas o viscosas, dúctiles, que se ablandan por el calor y comprenden aquellos cuyo origen son los crudos petrolíferos como también los obtenidos por la destilación destructiva de sustancias de origen carbonoso; la característica principal de este material es la impermeabilidad (Otero, 2012).

En la capa superior como lo es la carpeta bituminosa donde los esfuerzos son mayores, se utilizan materiales con mayor capacidad de carga y en las capas inferiores (base y subbase) donde los esfuerzos son menores, se colocan materiales de menor capacidad; lo anterior puede verse en la figura 10, dado que la carga impuesta es la misma, pero el área de contacto es mayor, lo que genera una mitigación de esfuerzos en las capas y en la subrasante. El uso de materiales con menor requerimiento permite el uso de materiales locales, dando como resultado diseños más prácticos. (Osorio, 2012)

Figura 10 Distribución de esfuerzos en pavimento flexible



- **Pavimento semi-rígido**

Aunque este tipo de pavimentos guarda básicamente la misma estructura de un pavimento flexible, una de sus capas se encuentra rigidizada artificialmente con un aditivo que puede ser: asfalto, emulsión, cemento, cal y químicos. El empleo de estos aditivos tiene la finalidad básica de corregir o modificar las propiedades mecánicas de los materiales locales que no son aptos para la construcción de las capas del pavimento, teniendo en cuenta que los adecuados se encuentran a distancias tales que encarecerían notablemente los costos de construcción (Fonseca, 2002).

En pavimentos semirrígidos, a diferencia de pavimentos flexibles convencionales, la resistencia al agrietamiento de la carpeta de rodadura no es una respuesta crítica ya que la base cementada provee esta capacidad estructural. Por tanto, para proveer la resistencia a la abrasión de tráfico, la seguridad por fricción y la regularidad de la superficie para el contacto pavimento-vehículo la superficie de rodadura consta de una o más capas de hormigón asfáltico con las propiedades adecuadas de resistencia a la abrasión, ahuellamiento, pulido y construido (EPSALABCO, 2013).

- **Pavimento rígido**

Los pavimentos rígidos son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina subbase del pavimento rígido, una muestra de esto se presenta en la Figura 11 (Fonseca, 2002).

Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico, así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además, como el concreto es capaz de resistir, en cierto grado, esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento; y su resistencia mecánica está determinada por el diseño y la estabilidad que tenga en la operación (Barrera, 2007)

Figura 11 Capas de una estructura de pavimento rígido



(CANACEM, 2014)

Los bajos niveles de esfuerzo bajo el pavimento, hacen innecesario el contar con materiales de cimentación resistentes, inclusive hace posible la colocación de la losa directamente sobre la subrasante cuando la calidad de tipo de suelo lo permite. Los trabajos de rehabilitación de pavimentos según su finalidad se clasificarán en estructurales y superficiales. Las primeras tendrán por objeto aumentar significativamente la capacidad estructural del pavimento existente, adecuándola a las acciones del tráfico previsto durante su período de servicio. El objeto de las segundas será conservar o mejorar sus características funcionales (seguridad, comodidad, etc) y la protección del pavimento en su conjunto (aumento de la durabilidad, impermeabilidad, uniformidad, aspecto, etc) (Acuña, 2012)

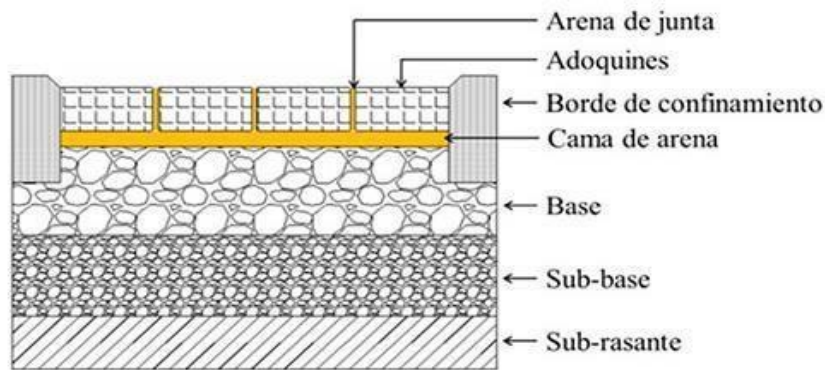
Uno de los problemas que causa mayores daños y disminuye enormemente la serviciabilidad de un pavimento de concreto, es la pérdida de apoyo de las losas debido a vacíos bajo ellas. Estos vacíos son producto principalmente del bombeo de finos a través de las juntas o berma abierta, de la consolidación de la base causada por el tránsito repetido de camiones pesados, por una falla de la subrasante a causa de las sobrecargas cerca de las juntas o bien debido a la pérdida de la capacidad de resistencia a las cargas producto de la saturación de la subrasante. Las cargas de

tránsito pesado inducen las mayores deflexiones de las losas cerca de las juntas transversales y grietas de trabajo. Sin apoyo por debajo de la losa, las tensiones en el concreto se incrementan y pueden ocasionar escalonamiento, rotura de esquinas y extenso agrietamiento (Olivares, 2005).

□ **Pavimento articulado**

Los pavimentos de adoquines de hormigón (PAH) se utilizan como una solución alternativa a los pavimentos tradicionales para calzadas vehiculares de baja velocidad. Los pavimentos de adoquines se componen de distintas capas al igual que los pavimentos rígidos y flexibles. La principal diferencia con estos últimos radica en la composición de la carpeta de rodadura, que está conformada por adoquines inter-trabados, que brindan al pavimento un comportamiento estructural semi-flexible. De este modo, los pavimentos de adoquines están constituidos por una capa de adoquines, arena de juntas, una cama de arena, base y sub-base, como se evidencia en la figura 12. Poseen también un borde de confinamiento que contribuye al desarrollo del mecanismo de trabazón mecánica (Bahamondes, y otros, 2013)

Figura 12 Elementos estructurales de un pavimento en adoquines



(ASCE, 2010)

Los adoquines, arena de juntas y cama de arena generan un mecanismo de trabazón mecánica entre los adoquines mediante el cual son capaces de disipar tensiones, transmitiendo carga entre adoquines adyacentes. Shackel & Lim (2003) describen el mecanismo de trabazón mecánica como el resultado del efecto combinado de cuña y rotación que se produce entre adoquines al ser cargados. En el efecto de cuña el adoquín cargado empuja longitudinalmente los adoquines vecinos (Lim, y otros, 2003)

3.1.2. Arcillas y minerales arcillosos

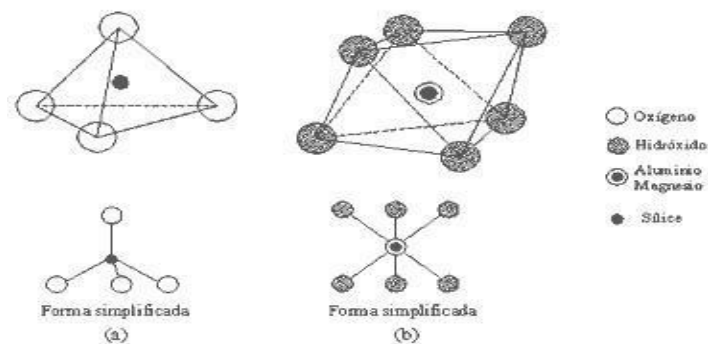
Las arcillas se derivan de la descomposición química de los silicatos constituyentes de las rocas, éstas constituyen los suelos denominados como finos, los cuales poseen partículas de tamaños menores a 75 micrómetros, por ser productos finales de la meteorización de los silicatos. Los minerales arcillosos se caracterizan porque el tamaño de las partículas es inferior a 0.002 mm, la morfología típica son los filosilicatos o morfología laminar (Mitchael y Doga, 2005).

En muchas de las obras de ingeniería se tiene la presencia de estos suelos, los cuales poseen variaciones de humedad que originan contracciones y expansiones por la mineralogía, las cuales están constituidas por la combinación de tetraedros de silicio, octaedros de magnesio y octaedros de aluminio, dando lugar a las capas de sílice; las combinaciones de los tetraedros de silicio forman gibbsita y la de los octaedros de magnesio la brucita.

En los minerales arcillosos, algunos de los espacios de los tetraedros y octaedros son ocupados por cationes distintos a los de la estructura ideal. La caolinita presenta la menor susceptibilidad al fenómeno de sustitución isomorfa de las familias de minerales arcillosos comunes en ingeniería (Mitchell y Soga, 2005).

En la figura 12 se presentan las unidades estructurales básicas presentes en los minerales arcillosos anteriormente mencionados (Lambe y Withman, 2002).

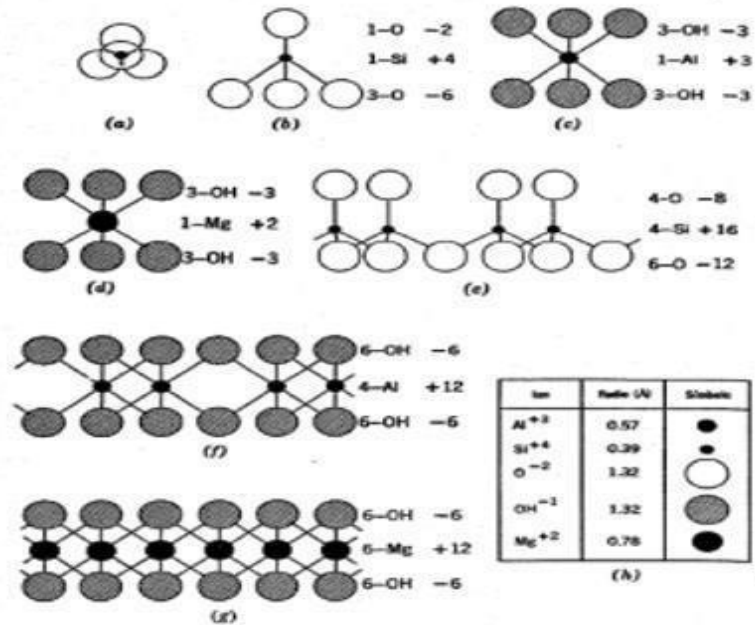
Figura 13 Estructuras atómicas básicas de los minerales de arcilla (a) Unidad tetraédrica y (b) octaédrica



(Whitlow, 1994)

Figura 14 (a) y (b) Tetraedro de silicio, (c) Octaedro de aluminio, (d) Octaedro de magnesio, (e) Sílice, (f) Gibbsita y (g)

Brucita

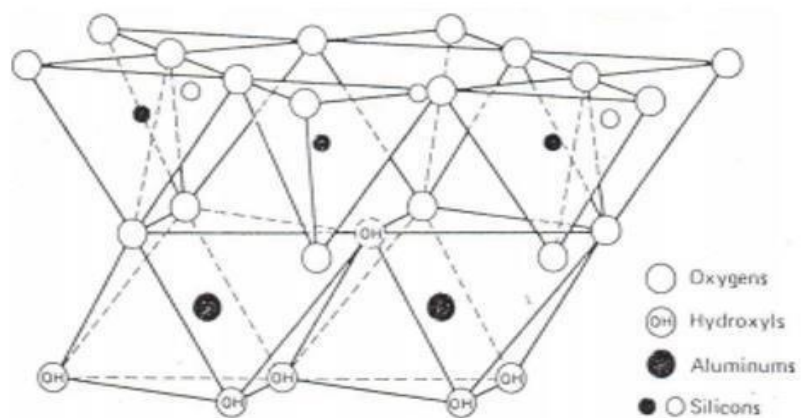


(Lambe y Withman, 2002)

Por la figura 14 se observa que el tetraedro y los dos octaedros no son neutros eléctricamente y por lo tanto no pueden estar aislados en la naturaleza, por lo cual existen diferentes minerales arcillosos, entre ellos la caolinita, montmorillonita e illita.

- **La caolinita:** Consiste en láminas repetidas de una lámina tetraédrica y una lámina octaédrica de aluminio, es decir de una sílica y una gibbsita. Es uno de los minerales más estables ante cambios de humedad debido a que el enlace de hidrogeno presenta valencias elevadas, impidiendo la hidratación en la figura 15 se presenta la estructura atómica de la caolinita (Holtz, 2010).

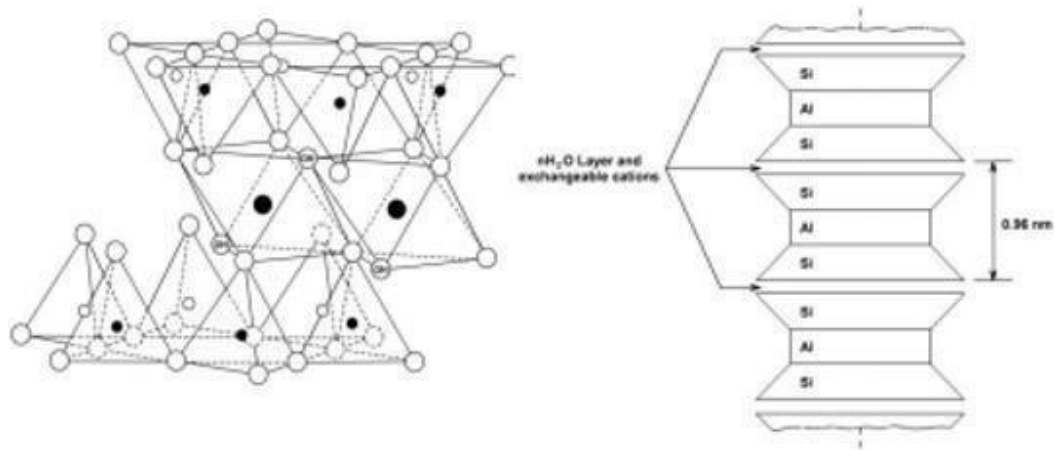
Figura 15 Estructura Atómica de la caolinita



(Mitchell y Soga, 2005)

- **Montmorillonita:** Está compuesto de dos capas de sílice y una capa de alúmina (gibbsita); debido a que la lámina octaédrica se encuentra entre dos hojas de sílice con las puntas de los tetraedros combinados con los hidroxilos de la capa octaédrica este mineral es muy susceptible a la generación de cambios volumétricos por variaciones de humedad. La figura 16 muestra la estructura atómica típica de la montmorillonita (Holtz, 2010).

Figura 16 Estructura atómica de la Montmorillonita



(Mitchell y Soga, 2005)

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), es la propiedad de que los cationes del espacio interlaminaar se puedan intercambiar fácilmente cuando se pone en contacto la arcilla con una solución saturada en otros cationes; el valor de esta capacidad es un indicativo acerca de la afinidad que tienen los minerales arcillosos con el agua; dependiendo de los valores de esta variable se pueden determinar los potenciales de expansión, siendo estos directamente proporcionales (Juarez, et al, 2005)

La capacidad de la caolinita tiene un valor de 3 a 5 meq/100g, mientras que el de la montmorillonita esta entre 80 a 100 meq/100g (Lambe y Withman, 2002); estos valores aumentan con el grado de acidez de los cristales, es decir, es mayor si el pH del suelo es menor (Juarez, et al, 2005).

3.1.3. Deseccación de arcillas

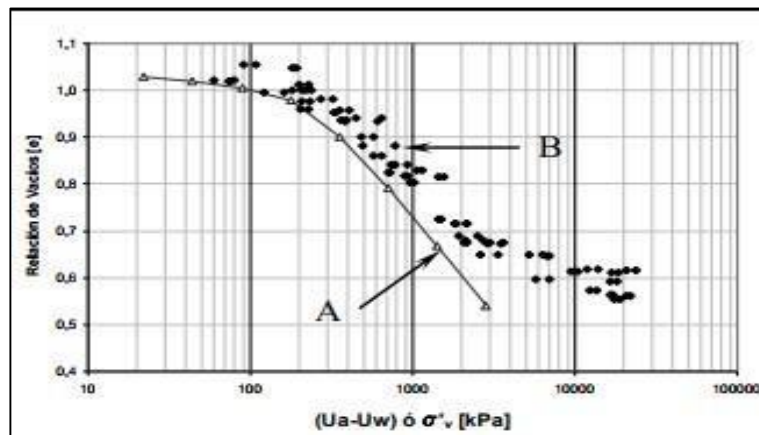
Los procesos de desecación se definen como la perdida continua de agua (humedad) del subsuelo que originan que estos el material arcilloso se fracture, es decir, que pierda continuidad por los procesos de contracción ocurridos al interior del mismo por acción de la succión matricial interna. Esta pérdida de humedad de

los suelos se atribuye a factores como la explotación continua de agua subterránea que ocasiona el abatimiento del nivel freático, los balances hídricos que se presentan en la zona, y además la demanda hídrica que generan las especies y árboles no nativos que se tienen (Pinto, 2012).

A lo largo del tiempo se han realizado muchos estudios que giran en torno a la desecación en los suelos, desde el estudio del fenómeno de los suelos finos como es el caso de la contracción volumétrica que presentan en este sentido, las vías de la zona ven impactada la vida útil y el nivel de servicio de una estructura de pavimento emplazada sobre una subrasante arcillosa; en este sentido se le atribuyen factores como la evapotranspiración, los agentes atmosféricos y la vegetación a que dichos fenómenos agudicen el problema descrito (Rueda Pinto, y otros, 2011).

De acuerdo con la evidencia experimental hallada en la investigación de Pineda y Colmenares, la mayor parte del cambio volumétrico de los materiales arcillosos naturales y reconstituidos en secado se presenta mientras estos aún permanecen saturados. La siguiente figura representa la comparación del comportamiento volumétrico en secado de una de las arcillas reconstituidas con el comportamiento volumétrico observado en procesos de compresión unidimensional, ya que, para fines prácticos, los dos procesos al parecer son similares entre sí.

Figura 17 Comparación entre el comportamiento volumétrico en secado (A) y compresión unidimensional (B) de la arcilla de Bogotá reconstituida a 350 kPa



(Pineda y Colmenares, 2000)

Teniendo en cuenta la gráfica, se puede identificar que la pendiente de las curvas que definen la disminución de la relación de vacíos tanto para el proceso de secado como para el caso de la compresión unidimensional, es muy similar, por lo cual el valor del Índice de Compresión obtenido para un material arcilloso cualquiera,

puede entenderse como el valor que relaciona, de forma aproximada, las disminuciones de la relación de vacíos de dicho material con aumentos en la succión matricial en procesos de secado, mientras éste se encuentre aún saturado (Pineda Jaimes, y otros, 2000)

Las lodolitas son rocas sedimentarias constituidas por granos del tamaño de lodo, formado por mezcla de arcilla y limo, al litificarse no presenta fisilidad, es decir, que no tienden a generarse grietas por su configuración física y mineralógica (Miranda, 2012).

Figura 18 Cuarzo Lodolita



(Petrology, 2015)

Las lodolitas constituyen parte de las rocas sedimentadas en el país, por lo cual es muy utilizado en las obras civiles como agregados, teniendo en cuenta que su tamaño es de aproximadamente de 0,0625 milímetros, las cuales en formación de placas constituyen macizos de roca blanda como la pizarra (Sotelo Penagos, y otros, 2017); las que contienen limos se les conoce como limonitas; mientras que las que contienen arcillas son llamadas argilitas; por otro lado, las lutitas, son la roca formada esencialmente por arcilla, que poseen fisilidad y/o laminación muy fina.

- Lutitas

Las lutitas son rocas sedimentarias que están compuestas por partículas de tamaños menores a 1/256 mm, las cuales indican, que se produjo un depósito como consecuencia de la sedimentación gradual de corrientes poco turbulentas, que mantienen suspendidas las partículas del tamaño de la arcilla hasta que estas se reúnen para formar agregados mayores.

Conforme se acumula el limo y la arcilla, tienden a formarse capas delgadas a las que se les denominan laminas; durante esta fase las partículas adoptan una alineación paralela reordenando los granos y reduciendo el tamaño de los espacios de los poros lo que no permite la circulación fácil de las soluciones cementantes.

Por consiguiente, las lutitas suelen describirse como débiles, porque están poco cementadas (Vásquez, y otros, 2013).

Figura 19 Hidrocarburos de Lutitta



(Martínez, 2014)

Es muy normal que las lutitas presenten una cierta cantidad de carbonato cálcico (menor del 50%) con lo que el carácter aglomerante de éste le dá una mayor estabilidad frente al agua. Si el contenido es significativo (generalmente superior al 20%) da clara reacción con clorhídrico en frío. Si el contenido en caliza es bajo, la reacción no es aparente (Schlumberger, 2017)

- Argilitas

La argilita es una roca sedimentaria, sus granos son tan pequeños, que ni siquiera son visibles con lupa, se forma por diagénesis de las arcillas; las argilitas son rocas que contienen arcilla, limo, barro o una mezcla de estas sustancias endurecidas (Mejía, 2012).

Figura 20 Argilita



(Pardo, 2010)

Suelos con presencia de argilita presentan frecuentemente rasgos de hidromorfía (estado permanente o temporal de saturación de agua en el suelo con condiciones reductoras). En un estudio en España se observó que en suelos con argilita la reserva de agua útil de estos suelos es elevada, cifrándose entre 150 y 260 mm;

debido a la abundante pluviosidad durante la mayor parte del año se producen condiciones de humedad, sin que en ningún momento el suelo llegue a secarse en su totalidad. (Merino, y otros, 1991)

Las principales características físico-químicas son su textura arcillosa a limosa, elevada densidad aparente, contenido moderado de materia orgánica, escasa CICE marcado carácter ácido, déficit importante de nutrientes y elevada saturación en Al. La fracción arcilla está compuesta mayoritariamente por mica, existiendo frecuentemente caolinita; se encuentran también oxihidróxidos de Fe (goethita y lepidocrocita) y, en escasa cantidad, cuarzo y feldespato; lo que se traduce en recristalización y crecimiento de los granos, así exhiben vivos glaciares, ondulaciones de marea y fisuras de lodo (ALEGSA, 2015).

□ **Factores que favorecen la desecación**

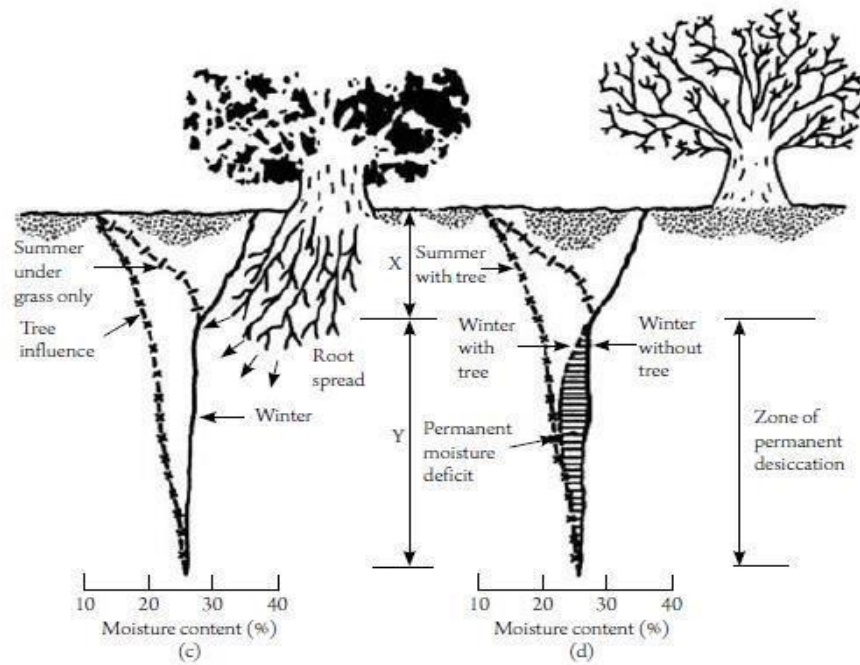
Los cambios volumétricos que se dan en terrenos que están compuestos de arcillas, pueden estar dados por diversos factores, entre ellos, el cambio en la presión de poros que se produce por acción de la vegetación, la evapotranspiración y el ascenso capilar por encima de la línea piezométrica (Rodríguez, 2011). En la zona de estudio se encontraron las condiciones anteriores por lo cual se realizará a continuación una descripción de los mismos.

a. Vegetación

La vegetación que se evidencia en el occidente de la sabana de Bogotá, cumple un papel fundamental en el comportamiento que tiene el subsuelo y que repercute en las estructuras construidas en la zona, esto debido al crecimiento de las raíces de estas especies que en su mayoría son no nativas y la evapotranspiración (IDU, 2005).

Algunos autores como Vesga, Caicedo y Mesa (2002), han establecido por investigaciones que las especies foráneas, no endémicas que se presentan en la región han contribuido a acentuar el deterioro de la estructura de pavimento, debido a que tienen un mayor consumo de agua necesario para su supervivencia, lo cual se hace notorio con las grietas en la estructura.

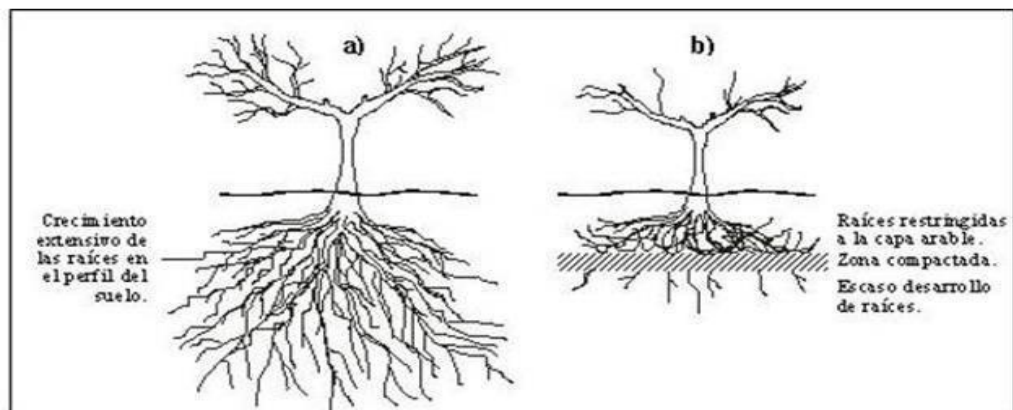
Figura 21 Influencia de las raíces de los árboles en el equilibrio de humedad de un suelo arcilloso.



(Roberts, Jackson y Smith; 2006)

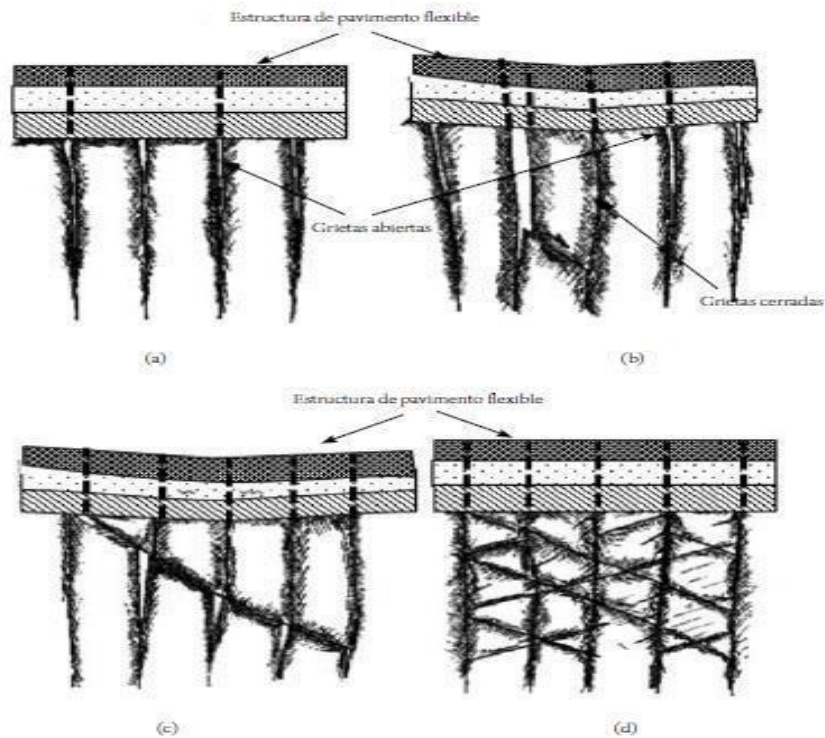
En la figura 21, se observa que las raíces imponen un estado de desecación por la succión de presión de poros que se está presentando en el subsuelo arcilloso; de la misma manera es necesario conocer las condiciones de equilibrio de contenido de agua que pueden ser consecuencia de las fallas; también es importante establecer los posibles mecanismos de falla de la superficie del terreno (Figura 23) que están asociados a la acción de sistemas radiculares (Figura 22).

Figura 22 Sistema Radicular



(FUNDESYRAM, 2012)

Figura 23 Mecanismos probables de falla de la subrasante arcillosa de la vía Siberia - Tenjo: a) condición inicial de fracturamiento de la subrasante y pérdida de continuidad, b) falla de una columna de suelo y deformación de la estructura de pavimento, c) falla por corte de columnas intensamente fracturadas u ruptura del pavimento,



(Vesga, Caicedo y Mesa; 2002)

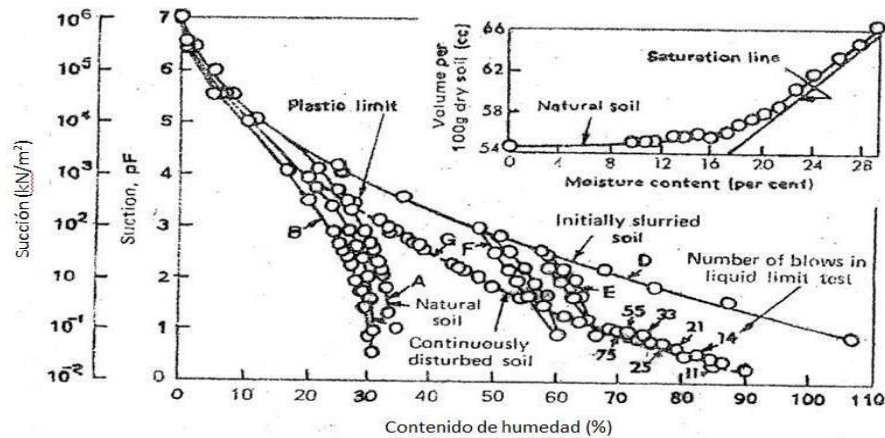
Según los estudios realizados por autores como Gómez y Pérez 2012; Roberts, Jackson y Smith, 2006; los mecanismos de falla mostrados en la figura 13 presentan características que involucran el desarrollo de grietas de tensión por la succión matricial de suelos finos en los que ha descendido el nivel de agua; además en sus estudios tienen como característica general de estas fallas a las deformaciones (hundimientos), las cuales se localizan en inmediaciones de árboles y arbustos, la pérdida de continuidad del subsuelo por las grietas que son semiverticales, y la susceptibilidad de falla de las columnas de material arcilloso por su propio peso ya sea por corte, pandeo, esbeltez, entre otras.

Por otro lado, los autores Vesga, Caicedo y Mesa (2002), han relacionado las diferentes secciones transversales y las profundidades de la formación de las columnas de suelo, las cuales hacen alusión a un panal de abejas, esto debido a que en planta son de forma casi como de celdas.

Teniendo en cuenta las curvas de retención de agua (Figura 24), adaptadas por Pineda y Colmenares (2006), es probable conocer los resultados experimentales del comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos de la Ciudad Universitaria por la succión matricial; además partiendo de estas curvas los autores Cabana y García (2014) elaboraron dichas curvas para las vías del Occidente de la Sabana de Bogotá, en las cuales se evidenció que los suelos arcillosos de la zona

permanecen saturados con succiones entre los 150 y 600 KPa, es decir, entre este intervalo de succiones se podría producir el crecimiento de las raíces.

Figura 24 Relaciones entre la succión, el contenido de humedad y la contracción para la arcilla de Londres,



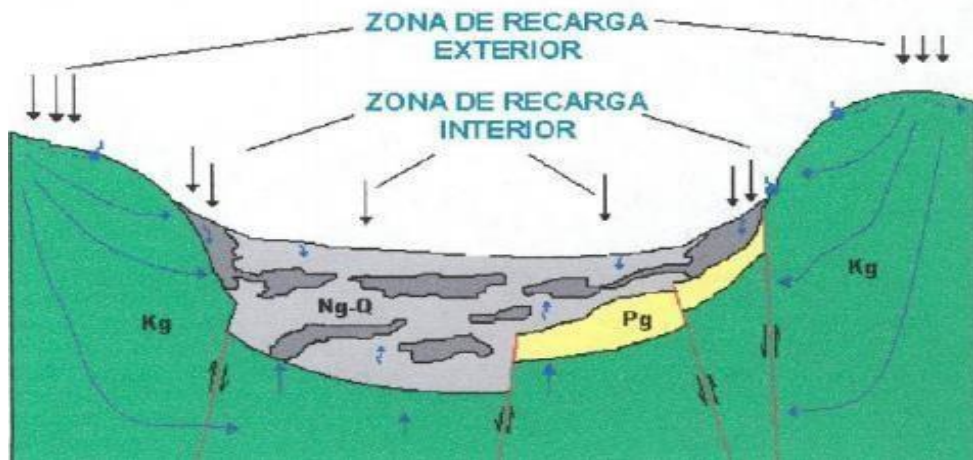
Fuente: Beltrán (1979), adaptado de Black et al (1958).

La succión matricial generada en un principio en las capas orgánicas superficiales por las raíces de las especies vegetales producen las primeras grietas, las raíces que se alojan en los espacios que quedan vacíos, hacen que se tenga una succión incrementada, lo que genera contracciones volumétricas y por ende agrietamientos mayores en el suelo arcilloso, esto se conduce gradualmente que las fisuras se extiendan al límite del nivel freático, En materiales arcillosos más superficiales la succión puede llegar a niveles altos por encima del intervalo de succión y aún más en verano lo cual agrava la situación de la estructura de pavimento (Pineda Jaimes, y otros, 2015).

b. Agua Subterránea

El agua subterránea es parte de la precipitación que se filtra a través del suelo hasta llegar al material rocoso que está saturado de agua. El agua subterránea se mueve lentamente hacia los niveles bajos, generalmente en ángulos inclinados y eventualmente llegan a los arroyos, los lagos y los océanos (Perlman, 2017) Los depósitos de los cuales se extrae agua subterránea en la Sabana de Bogotá son permeables de la Formación Sabana que se encuentran alojados en medio de arcillas lacustres. El relleno fluvio-lacustre de la cuenca formada por Tilatá y Sabana está compuesta por gravas, arenas, limos, arcillas y turbas, las cuales son en su mayoría semiconsolidadas o de moderada permeabilidad con buena a regular calidad de agua (Loboguerrero, 1992).

Figura 25 Mapa hidrogeológico de la sabana de Bogotá



(INGEOMINAS, 2000)

Tabla 1 Leyenda del Mapa hidrológico de la Sabana de Bogotá

	Unidades Hidrogeológicas	Características de las Unidades Hidrogeológicas
NgQ	Complejo Acuífero de los Depósitos no consolidados Neógeno-Cuaternario	Acuíferos discontinuos de extensión regional y local conformados por sedimentos no consolidados, principalmente de origen lacustre y fluvial.
Kg	Complejo Acuífero Guadalupe	Acuíferos continuos de extensión regional conformados por rocas sedimentarias consolidadas de ambiente marino con porosidad primaria y secundario
Pg	Complejo Acuitardo del Paleógeno	Complejo regional de rocas consolidadas con composición predominantemente arcillosa de origen continental, en general, con muy baja productividad

(INGEOMINAS, 2000)

Las líneas verticales de la figura 25 corresponden a los pozos perforados los cuales alcanzan los acuíferos discontinuos confinados de la unidad hidrogeológica Neógeno-cuaternario, y se identifica el acuífero Guadalupe que es el más importante en la Sabana de Bogotá teniendo como punto de referencia el abastecimiento, el cual es continuo de extensión regional conformado por rocas sedimentarias consolidadas (INGEOMINAS, 2000); este complejo está ubicado aproximadamente a 1500 metros de profundidad, según estudios del Instituto Colombiano de Minería y Geología (1992).

Investigadores como Robles y Sáenz (1990), reportaron que en suelos como los de la Sabana de Bogotá, la desecación que se genera en los acuíferos por el descenso en el nivel de presión trae consigo la consolidación de los suelos superficiales, la subsidencia (movimiento hacia abajo del terreno) y los agrietamientos, lo cual afecta peligrosamente las carreteras, edificaciones y cualquier construcción rígida que se encuentre sobre este terreno.

c. Evapotranspiración

La evapotranspiración es debida principalmente a la presencia de la vegetación, en un estudio es importante para saber la cuantificación de los recursos hídricos de una zona, y así conocer el volumen de agua disponible teniendo en cuenta lo que llueve y lo que se evapotranspiración (Sanchez, 2010).

En el Occidente de la Sabana de Bogotá la evapotranspiración corresponde a un rango de 901 a 1000 mm, y la precipitación se encuentra en un rango bajo con un rango de 400 a 800 mm, lo cual evidencia que el rango de la evapotranspiración supera la precipitación (INGEOMINAS, 2010); debido a esto Vesga (2000) y Beltrán (1994), han concluido que las arcillas de la formación Sabana han sido sometidas a procesos de desecación por acción de la evapotranspiración.

A medida que el nivel freático desciende, la vegetación tiene más lejos el agua por lo que debe succionar agua de los poros que se encuentran por encima del mismo, esto ocurre por la acción natural de las plantas como una de sus actividades vitales. A medida que el volumen de la arcilla disminuye se aumenta la probabilidad de propagación de grietas (Vesga, 2000).

□ Tipos de fallas asociadas a la desecación

La pérdida continua de humedad de suelos arcillosos de alta compresibilidad originada por diferentes factores, es la causa de varias patologías graves presentes en los pavimentos que se encuentran en la Sabana de Bogotá (Rueda Pinto, y otros, 2011).

Es por ello que autores como Rueda y Pineda, han realizado estudios con respecto a los daños asociados a la desecación en estructuras de pavimento, la identificación de los mecanismos de falla y el levantamiento patológico objetivo de estos mecanismos de falla; estos estudios con el fin de establecer a corto o mediano plazo algunos mecanismos para la prevención, rehabilitación y diseño de vías, en dichos

estudios obtuvieron un panorama general de las patologías más frecuentes asociadas a la desecación de los pavimentos del Occidente de la Sabana de Bogotá, así como las principales características y causas de las mismas; estas patologías son (Rueda Pinto, y otros, 2011):

a. Depresiones

Son patologías que se presentan en áreas localizadas de la estructura de pavimento con niveles más bajos que el pavimento a su alrededor; las cuales son formadas por el asentamiento de la subrasante o por construcción incorrecta (Miranda, 2012).

Figura 26 Zona de depresión con fisuración de media luna en el Occidente de la Sabana de Bogotá



(Rueda y Pineda, 2011)

b. Hundimientos

Son asentamientos de la fundación o capas inferiores, las cuales tienen deficiencias durante la construcción o por la falta de un drenaje superficial o continuo mantenimiento de los mismos, el nivel de deterioro se da en m^2 , en la cual el nivel de severidad alto lo constituye un hundimiento con una medida de más de 4 cm. Los hundimientos corresponden a desplazamientos hacia abajo, pequeños y abruptos, de la superficie de pavimento, que ocurren en grandes áreas del pavimento, causando grandes o largas depresiones que son llamadas normalmente ondulaciones (LanammeUCR, 2012).

Figura 27 Hundimiento en pavimento flexible



(Villalobos, 2002)

c. Grietas de borde

Son grietas con tendencia longitudinal a semicircular y generalmente se encuentran en distancias del orden de 0.3 y 0.6 m del borde exterior del pavimentos; éstas pueden originarse por debilitamiento de la estructura debido a las condiciones climáticas, las condiciones de la base o de la subrasante próximas al borde del pavimento; la unidad de medida es en metros lineales, y se tienen niveles de severidad altos cuando son excesivas quebraduras del pavimento y además hay pérdida de material mayor al 10% de la longitud del tramo que se esté analizando (LanammeUCR, 2012).

Figura 28 Fisura de borde



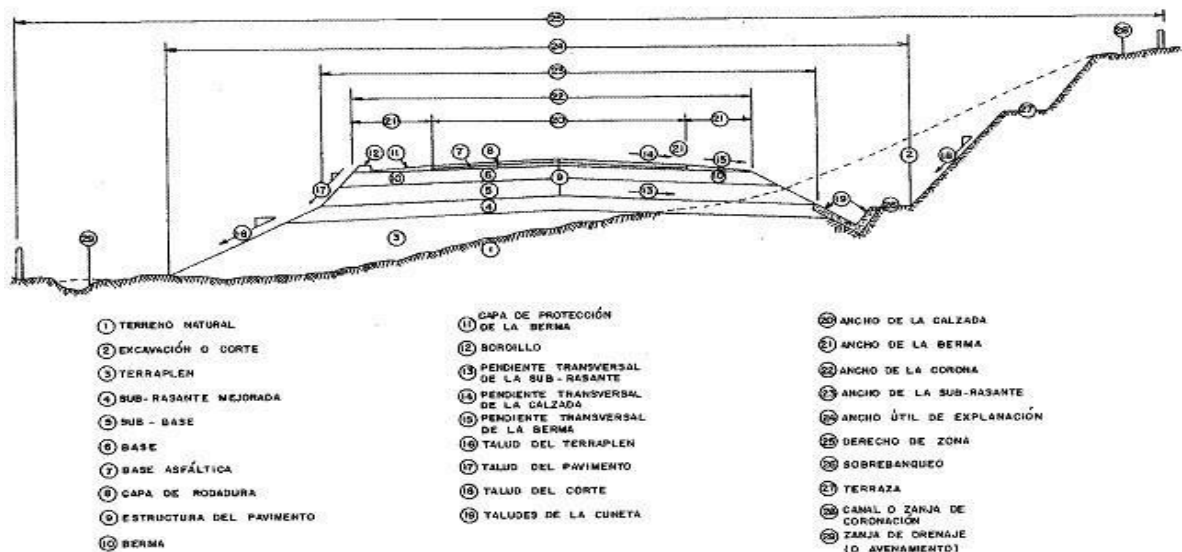
(GEOTEXAN, 2015)

3.2. PAVIMENTO FLEXIBLE

Un pavimento debe ser diseñado de tal manera que las cargas impuestas por el tránsito no generen deformaciones permanentes excesivas. En el caso de los

pavimentos flexibles estas deformaciones se producen en cada una de las capas. Los métodos de diseño de pavimentos suponen que las deformaciones permanentes ocurren solamente en la subrasante. Sin embargo, en vías donde se construyen capas asfálticas delgadas o de baja rigidez (p.e. vías de bajo tráfico) las capas granulares soportan el esfuerzo aplicado casi en su totalidad y la magnitud de dichos esfuerzos puede llegar a generar valores altos de deformación permanente. Por lo tanto, las metodologías de diseño deben tener en cuenta las deformaciones que se producen en estas capas, y los modelos para prever dichas deformaciones; se debe estar capacitado para reproducir el comportamiento de estos materiales bajo diversas trayectorias de carga cíclica y condiciones del medio ambiente (Rondón Quintana, y otros, 2007)

Figura 29 Sección típica de un pavimento



(Montejo, 2002)

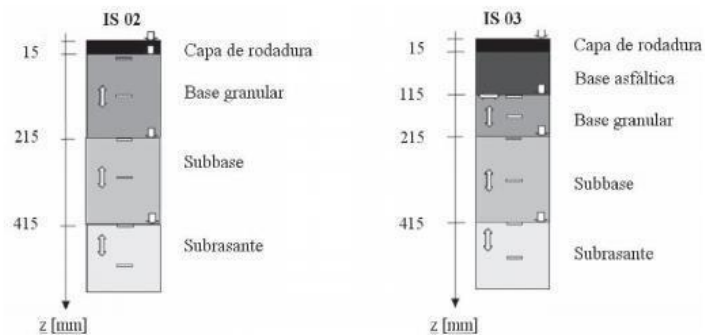
Son aquellos cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él, sus capas se colocan en orden descendente en capacidad de carga, donde la superior es la que mayor capacidad de soportar cargas tiene de todas las que se disponen. Por lo tanto, la capa que menos carga puede soportar es la que se encuentra en la sub-base y en caso de prescindir de ella la base. La durabilidad de un pavimento flexible no debe ser inferior a 8 años y normalmente suele tener una vida útil de 20 años (Gonzales, 2013).

Las capas de un pavimento flexible suelen ser: capa superficial o capa superior que es la que se encuentran en contacto con el tráfico rodado y que normalmente ha sido elaborada con varias capas asfálticas. La capa base es la capa que está debajo de la capa superficial y está, normalmente, construida a base de material granular

y puede estar estabilizada o sin estabilizar. La capa sub – base es la capa o capas que se encuentra inmediatamente debajo de la capa base. En muchas ocasiones se prescinde de esa capa sub – base (Varlan, 2017).

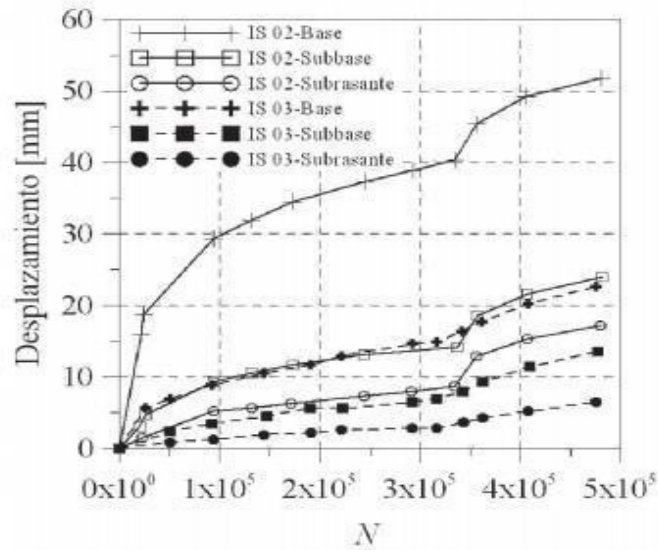
En el año 2000, dos estructuras de pavimento flexible típicas de Islandia (denominadas IS 02 e IS 03 como se presentan en la Figura 30) fueron ensayadas en un “Simulador de Vehículo Pesado” (HVS por sus siglas en inglés). Las dos estructuras fueron diseñadas acordando al método empírico noruego. El material de base y subbase consistió de quarry Holabrú (material granular de Islandia) y la subrasante fue una arena estándar de Finlandia. En la Figura 31 se presentan los espesores de capa que fueron tenidos en cuenta para el estudio y se observa que la capa que experimentó mayor deformación fue la base (Rondón Quintana, y otros, 2007)

Figura 30 Estructuras de pavimento ensayadas en un HVS



(Rondón y Reyes, 2007)

Figura 31 Desarrollo de deformación permanente en experimentos del Transport Research



(Rondón y Reyes, 2007)

3.2.1. Funciones de las capas de un pavimento flexible

La estructura de un pavimento está formada por una superestructura encima de una fundación, esto implica que se tiene material externo superpuesto en capas sobre el material original de base de la misma, esta última debe ser correspondiente a las necesidades o mejorada con forme a estas que resulta de un estudio geotécnico adecuado (Tenorio, 2000).

La capa de suelo reforzado, puede estar presente en una estructura de pavimento, para poder reducir el espesor de la capa sub-base.

El suelo compactado o subrasante mejorada, es el mismo suelo del terraplén, que esta escarificado y compactado una cierta profundidad dependiendo de su naturaleza o de las especificaciones del proyecto.

Subbase granular

Está constituida por un material de capacidad de soporte superior a la del suelo compactado y se utiliza para transmitir las fuerzas de la capa base a la capa de subrasante que soporta toda la estructura; está compuesta de un material granular de grandes tamaños y con una gradación no uniforme que permite mejorar la capacidad de soporte de toda la estructura; tiene varias funciones que se describen a continuación (Fonseca, 2002):

- **Función económica:** Una de las principales funciones de esta capa es netamente económica; en efecto, el espesor total que se requiere para que

el nivel de esfuerzos en la subrasante sea igual o menor que su propia resistencia, puede ser construido con materiales de alta calidad; sin embargo, es preferible distribuir las capas más calificadas en la parte superior y colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad la cual es frecuentemente la más barata (Fonseca, 2002).

- **Capa de transición:** La sub base bien diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y por otra parte, actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen menoscabando su calidad (Fonseca, 2002).
- **Disminución de las deformaciones:** Algunos cambios volumétricos de la capa subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones), o a cambios extremos de temperatura (heladas), pueden absorberse con la capa subbase, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento (Fonseca, 2002).
- **Resistencia:** La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitidos a un nivel adecuado a la subrasante (Fonseca, 2002).
- **Drenaje:** En muchos casos la subbase debe drenar el agua, que se introduzca a través de la carpeta o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar (Fonseca, 2002).

Tabla 2 Materiales de subbase

Características	Zonas en que se clasifica el material de acuerdo con su granulometría
Límite líquido máximo	25%
Límite plástico máximo	6%
Compactación mínima	100%
Valor relativo de soporte estándar saturado (%)	50 mínimo
Equivalente de arena (%)	30 mínimo

(SCT, 2006)

Base granular

Es la capa que se encuentra bajo la capa de rodadura de un pavimento asfáltico y por encima de la Sub Base granular. Debido a su proximidad con la superficie,

posee alta resistencia a la deformación, para soportar las altas presiones que recibe; se definen tres clases de base granular en función de la calidad de los agregados (clases A, B y C), las cuales se usarán en función del nivel del tránsito (INVIAS, 2006):

- **Resistencia:** La función fundamental de la base granular de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase ya la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada (Fonseca, 2002).
- **Función económica:** Respecto a la carpeta asfáltica, la base tiene una función económica análoga a la que tiene la subbase respecto a la base (Fonseca, 2002).
- **Deformaciones:** Reducir las deformaciones de tracción que las cargas por eje ejercen a la capa de revestimiento asfáltico.
- **Drenaje:** Debe permitir el drenaje del agua que se infiltra en el pavimento, a través de drenajes laterales longitudinales.

Tabla 3 Materiales de base

Características	Zonas en que se clasifica el material de acuerdo con su granulometría
Límite líquido, en porcentaje (máximo)	25%
Índice plástico máximo	6%
Partículas alargadas y lajeadas	35%
Compactación máxima	100%
Valor relativo de soporte estándar saturado (%)	100 mínimo
Equivalente de arena (%)	50 mínimo
Índice de durabilidad (%)	40 mínimo

(SCT, 2006)

Tabla 4 Requisitos de los agregados para bases granulares

Ensayo		Norma de Ensayo	Clase de Base Granular		
			BG_C	BG_B	BG_A
Petrografía					
Análisis petrográfico		ASTM C-295	Reportar	Reportar	Reportar
Dureza					
Desgaste Los Ángeles (Gradación A)	- En seco, 500 revoluciones, % máximo	INV E-218	35	30	30
	- En seco, 100 revoluciones, % máximo		7 (RO)	6 (RO)	6 (RO)
	- Después de 48 horas de inmersión, 500 revoluciones, % máximo (1)		55 (RO)	50 (RO)	45
	- Relación húmedo/seco, 500 revoluciones, máximo		2 (RO)	2 (RO)	2
Micro Deval, % máximo	- Agregado Grueso (FT)	ASTM D-6928	30	25	20
10% de finos	- Valor en seco, kN mínimo - Relación húmedo/seco, % mínimo	BS 812 PART 111	60 (RO) 75 (RO)	75 (RO) 75 (RO)	100 75
Durabilidad					
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	- Sulfato de Magnesio	INV E-220	18	18	18
Limpieza					
Límite Líquido, % máximo		INV E-125	25	25	25
Índice de Plasticidad, % máximo		INV E-126	3	No plástico	No plástico
Equivalente de Arena, % mínimo		INV E-133	25	25	25
Valor de Azul de Metileno, máximo		EN-933-9	8	8	8
Terrones de arcilla y partículas deleznable, % máximo		INV E-211	2	2	2
Geometría de las Partículas					
Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo	- 1 cara	INVE-227	60	85	85
	- 2 caras		40	60	60
Índice de Aplanamiento, % máximo (2)		INV E-230	35	35	35
Índice de Alargamiento, % máximo (3)		INV E-230	35	35	35
Angularidad del Agregado Fino, % mínimo (RO)		AASHTO T-304	35	35	35
Capacidad de Soporte					
CBR, % mínimo - Referido al 100 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión.		INV E-148	80	100	100

(IDU, 2005)

Carpeta

La carpeta asfáltica es la parte superior de un pavimento flexible. Es una capa de material pétreo cementado con asfalto que se coloca sobre la base. Olivera (1994) cita que los materiales pétreos son suelos inertes que se consiguen en ríos, arroyos o depósitos naturales.

- **Superficie de rodamiento:** La carpeta debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito (Fonseca, 2002).

- **Impermeabilidad:** Hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento, para que las capas subyacentes puedan mantener su capacidad de soporte (Fonseca, 2002).
- **Resistencia:** Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento, además debe proveer una superficie resistente al deslizamiento, incluso en una pista húmeda (Fonseca, 2002).

Los materiales asfálticos utilizados son:

Cemento asfáltico: Son el resultado del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura, siendo sólido a temperaturas normales y posee un color café oscuro. Para poder mezclarlo con los materiales pétreos, éste debe tener una temperatura de 140 °C (CMT, 2000).

Rebajados asfálticos: Regularmente se utilizan para la elaboración de carpetas de mezcla en frío, así como en impregnaciones de bases y subbases hidráulicas, son los materiales asfálticos líquidos compuestos por cemento asfáltico y un solvente, clasificados según su velocidad de fraguado (CMT, 2000).

Emulsiones asfálticas: Son los materiales asfálticos líquidos estables, que están constituidos por una fase continua formada por agua y la fase discontinua por glóbulos de cemento asfáltico. Se denominan emulsiones asfálticas *aniónicas* cuando el agente emulsificante confiere polaridad electronegativa a los glóbulos y emulsiones asfálticas *catiónicas*, cuando les confiere polaridad electropositiva; estas pueden ser (CMT, 2000):

- De rompimiento rápido, que generalmente se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos, a excepción de la emulsión ECR-60, que no se debe utilizar en la elaboración de éstas últimas
- De rompimiento medio, que normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos en la mezcla es menor o igual a dos (2) por ciento, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas
- De rompimiento lento, que comúnmente se utilizan para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas
- Para impregnación, que particularmente se utilizan para impregnaciones de subbases y/o bases hidráulicas

- Superestables, que principalmente se emplean en estabilizaciones de materiales y en trabajos de recuperación de pavimentos

Tabla 5 Especificaciones granulométricas para materiales pétreos

Denominación del material pétreo	Especificaciones granulométricas para materiales pétreos								
	Por ciento que pasa la malla								
	1 1/4	1 "	3/4 "	1/2 "	3/8 "	1/4 "	#	# 8	# 40
1	100	95		5 máx		0			
2			100	95 mín		5 máx		0	
3 – A				100	95			5 máx	0
3 – B					100	95 mín		5 máx	0

(Olivera, 2004)

3.2.2. Aspectos que debe cumplir un pavimento flexible

Teniendo en cuenta que la estructura de pavimento se realiza con el fin de satisfacer las necesidades de una sociedad, es necesario tener en cuenta aspectos que este debe cumplir para proporcionar una superficie uniforme, poseer una resistencia adecuada a la acción del tránsito para el cual fue diseñada, resistir al intemperismo, entre otros aspectos para mantener la serviciabilidad adecuada (Rico y del Castillo, 1984).

- **Resistencia estructural**

La estructura de pavimento flexible debe soportar las cargas impuestas por el tránsito, las cuales producen esfuerzos normales y cortantes en la estructura. En los pavimentos flexibles se consideran los esfuerzos cortantes como la principal causa de falla desde el punto de vista estructural. Además de los esfuerzos cortantes también se tienen los producidos por la aceleración, drenaje de los vehículos y esfuerzos de tensión en los niveles superiores de la estructura a cierta distancia del área cargada, cuando se deforma verticalmente (Rico y del Castillo, 1984).

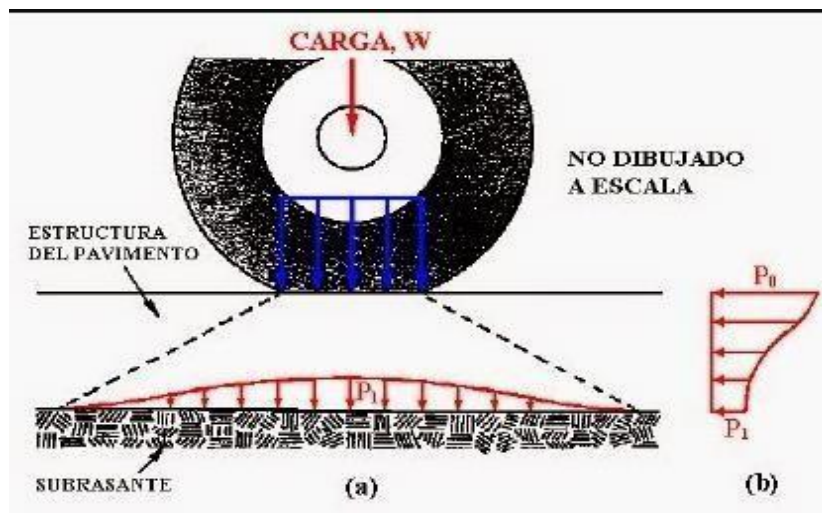
La determinación de la resistencia de los materiales que constituyen un pavimento influye en el tipo de suelo, el tratamiento que se le debe suministrar y en la interacción con la intemperie. Uno de los efectos más importantes de la intemperie son los cambios del contenido de agua, para definir la resistencia de la condición crítica (Rattia, 2014)

Con el fin de que la estructura de pavimento flexible, tenga una buena resistencia estructural, es necesario establecer con mucho cuidado la selección de los materiales para las capas que constituyen la estructura, teniendo presente que no solo se van a tener las cargas de los vehículos sino además los esfuerzos que tiene la subrasante.

- **Deformabilidad**

En los pavimentos las cargas del tránsito producen deformaciones de varias clases, las elásticas son de recuperación instantánea y las plásticas que son las que permanecen en el pavimento después de que causa deformadora se ha retirado. Las deformaciones elásticas que se presentan de manera repetida tienen un impacto más fuerte en los materiales con resistencia a la tensión, cuando estos materiales son colocados en las capas superiores de la estructura, dependiendo de la magnitud de la deformación puede llevar a la estructura a la falla por fatiga. Por otro lado, las deformaciones plásticas tienden a ser acumulativas, por lo cual puede alcanzar valores muy grandes (Rico y del Castillo, 1984)

Figura 32 Propagación de la presión de la carga de rueda a través de la estructura de pavimento



(Asphalt Institute Thickness Design Manual, 2014)

En el periodo de diseño es necesario realizar una estimación de las deformaciones tanto plásticas como elásticas que podría sufrir el pavimento, en las deformaciones elásticas es necesario tener el conocimiento de los materiales y la obtención de su módulo de deformación mediante pruebas de campo; las deformaciones plásticas se pueden definir una vez se tenga el tránsito de diseño, prefijando con base experimental una deformación permanente máxima por medio del criterio AASHTO (Rattia, 2014).

- ***Durabilidad***

La durabilidad de una estructura de pavimento está muy ligada al tránsito y a una serie de factores económicos y sociales, debido a que entre más alto sea el tránsito y la importancia económica se requieren pavimentos más duraderos que para un tránsito bajo. Además, es necesario tener en cuenta la localización de la estructura, por factores como el clima, la precipitación, el suelo, entre otros.

La durabilidad de un pavimento flexible no debe ser inferior a 8 años y normalmente suele tener una vida útil de 20 años. (Rico y del Castillo, 1984)

- ***Requerimientos de conservación***

Entre los factores que influyen decisivamente en la vida útil de los pavimentos se tiene la intensidad del tránsito, ya que se tiene que prever el crecimiento futuro, tanto del número como del tipo de vehículo que va a transitar; las deformaciones, derrumbes de la zona, las condiciones de drenaje y subdrenaje, la degradación estructural de los materiales por la carga repetida, entre otros (Rattia, 2014).

- ***Comodidad***

Uno de los factores que debe satisfacer una vía es la comodidad del usuario, para garantizar la seguridad del mismo; en ocasiones esta comodidad puede reflejarse en las velocidades a las que se puede transitar; dentro de este aspecto es necesario considerar las diferentes fallas que se pueden presentar en la estructura como lo son las deformaciones longitudinales las cuales generan una deficiencia estructural y disminución en los niveles de servicio de la vía, los cuales son de vital importancia en autopistas o vías con altas velocidades.

3.2.1. Tipos de fallas

Según Rico y Del Castillo (1984), la tecnología que se ha desarrollado para pavimentos, tiene como objetivo evitar deterioros y fallas. Se han logrado establecer relaciones de causa – efecto, para desarrollar normas de criterio de proyecto y conservación. Es necesario tener presente que la sola inspección visual de las fallas en un pavimento, deben estudiarse cuidadosamente en laboratorio (Valenzuela, 2003).

Los daños en los pavimentos informan sobre su condición y las causas posibles de la misma. El inventario de los daños de un pavimento representa una información fundamental en el proceso de evaluación del estado del pavimento. Los daños se pueden jerarquizar de acuerdo con la prioridad de la reparación y con su efecto sobre la comodidad y seguridad para el usuario y sobre el estado del pavimento, lo cual permite planificar los recursos y las soluciones. Algunos de los orígenes o naturaleza de los daños en el pavimento flexible son (Valencia, 2007):

- Incremento de las cargas y su frecuencia con respecto al diseño inicial.
- Deficiencias durante la construcción, referente a la calidad de los materiales, espesores de capas y operaciones de construcción.
- Diseños deficientes, métodos de diseño que resultan inadecuados en la actualidad.
- Factores climáticos regionales desfavorables.

- ***Clasificación de los daños en el pavimento flexible***

En los pavimentos flexibles, dado que permiten altas deformaciones comparados con otros tipos de pavimento y el uso de las vías para cargas muy pesadas, se pueden presentar daños que van desde sencillas condiciones de desgaste de la rodadura, hasta fallas considerables en la totalidad de la estructura; se pueden realizar diferentes clasificaciones respecto a los daños según el parámetro u objetivo, teniendo en cuenta:

- a. Según las características en funcionales o estructurales.
- b. Según el origen, causa inicial o principal, se tienen los generados por repetición de las cargas vehiculares (tránsito) y otros producidos por factores ambientales, diseño, construcción o materiales.
- c. Según la forma o geometría del área deteriorada se pueden clasificar en fisuras o grietas (aisladas o interconectadas) y en deformaciones (transversales o longitudinales).
- d. Según la capa en la cual se localizan o se inician los daños se presentan daños superficiales, de interfase capa granular – capa cementada, capas granulares o subrasante.

- ***Fallas estructurales***

Corresponden a un defecto que se refleja en la superficie de rodamiento del pavimento y afectan al cómodo movimiento de los vehículos, sin imposibilitar su uso. Son fallas graves e involucran al conjunto estructural, se originan cuando se produce la falla en una o varias capas del pavimento, lo que ocasiona el rompimiento

del mismo. Estos deterioros afectan significativamente la capacidad de soportar las sollicitaciones para las cuales fue diseñado el pavimento (Fonseca, 2002).

- **Fallas funcionales**

Corresponden a una deficiencia del pavimento que provoca, de un inmediato a corto plazo o posteriormente, una reducción de la capacidad de carga del mismo, la falla estructural se mantiene en una etapa avanzada en una destrucción generalizada del pavimento. Se produce una falla en la capacidad funcional del pavimento, es decir, se pierde la función inicial de diseño. Están estrechamente ligadas a la carpeta asfáltica, se pierde la calidad de la superficie de rodadura y no se tiene una adecuada fricción superficial (Fonseca, 2002).

Teniendo en cuenta su origen funcional o estructural se pueden agrupar en: fisuras, deformaciones, pérdida de capas estructurales, daños superficiales y otros daños. Dentro de cada categoría existen diferentes deterioros que se originan por diversos factores, algunos de los cuales se han establecido mediante la revisión bibliográfica, y otros mediante evaluación de campo y ensayos de laboratorio. A continuación se presenta la definición de cada uno de estos deterioros, que se encuentran definidos en el Manual de inspección de Pavimento Flexible, así como sus severidades (clasificadas en Baja, Media y Alta), la forma de medir el daño y las unidades de medida, sus posibles causas y la evolución probable y un registro fotográfico de los daños que se pueden encontrar durante una inspección visual típica (INVIAS, 2006):

A. Fisuras

- **Fisuras longitudinales y transversales:** Corresponden a discontinuidades en la carpeta asfáltica, en la misma dirección del tránsito o transversales a él. Son indicio de la existencia de esfuerzos de tensión en alguna de las capas de la estructura, los cuales han superado la resistencia del material afectado. La localización de las fisuras dentro del carril puede ser un buen indicativo de la causa que las generó, ya que aquellas que se encuentran en zonas sujetas a carga, pueden estar relacionadas con problemas de fatiga de toda la estructura o de alguna de sus partes. Se miden en metros (m). Es posible determinar el área de afectación por este deterioro en metros cuadrados (m²) multiplicando la longitud total de fisuras por un ancho de referencia establecido en 0,6 m, esto para los fines del análisis del área total afectada (INVIAS, 2006).

Figura 33 En la parte (a) se puede distinguir la orientación de la fisura longitudinal y en la parte (b) la de las fisuras transversales



(a)



(b)

(INVIAS, 2006)

Tabla 6 Causas y severidades de fisuras longitudinales y transversales

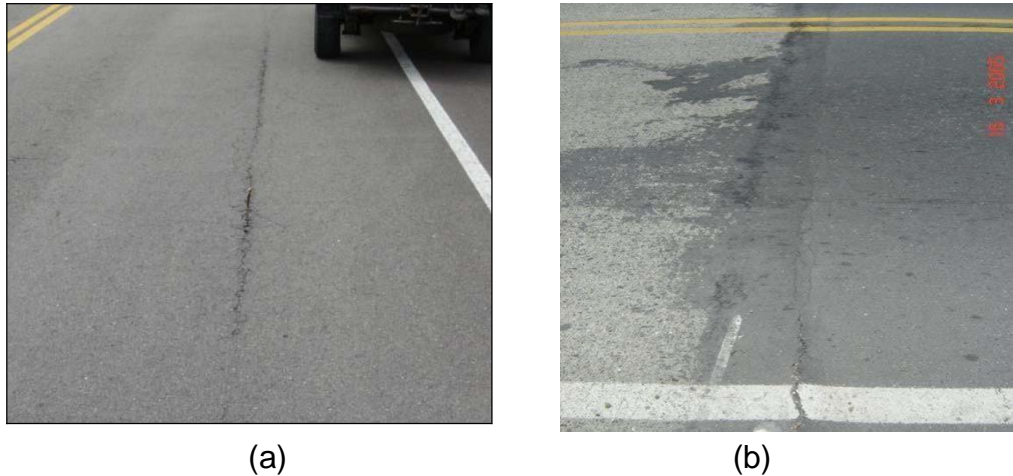
Causas	Severidades
Rigidización de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad debido a un exceso de filler ¹ , o al envejecimiento del asfalto, ocurre ante bajas temperaturas o gradientes térmicos altos (generalmente superiores a 30°)	Baja: Abertura de la fisura menor que 1 mm, cerrada o con sello en buen estado
Reflexión de grietas de las capas inferiores, generadas en materiales estabilizados o por grietas o juntas existentes en placas de concreto hidráulico subyacentes	
Fatiga de la estructura, usualmente se presenta en las huellas del tránsito	Media: Abertura de la fisura entre 1 mm y 3 mm, pueden existir algunas fisuras con patrones irregulares de severidad baja en los bordes o cerca de ellos y pueden presentar desportillamientos leves; existe una alta probabilidad de infiltración de agua a través de ellas
Pueden corresponder a zonas de contacto entre corte y terraplén por la diferencia de rigidez de los materiales de la subrasante	
Riego de liga insuficiente o ausencia total	Alta: Abertura de la fisura mayor que 3 mm, pueden presentar desportillamientos considerables y fisuras con patrones irregulares de severidad media o alta en los bordes o cerca de ellos, puede causar movimientos bruscos a los vehículos
Espesor insuficiente de la capa de rodadura	

(INVIAS, 2006)

- **Fisuras en juntas de construcción:** Corresponden a fisuras longitudinales o transversales generadas por la mala ejecución de las juntas de construcción de la carpeta asfáltica o de las juntas en zonas de ampliación. Se localizan generalmente en el eje de la vía, coincidiendo con el ancho de los carriles, zonas

de ensanche y en zonas de unión entre dos etapas de colocación de pavimento asfáltico (INVIAS, 2006).

Figura 34 Fisuras en junta de construcción (a) longitudinales y (b) transversales



(INVIAS, 2006)

Tabla 7 Causas y severidades de fisuras en juntas de construcción

Causas	Severidades
Carencia de ligante en las paredes de la junta	Aplican los mismos criterios mencionados para fisuras longitudinales y transversales
Deficiencia en el corte vertical de las franjas construidas con anterioridad.	
Deficiencias de compactación en la zona de la junta.	
Unión entre materiales de diferente rigidez.	

(INVIAS, 2006)

- **Fisura por reflexión de juntas o grietas en placas de concreto:** Este tipo de daño se presenta cuando existe una capa de concreto asfáltico sobre placas de concreto rígido; tales fisuras aparecen por la proyección en superficie de las juntas de dichas placas, en cuyo caso presentan un patrón regular, o también cuando existen grietas en las placas de concreto rígido que se han reflejado hasta aparecer en la superficie presentando un patrón irregular (INVIAS, 2006).

Figura 35 Fisuras por reflexión de juntas en placas de concreto



(INVIAS, 2006)

Causas: Son generadas por los movimientos de las juntas entre las placas de concreto rígido o de los bloques formados por las grietas existentes en éste, debido a los cambios de temperatura y de humedad. Generalmente no se atribuyen a las cargas de tránsito, aunque éstas pueden provocar fisuración en las zonas aledañas incrementando la severidad del daño (INVIAS, 2006).

Severidades y Unidad de medición: Aplican los mismos criterios que para fisuras longitudinales y transversales (INVIAS, 2006).

- **Fisuras en medialuna:** Son fisuras de forma parabólica asociadas al movimiento de la banca por lo que usualmente se presentan acompañadas de hundimientos (INVIAS, 2006).

Figura 36 Fisura en medialuna



(INVIAS, 2006)

Causas: En general, este tipo de fisuras se producen por inestabilidad de La banca o por efectos locales de desecación, aunque entre otras causas se pueden mencionar las siguientes (INVIAS, 2006):

- Falla lateral del talud en zonas de terraplén.
- Falla del talud en zonas de corte a media ladera.
- Ausencia o falla de obras de contención de la banca.
- Desecación producida por la presencia de árboles muy cerca al borde de la vía.

- **Fisuras de borde:** Corresponden a fisuras con tendencia longitudinal a semicircular localizadas cerca del borde de la calzada, se presentan principalmente por la ausencia de berma o por la diferencia de nivel entre la berma y la calzada, generalmente se localizan dentro de una franja paralela al borde (INVIAS, 2006)

Figura 37 Fisuras de borde



(INVIAS, 2006)

Causas: La principal causa de este daño es la falta de confinamiento lateral de la estructura debido a la carencia de bordillos, anchos de berma insuficientes o sobrecarpetas que llegan hasta el borde del carril y quedan en desnivel con la berma; en estos casos la fisura es generada cuando el tránsito circula muy cerca del borde. Las fisuras que aparecen por esta causa generalmente se encuentran a distancias entre 0,3 m a 0,6 m del borde de la calzada (INVIAS, 2006).

- **Fisuras de bloque:** Cuando se presenta este tipo de daño la superficie del asfalto es dividida en bloques de forma aproximadamente rectangular. Los bloques tienen lado promedio mayor que 0,30 m³. Este deterioro difiere de la piel de cocodrilo en que esta última aparece en áreas sometidas a carga, mientras que los bloques aparecen usualmente en áreas no cargadas. Sin embargo, es usual encontrar fisuras en bloque que han evolucionado en piel de cocodrilo por acción

del tránsito. Por otra parte, la piel de cocodrilo generalmente está formada por bloques con más lados y ángulos agudos. Se registra el área de superficie de pavimento afectada en metros cuadrados (m²). Puede existir un área en la que se presenten diferentes severidades, caso en el que se registra el área correspondiente a cada una, de ser posible, o de lo contrario se registra toda el área afectada y se asigna el mayor grado de severidad (INVIAS, 2006)

Figura 38 Fisuras en bloque



(INVIAS, 2006)

Tabla 8 Causas y Severidades de las fisuras en bloque

Causas	
La fisuración en bloque es causada principalmente por la contracción del concreto asfáltico debido a la variación de la temperatura durante el día, lo cual se traduce en ciclos de esfuerzo - deformación sobre la mezcla. La presencia de este tipo de fisuras indica que el asfalto se ha endurecido significativamente, lo cual sucede debido al envejecimiento de la mezcla o al uso de un tipo de asfalto inadecuado para las condiciones climáticas de la zona	Baja: Los bloques se han comenzado a formar, pero no están claramente definidos y están conformados por fisuras de abertura menor que 1 mm, cerradas o con sello, no presentan desportillamiento en los bordes
Reflejo de grietas de contracción provenientes de materiales estabilizados utilizados como base	Media: Bloques definidos por fisuras de abertura entre 1 mm y 3 mm, o con sello fallado, que pueden o no presentar desportillamiento en los bordes
Combinación del cambio volumétrico del	Alta: Bloques bien definidos por fisuras de

agregado fino de la mezcla asfáltica con el uso de un asfalto de baja penetración	abertura mayor que 3 mm, que pueden presentar un alto desportillamiento en los bordes
---	---

(INVIAS, 2006)

- **Piel de cocodrilo:** La piel de cocodrilo ocurre generalmente en áreas que están sometidas a cargas de tránsito, sin embargo, es usual encontrar este daño en otras zonas donde se han generado deformaciones en el pavimento que no están relacionadas con la falla estructural (por tránsito o por deficiencia de espesor de las capas) sino con otros mecanismos como por ejemplo problemas de drenaje que afectan los materiales granulares, falta de compactación de las capas, reparaciones mal ejecutadas y subrasantes expansivas, entre otras. Este tipo de daño no es común en capas de material asfáltico colocadas sobre placas de concreto rígido (INVIAS, 2006)

Figura 39 Piel de cocodrilo



(INVIAS, 2006)

Tabla 9 Piel de cocodrilo

Causas	Severidades
Espesor de estructura insuficiente	Baja: Serie de fisuras longitudinales paralelas (pueden llegar a tener aberturas de 3 mm), principalmente en la huella, que no presentan desportillamiento, con pocas o ninguna conexión entre ellas y no existe evidencia de bombeo
Deformaciones de la subrasante	

Rigidización de la mezcla asfáltica en zonas de carga	Media: Las fisuras han formado un patrón de polígonos pequeños y angulosos, que
Problemas de drenaje que afectan los materiales granulares	pueden tener un ligero desgaste en los bordes y aberturas entre 1 mm y 3 mm, sin evidencia de bombeo
Compactación deficiente de las capas granulares o asfálticas	Alta: Las fisuras han evolucionado (abertura mayor que 3 mm), se presenta desgaste o desportillamiento en los bordes y los bloques se encuentran sueltos o se mueven ante el tránsito, incluso llegando a presentar descascaramientos y bombeo
Deficiencias en la elaboración de la mezcla asfáltica	

(INVIAS, 2006)

B. Deformaciones

- **Abultamientos:** Este deterioro se asigna a los “abombamientos” o prominencias que se presentan en la superficie del pavimento. Pueden presentarse bruscamente ocupando pequeñas áreas o gradualmente en áreas grandes, acompañados en algunos casos por fisuras (INVIAS, 2006)

Figura 40 Abultamiento



(INVIAS, 2006)

Causas: Se generan principalmente por la expansión de la subrasante o en capas de concreto asfáltico colocado sobre placas de concreto rígido, el cual se deforma al existir presiones bajo la capa asfáltica (como las generadas por procesos de bombeo) (INVIAS, 2006).

Severidades:

- **Baja:** Profundidad máxima menor que 10 mm, causa poca vibración al vehículo, la cual no genera incomodidad al conductor.
- **Media:** Profundidad máxima entre 10 mm y 20 mm, causa una mayor vibración al vehículo generando incomodidad al conductor.
- **Alta:** Profundidad máxima mayor que 20 mm, causa una vibración excesiva que puede generar un alto grado de incomodidad, haciendo necesario reducir la velocidad por seguridad.

- **Hundimientos:** Los hundimientos corresponden a depresiones localizadas en el pavimento con respecto al nivel de la rasante. Este tipo de daño puede generar problemas de seguridad a los vehículos, especialmente cuando contienen agua pues se puede producir hidropneumático. Los hundimientos pueden estar orientados de forma longitudinal o transversal al eje de la vía, o pueden tener forma de medialuna, en cualquier caso, el reporte del daño debe incluir en las aclaraciones la orientación o la forma del hundimiento, si es fácilmente identificable en campo (INVIAS, 2006).

Figura 41 Hundimiento



(INVIAS, 2006)

Tabla 10 Causas y Severidades de los hundimientos

Causas	Severidades
Asentamientos de la subrasante.	Baja: Profundidad menor que 20 mm, causa poca vibración al vehículo, sin generar incomodidad al conductor
Deficiencia de compactación de las capas inferiores del pavimento, del terraplén o en las zonas de acceso a obras de arte o puentes.	
Deficiencias de drenaje que afecta a los materiales granulares.	Media: Profundidad entre 20 mm y 40 mm, causa mayor vibración al

Diferencia de rigidez de los materiales de la subrasante en los sectores de transición entre corte y terraplén.	vehículo generando incomodidad al conductor
Deficiencias de compactación de rellenos en zanjas que atraviesan la calzada.	Alta: Profundidad mayor que 40 mm, causa vibración excesiva que
Inestabilidad de la banca. Circulación de tránsito muy pesado	puede generar un alto grado de incomodidad, haciendo necesario reducir la velocidad por seguridad
Circulación de tránsito muy pesado	

(INVIAS, 2006)

C. Perdida de capas estructurales

- **Descascaramientos:** Este deterioro corresponde al desprendimiento de parte de la capa asfáltica superficial, sin llegar a afectar las capas asfálticas subyacentes

Figura 42 Descascaramiento



(INVIAS, 2006)

Tabla 11 Causas y severidades de descascaramientos

Causas	Severidades
Limpieza insuficiente previa a tratamientos superficiales	Baja: Profundidad menor que 10 mm
Espesor insuficiente de la capa de rodadura asfáltica	Media: Profundidad entre 10 mm y 25 mm
Riego de liga deficiente	Alta: Profundidad mayor que 25 mm
Mezcla asfáltica muy permeable	

- **Baches:** Desintegración total de la carpeta asfáltica que deja expuestos los materiales granulares lo cual lleva al aumento del área afectada y al aumento de la profundidad debido a la acción del tránsito. Dentro de este tipo de deterioro se encuentran los ojos de pescado que corresponden a baches de forma

redondeada y profundidad variable, con bordes bien definidos que resultan de una deficiencia localizada en las capas estructurales (INVIAS, 2006)

Figura 43 Bache



(INVIAS, 2006)

Este tipo de deterioro puede presentarse por la retención de agua en zonas fisuradas que ante la acción del tránsito produce reducción de esfuerzos efectivos generando deformaciones y la falla del pavimento. Este deterioro ocurre siempre como evolución de otros daños, especialmente de piel de cocodrilo. También es consecuencia de algunos defectos constructivos (por ejemplo, carencia de penetración de la imprimación en bases granulares) o de una deficiencia de espesores de capas estructurales. Puede producirse también en zonas donde el pavimento o la subrasante son débiles (INVIAS, 2006).

- **Parche:** Los parches corresponden a áreas donde el pavimento original fue removido y reemplazado por un material similar o diferente, ya sea para reparar la estructura (a nivel de concreto asfáltico o hasta los granulares) o para permitir la instalación o reparación de alguna red de servicios (acueducto, gas, etc) (INVIAS, 2006).

Figura 44 Parche



(INVIAS, 2006)

Tabla 12 Causas y severidades de los baches

Causas	Severidades
Procesos constructivos deficientes	Baja: El parche está en muy buena condición y se desempeña satisfactoriamente
Progresión del daño inicial por el cual debió realizarse el parcheo (cuando la intervención fue inadecuada para solucionar el problema)	Media: El parche presenta daños de severidad baja o media y deficiencias en los bordes
Propagación de daños existentes en las áreas aledañas al parche	Alta: El parche está gravemente deteriorado, presentan daños de severidad alta y requiere ser reparado pronto
Deficiencias en las juntas	

(INVIAS, 2006)

D. Otros daños

- **Separación de la berma:** Este daño indica el incremento en la separación de la junta existente entre la calzada y la berma. Este daño permite la infiltración de agua hacia el interior de la estructura del pavimento provocando su deterioro (INVIAS, 2006)

Figura 45 Separación de la berma



(INVIAS, 2006)

Causas: Generalmente está relacionada con el movimiento de la berma debido a problemas de inestabilidad de los taludes aledaños o con la ausencia de liga entre calzada y berma cuando se construyen por separado (INVIAS, 2006)

4. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El occidente de la Sabana de Bogotá comprende la zona localizada al oeste de Avenida Ciudad de Cali, la cual abarca los municipios de Funza, Mosquera, Facatativá, El Rosal y Subachoque (Pinto, 2012).

En dicha zona son diversos los factores que pueden estar generando la desecación; en la cual Loboguerrero, 1998; Vesga, 2003; Pineda – Jaimes, 2003; Ávila, 2005; han planteado que esta desecación está sujeta principalmente a la presencia de vegetación no nativa como el eucalipto, el pino y las acacias principalmente; además la presencia de los cultivos de la zona y el microclima.

En el presente capítulo, se presentan las generalidades de la zona de estudio, teniendo en cuenta las actividades que afectan la desecación y por ende la generación de diferentes patologías en la estructura de pavimento flexible, las cuales fueron mencionadas por los autores anteriormente relacionados como resultado de los estudios que han realizado.

4.1. GENERALIDADES

El occidente de la Sabana de Bogotá comprende la zona localizada al oeste de Avenida Ciudad de Cali, abarcando los municipios de Funza, Mosquera, Facatativá, El Rosal y Subachoque.

Según la comunidad geotécnica nacional esta zona es un depósito profundo de suelos arcillosos de edad cuaternaria, los cuales poseen cambios de volumen en la superficie, los cuales están estrechamente relacionados con la pérdida continua de humedad y las patologías que se desarrollan en las estructuras por la pérdida de continuidad del suelo (Pineda y Colmenares, 2006).

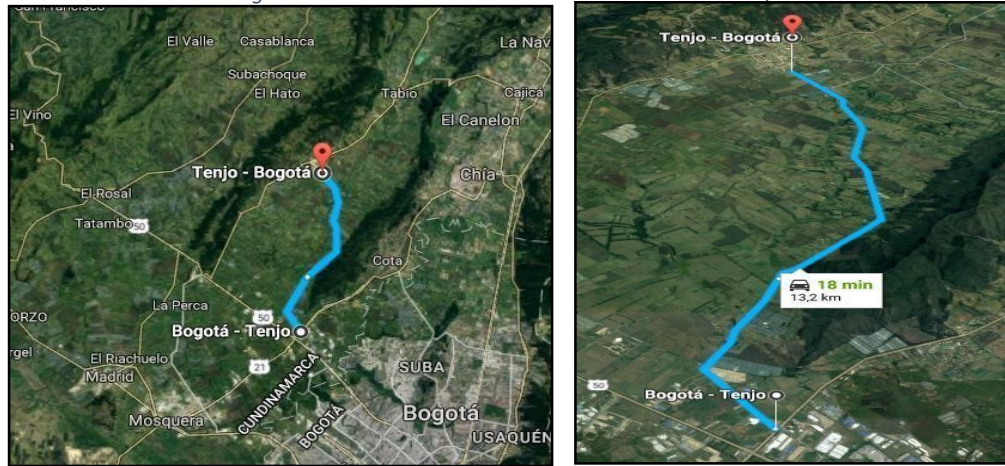
4.1.1. Localización

La altiplanicie de la Sabana de Bogotá, está situada en la parte central de la Cordillera Oriental, compuesta principalmente por suelos blandos, arenas y turbas de origen lacustre cuaternario

La zona de estudio de este proyecto es la vía que conduce del municipio de Siberia al municipio de Tenjo, con longitud de aproximadamente 13 Kilómetros y compuesta por una estructura de pavimento flexible, la cual ha presentado históricamente procesos de deterioros continuos los cuales están asociados a las deformaciones excesivas de la capa de rodadura en la estructura de pavimento, lo cual produce una disminución en el nivel de servicio de la misma.

Autores como Pineda (2003), Colmenares (2015), Vesga (2002), Rueda (2013), entre otros; han venido estudiando las patologías que se presentan en la superficie, las cuales han relacionado con los procesos de desecación de los suelos arcillosos presentes en la subrasante, los cuales además conllevan a otros fenómenos patológicos.

Figura 46 Localización del área de estudio Siberia - Tenjo



(Google maps)

4.2. CLIMATOLOGÍA E HIDROLOGÍA

En la zona de estudio se presentan condiciones de climatología del altiplano, con altura cercana a los 2600 metros sobre el nivel del mar. La temperatura máxima promedio de la región, tomada desde cercanías a la sabana del occidente de Bogotá, se encuentra cerca a los 19°C (IDEAM, 2014).

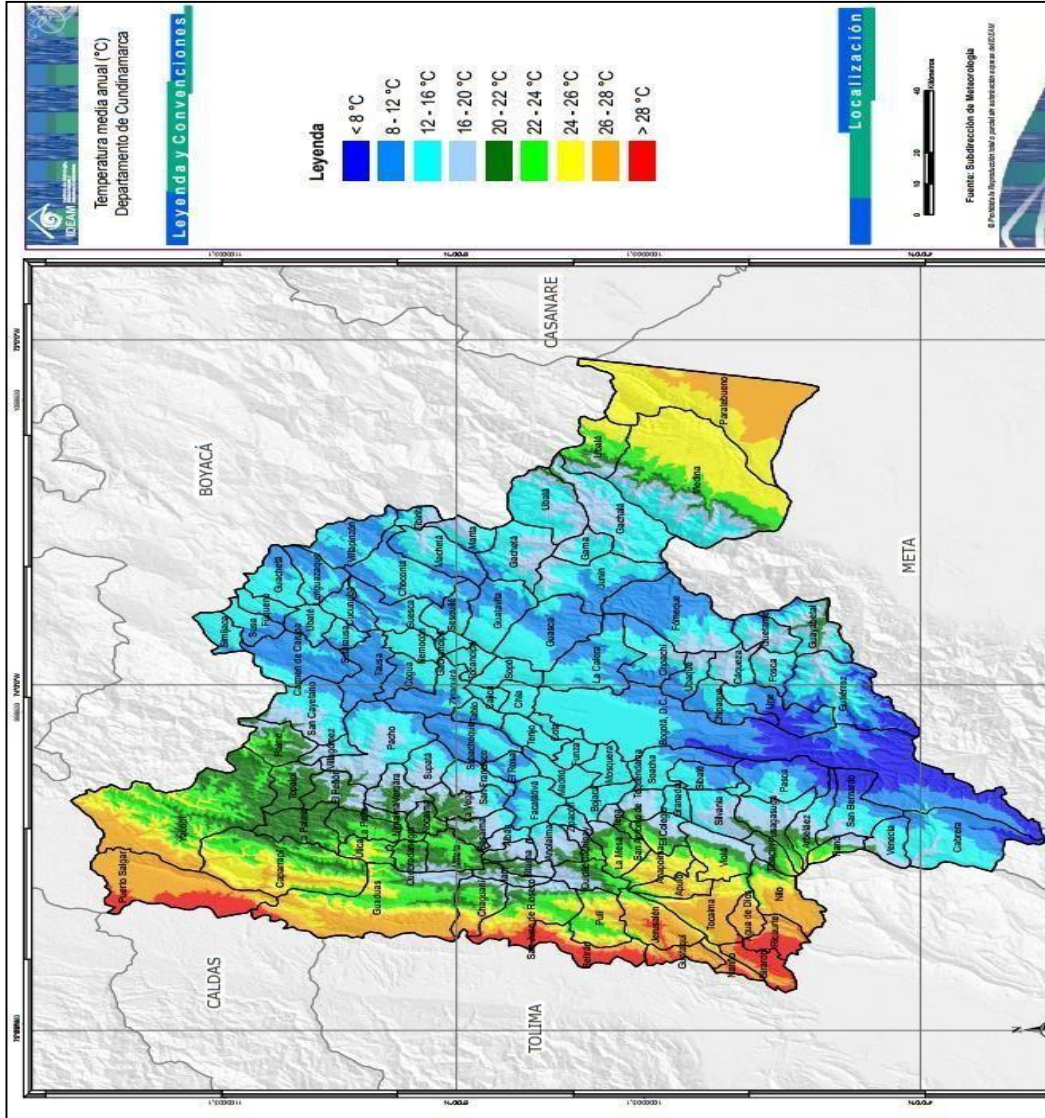
4.2.1. Temperatura

La Subdirección de Meteorología es la encargada de realizar los estudios e investigaciones relacionadas con la atmósfera, el tiempo y el clima del país, además de preparar productos que contribuyan al aprovechamiento del recurso clima, en el

mejoramiento y optimización de la producción de los distintos sectores socioeconómicos del país. En este módulo se podrán consultar las características climatológicas de las diferentes regiones del territorio nacional, el seguimiento a escala diario, decadal, mensual y anual de las anomalías climáticas, predicciones estacionales del clima, análisis con escenarios de cambio climático, boletines especiales y periódicos sobre fenómenos de origen meteorológico, y notas e informes técnicos en línea sobre diversos temas meteorológicos (IDEAM, 2014).

El Atlas Climatológico de Colombia, consiste en un conjunto de productos gráficos y cartográficos, con los cuales se busca representar la distribución espaciotemporal de los indicadores del clima del país; entre los cuales se encuentran la precipitación, las temperaturas, los vientos, la humedad y la radiación solar entre otros, como también parámetros derivados como el balance hídrico, balance energético, clasificaciones climáticas orientadas a diversos fines, indicadores de contaminación, de cambio climático y aprovechamiento energético.

Figura 47 Temperatura media anual de Cundinamarca



(IDEAM, 2014)

Tabla 13 Temperaturas máximas promedio de la región

ESTACION	TEMPERATURA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
APTO EL DORADO	MEDIA	13,1	13,5	13,8	14,0	14,0	13,8	13,3	13,3	13,3	13,4	13,5	13,2	13,5
	MÁXIMA ABS	24,9	24,8	24,9	23,2	23,5	23,1	22,4	23,6	23,3	23,6	24,0	23,8	24,9
	MÍNIMA ABS	-3,0	-6,4	-3,2	0,0	0,7	1,0	0,4	-1,5	-0,2	0,5	-3,0	-6,0	-6,4
	MÁXIMA MEDIA	19,9	20,0	19,8	19,5	19,2	18,6	18,2	18,5	18,9	19,1	19,3	19,5	19,2
	MÍNIMA MEDIA	5,6	6,6	7,7	8,7	8,8	8,4	7,8	7,4	7,2	7,8	8,0	6,6	7,5
APTO: GUAYMARAL	MEDIA	12,9	13,2	13,6	13,8	13,5	13,0	12,7	12,9	13,0	13,0	13,2	12,9	12,9
	MÁXIMA ABS	24,8	24,2	24,7	24,5	24,8	24,0	24,0	24,5	24,0	24,5	24,5	24,8	24,8
	MÍNIMA ABS	-2,9	-3,0	-2,0	0,0	1,0	0,1	-0,1	-1,0	-1,0	-3,0	-2,0	-3,2	-3,2
	MÁXIMA MEDIA	20,1	20,1	19,9	19,4	19,2	18,7	18,5	18,7	19,0	19,1	19,1	19,8	19,3
	MÍNIMA MEDIA	5,9	6,5	6,8	7,7	8,1	7,5	7,2	6,9	6,4	6,9	7,0	6,8	7,0
ESC. COL. DE INGENIERÍA	MEDIA	13,7	14,4	14,4	14,5	14,4	13,9	13,4	13,5	13,7	14,0	14,2	13,8	14,0
	MÁXIMA ABS	23,4	23,8	23,5	23,8	23,0	23,8	23,8	22,8	23,6	23,8	23,8	23,6	23,8
	MÍNIMA ABS	-0,4	-1,4	-2,8	1,0	3,4	1,0	1,6	1,0	1,0	1,0	2,0	-2,2	-2,8
	MÁXIMA MEDIA	20,1	20,1	19,9	19,4	19,2	18,7	18,5	18,7	19,0	19,1	19,1	19,6	19,3
	MÍNIMA MEDIA	5,9	6,5	6,8	7,7	8,1	7,5	7,2	6,9	6,4	6,9	7,0	6,8	7,0

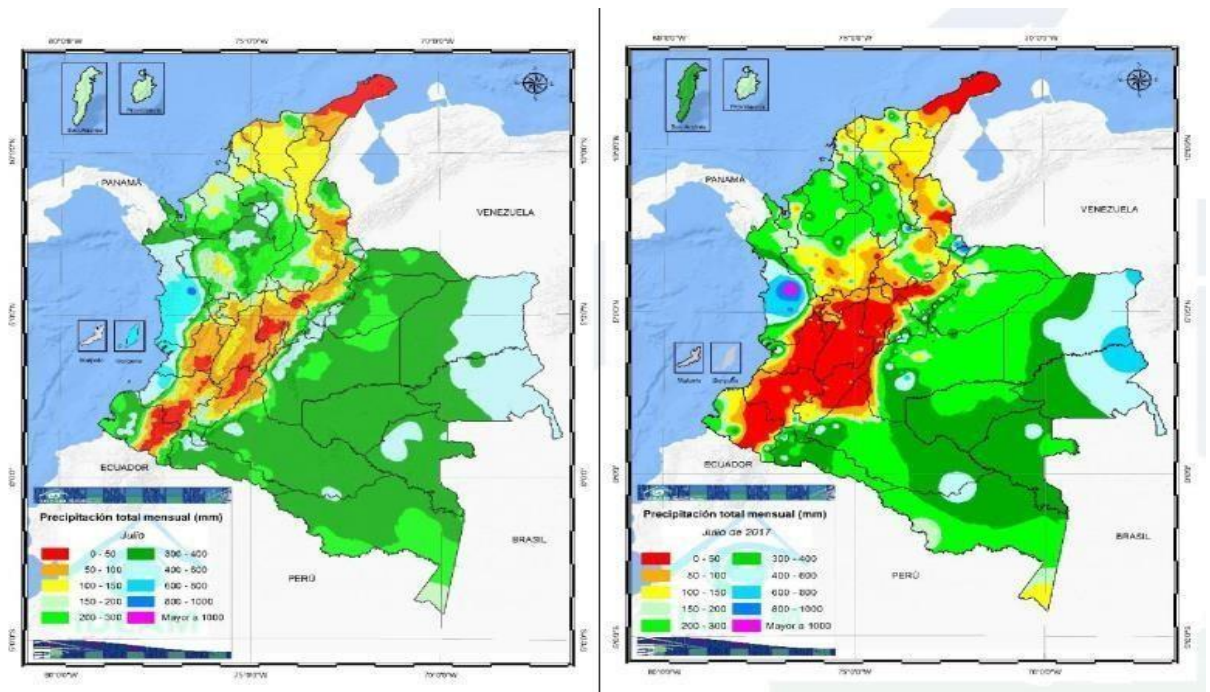
(IDEAM y FOPAE, 2004)

De los registros obtenidos del IDEAM tanto de las tablas como del mapa en el año 2004 se presentaron temperaturas de 12 a 16 °C, entre lo cual se puede destacar que para el periodo de Julio a Octubre que es el periodo de estudio del presente proyecto las temperaturas registradas tienen una oscilación promedio de temperatura media de 0.4 °C, teniendo en cuenta que en la estación de la Escuela de Ingenieros las diferencias de temperatura llegan hasta los 14° y en el APTO El Dorado llegan hasta 13,4°C; además se tiene que la diferencia de la temperatura mínima de estos meses y la máxima es de aproximadamente 22°C (IDEAM, 2004).

4.2.2. Precipitación

En comparación con la precipitación total mensual promedio histórico o normal climatológica 1981-2010 se observa una disminución de la precipitación en la Región Andina, en el mes de julio del 2017 los mayores volúmenes de precipitación (mayores a 500 mm) se concentraron en áreas del centro y sur de la región, y las lluvias oscilaron entre 20 mm y 100 mm (IDEAM, 2017).

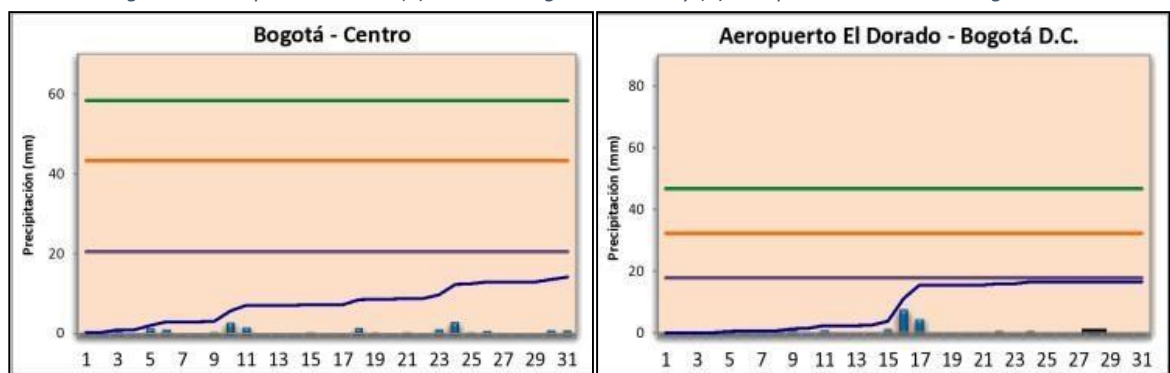
Figura 48 Precipitación total mensual promedio histórico 1981-2010 vs mes de Julio de 2017



(IDEAM, 2014)

A continuación, se presenta el comportamiento diario de la lluvia de las dos estaciones relacionadas en Bogotá, donde la línea azul representa el volumen de precipitación que se va acumulando durante el mes, las barras muestran la lluvia diaria, la línea morada corresponde a la precipitación promedio de la primera década, la naranja el promedio acumulado hasta la segunda década y la verde al promedio climatológico del mes del periodo del 1981 al 2010 (IDEAM, 2014)

Figura 49 Precipitación diaria (a) Estación Bogotá – Centro y (b) Aeropuerto El Dorado – Bogotá D.C.



(a)

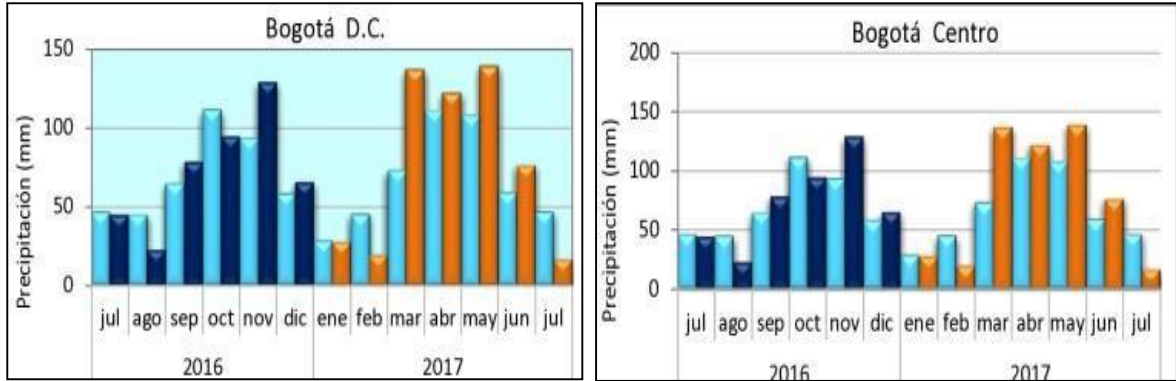
(b)

(IDEAM, 2014)

Seguimiento mensual de la lluvia: Se muestra a continuación la precipitación del mes de Julio (barra naranja) y la ocurrida durante el año anterior mes de julio del

año 2016 (barra azul oscuro), comparado con el promedio histórico (1981-2010 – barra azul clara), para la región (IDEAM, 2017):

Figura 50 Precipitación mensual (a) estación Bogotá D.C. y (b) Bogotá Centro



(a)

(b)

(IDEAM, 2017)

Para la zona de estudio se tomaron de la página de la CAR las estaciones más cercanas a la vía, las cuales son: Primavera LA y Santa Inés; con el fin de comparar los datos obtenidos del IDEAM y tener un acercamiento más acertado a la precipitación de esta zona, teniendo en cuenta que dichas estadísticas son de la región y estas son más específicas, de las cuales se obtuvieron los datos de las tablas 15 y 16 del registro de los valores totales mensuales de precipitación hasta el año 2014.

Realizando el acercamiento de la precipitación para los años 2015, 2016 y 2017 por la ponderación de los mismos con estaciones cercanas, se pudo estimar una precipitación de aproximadamente 400 mm para los años 2015 y 2016; pero para el 2017 se obtuvieron valores de 450 mm, teniendo en cuenta que estos valores son para los periodos de agosto a octubre.

Latitud 0449 N X=N=1023000 Departamento
 Longitud 7408 W Y=E=993400 Municipio

Tabla 14 Estación 2120136 STA INES

CUNDINAMAR Corrient R.
 CA e CHICÚ Categoría PM
 R. Fecha
 Cuenc CHICÚ Instalaci 03/01/198
 a ón 0
 Elevaci 2550 m.s.n.m Oficina 9 SABANA
 ón al Provincial CENTRO
 Fecha Suspensión

AÑO	ENE RO	FEB RE	MARZO ABRIL	MAYO	JUNIO	JULI O	AGOS T	SEPTI	OCTUB	DICI NOVIE
-----	-----------	-----------	----------------	------	-------	-----------	-----------	-------	-------	---------------

1998	43,5	40	19	52,9	155,1	38	66,8	29,5	81,5	167,7	78	96,8
1999	73	130	90,7	83,5	58	114,2	21	86,1	106,3	148,8	56	43
2000	17	98,2	70	38	21,5	52,5	65,5	39,5	167,5	56,1	37	16,3
2001	72,5	23,5	97,5	0	75,5	6	25	24,8	54	21	47,3	85,6
2002	4,5	10,8	67,8	144,2	87,5	69,6	73,8	13	49,2	84,7	25,2	76,4
2003	0	92,7	37	105,6	41,2	9,5	115,7	76,5	88	32,4		
2004	34,8	45,3	71,2	208,5	136,7	52,1	15,6	40,9	77,2	181,6	0	37,5
2005	4	34,5	32,7	34	50,9	28,4	111,6	324,2	25,7	84,1		

144,3 52 22,8 71,5 125,9 148,5 35,7

2006 180,6 102 199,6 283,9 330,1 82,3 35,9 121,5 51,8 36,3 2007 8,9 13 80,3 127,5 56,6 79,8 35,1 71,7 50,7 195,2 60,5 117,1 2008 52,1 58,5 71,2 96,3 108,3 82,8 90,3 88,5 112,9 109,1 118,6 24,4

2009 35,6 61,1 127,9 67 29,4 99,2 21,2 10,1 13,2 81,2 104,7 9,6 2010 8,4 10,5 4,1 100,9 60 119,8 201,9 76,8 48,7 14,3 163,5 86,8 2011 32 42 135,9 222,1 163,6 64 104,3 39,6 88,1 176,1 240,3 60 2012 41,3 25,5 116,7 221,6 62,6 31,8 50,5 46,1 32,3 88,4 30,6 16,6 2013 22 62,5 86,7 119,5 116,5 33,6 32,3 76,1 45,5 72,8 70,5 22,5 2014 59,8 65,1 50,5 42,5 41,8 66,1 41,7

(IDEAM, 2014)



4.2.3. Evapotranspiración

La evapotranspiración es una variable determinada en función del tiempo, la cual es debida principalmente a la presencia de la vegetación; actualmente por la posición geográfica de la Sabana de Bogotá se determina una temperatura media aproximada de 13 a 15°C, y una precipitación de 900 a 1000 mm (en la zona de estudio) (Pinto, 2012).

Las arcillas de la formación Sabana han sido sometidas a procesos de desecación por acción de la evapotranspiración (Vesga, 2000). Para el presente estudio, Rueda realizó ensayos de límite de contracción que alcanzaron valores de 14,7% a 21,6% en arcillas grises con alta oxidación, con humedad natural entre 25,3 y 66,6% y de 21 a 25,3% para arcillas limosas de color habano cuya humedad natural oscila entre 57,9 y 66,5% (Pinto, 2012).

En la medida que el nivel freático va descendiendo, por la succión generada por evapotranspiración, la vegetación tiene más lejos el nivel freático y debe extraer agua de los poros de la arcilla que se encuentra por encima de dicho nivel. De este modo seguirá la disminución del volumen de la arcilla, y se aumenta la posibilidad de propagación de las grietas. Una vez agrietada la arcilla, es difícil que vuelva a recuperar su volumen inicial (Vesga, et. al. 2003).

4.2.4. Características hidrográficas

La Sabana de Bogotá se encuentra en una región del altiplano de altura aproximada a los 2600 msnm; Según Diaz-Granados y Camacho (2012) a medida que se analiza el comportamiento de los ciclos hidrológicos de la región, se obtienen variaciones que presentan una tendencia decreciente en las últimas décadas de la cantidad de agua que cae en algunas zonas, especialmente en las alejadas del cerro; además presentan las relaciones de los fenómenos del calentamiento global con la precipitación, teniendo como consecuencia los fuertes cambios en los periodos de pluviosidad y de sequía, siendo más fuertes y extensos los últimos, lo cual se puede evidenciar en los reportes de las estaciones del IDEAM contenidas en capítulos anteriores, así como también de los mapas de temperaturas anuales y mensuales.

4.3. VEGETACIÓN Y USO DEL SUELO

El comportamiento que posee el suelo se ve estrechamente relacionado por la vegetación que crece en la zona de estudio, lo cual es producto de la temperatura y

climatología, las cuales son las adecuadas además para la agricultura y la ganadería. La vegetación presente en la zona es un elemento importante a considerar en cuanto al uso del suelo, dado que, en las temporadas de sequía, la vegetación foránea fomenta la pérdida de humedad de mismo (Rueda M, y otros, 2012).

4.3.1. Vegetación

Figura 51 Plantaciones de árboles como cercado en la zona de estudio.

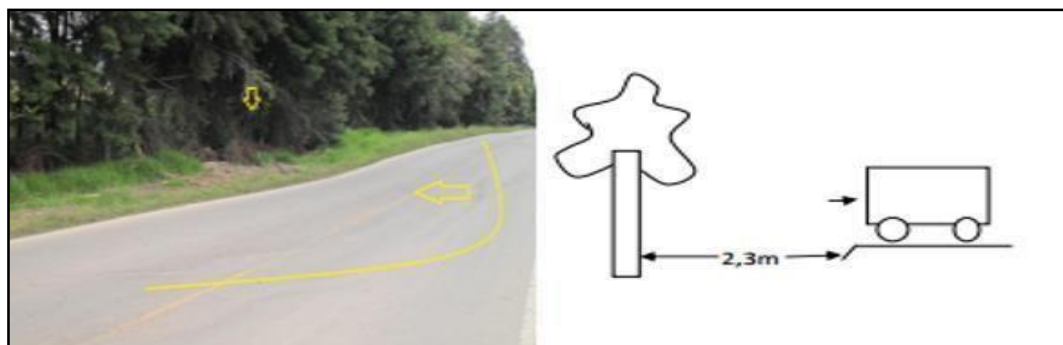


(Orduz, 2017)

En la zona de estudio se evidencia en su mayoría vegetación no nativa de la región, como lo son los pastos; además se presenta pino ciprés, acacias y eucaliptos, los cuales poseen características importantes en la pérdida de agua del suelo por los efectos causados en la evapotranspiración, los cuales generan condiciones inestables del suelo. Esta vegetación posee importantes longitudes y una distribución de raíces que no permiten la conservación de la cantidad de agua en el suelo, por la absorción de agua (Pinto, 2012).

En los estudios realizados por Pineda, Colmenares, Arias y otros autores, demuestran que existe una correlación entre los tipos de árboles de la zona y las patologías en la superficie de la estructura de pavimento; además establecen que en su mayoría las patologías están directamente relacionadas no solo con el tamaño y tipo de árboles plantados en la zona, sino también con la distancia de estos a la estructura del pavimento; ya que en las zonas donde la distancia de la cerca viva al pavimento es mayor y la abundancia de árboles por metro lineal es menor, el pavimento se encuentra en mejor estado (Pinto, 2012).

Figura 52 Cercas vivas de pino ciprés



(Rueda, 2012)

4.3.2. Cultivos

En la Sabana de Bogotá, más exactamente en el occidente de la ciudad, el uso es utilizado para cultivos y plantaciones, los cuales actualmente, con el uso de mecanismos y técnicas diferentes a las utilizadas anteriormente para una mayor productividad requieren una mayor cantidad de agua para el riego y la cosecha de los productos en diferentes meses del año. En el sector desde la producción agrícola, se cuenta con cultivos en invernaderos de flores, hortalizas y otros productos para el consumo, así como pastos para la ganadería, demandan cantidades considerables de agua. Gran parte de la cantidad de agua demandada debe extraerse de pozos mediante los que se logra el abastecimiento, pero que conducen al abatimiento del nivel freático de manera diferencial y más acelerada cerca a los pozos (Pinto, 2012)

4.4. AGUAS SUBTERRÁNEAS

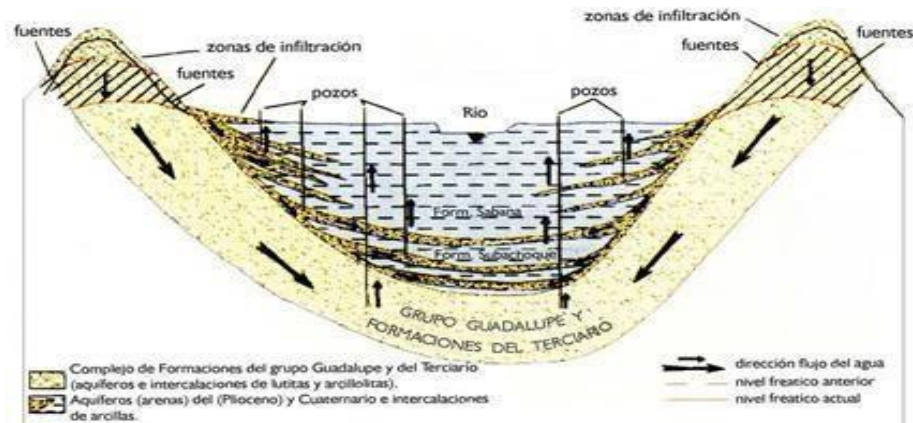
El agua subterránea incluye todo el líquido que proviene de la lluvia y que se ha infiltrado en las fisuras de las rocas solidas del suelo o la recarga de acuíferos (proceso lento que tarda millones de años).

La extracción del agua subterránea es una de las causas de desecación reportadas en las investigaciones que se han realizado; debido a que el agua subterránea que se extrae en la sabana de Bogotá proviene de depósitos permeables de la Formación Sabana, tales como lentes de arena que se encuentran alojados en medio de arcillas de origen lacustre (Loboguerrero, 1992).

Según un estudio del Instituto Colombiano de Minería y Geología (INGEOMINAS, 1992), el complejo acuífero más importante en la Sabana de Bogotá es el Guadalupe,

desde el punto de vista de abastecimiento, el cual está ubicado aproximadamente a 1500 metros de profundidad.

Figura 53 Complejo Guadalupe



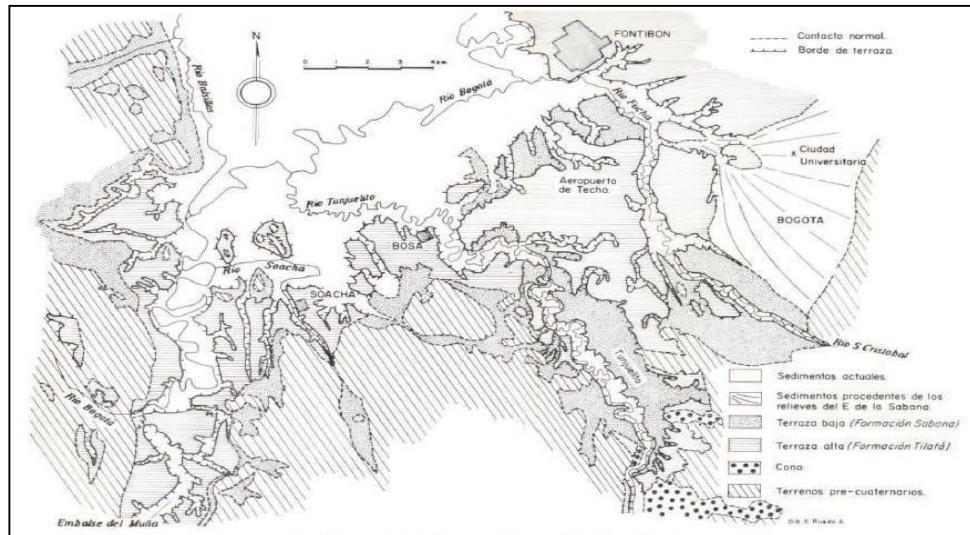
(INGEOMINAS, 2004)

Dentro de la Sabana de Bogotá hay un gran número de pozos perforados y además hay problemas por la explotación de acuíferos en muchas zonas (Loboguerrero, 1992). Según la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca hasta 1990 había 3.672 pozos los cuales tenían una descarga total de 41,6 Mm³/año.

4.5. GEOLOGÍA DEL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTÁ

4.5.1. Geología

Figura 54 Esquema geológico del cuaternario de la zona S de la Sabana de Bogotá



Según el boletín de geología (1961), en el relleno de la Sabana de Bogotá hay que distinguir morfológicamente tres unidades, un sedimento de grandes cantos y bloques de carácter torrencial que en la zona de Usme forma un cono, un relleno lacustre muy espeso que morfológicamente se manifiesta formando una terraza entre los 15 y 5 m; y unos limos en los que en el borde de la Sabana pueden distinguir un nivel rojo inferior, un nivel marrón medio y un complejo de suelos negros superior; este conjunto se encuentra excavado y enlaza morfológicamente con unos limos marrones que forman una terraza entre 4 y 0 m; estos sedimentos constituyen la formación Sabana.

A parte de estas tres unidades cabe citar que los depósitos actuales fluviales o de ciénaga y los suelos actuales, negros, prácticamente iguales al complejo de suelos negros excavados del borde de la Sabana. Desde el punto de vista morfológico hay que señalar la pronunciada inclinación del perfil del conjunto terraza baja – materiales del borde de la Sabana, en contraste con el perfil prácticamente plano de la terraza alta y con el perfil más cóncavo de las quebradas actuales. Como consecuencia la terraza baja se manifiesta bien en los bordes de la Sabana y desaparece en el centro donde se confunde con el fondo actual. Por otra parte, dicha terraza a veces se manifiesta como tal adosada a la terraza alta y más baja que ella, otras veces la corta y en el borde mismo de la sabana se encuentra por encima de ella (Paba, y otros, 1961).

En la zona de estudio en el occidente de Bogotá se tienen dos horizontes principales, los cuales se presentan en el suelo en su estado natural; dicha descripción es la presentada por Vesga, Meza y Caicedo (2002):

- Una capa superficial conformada por suelos orgánicos de unos 20 a 30 centímetros.
- Dos intercalaciones de cenizas volcánicas con un espesor típico de unos 20 a 30 cm la superior de color pardo, y una inferior con espesor de 10 a 20 cm de color amarillo claro.
- Arcillas habanas y grises de diversa consistencia y humedad, pero con tendencia a disminuir de resistencia con la profundidad y a aumentar su humedad en el mismo sentido.

4.5.2. Estratigrafía

La sección levantada por Hoorn en 1988 de la Quebrada el Mochuelo, en el sinclinal de Usme, con espesor de 1.095 metros; el cual está dividido en seis segmentos (INGEOMINAS, 2005):

Segmento A. Son 100 m de rocas de grano fino, los 250 m inferiores están compuestos por secuencias grano crecientes, con la base en areniscas consolidadas y pasan a arcillolitas y limolitas de colores violeta y gris (Hoorn, 1988).

Segmento B. Son 135 m de espesor, las rocas son de grano más grueso que las del segmento A. Se intercalan tres intervalos grano decrecientes desde bancos de areniscas friables de grano medio y fino a arcillolitas; las areniscas presentan estructuras internas como laminación inclinada, paralela y cruzada; en las arcillolitas se presentan concreciones (Hoorn, 1988).

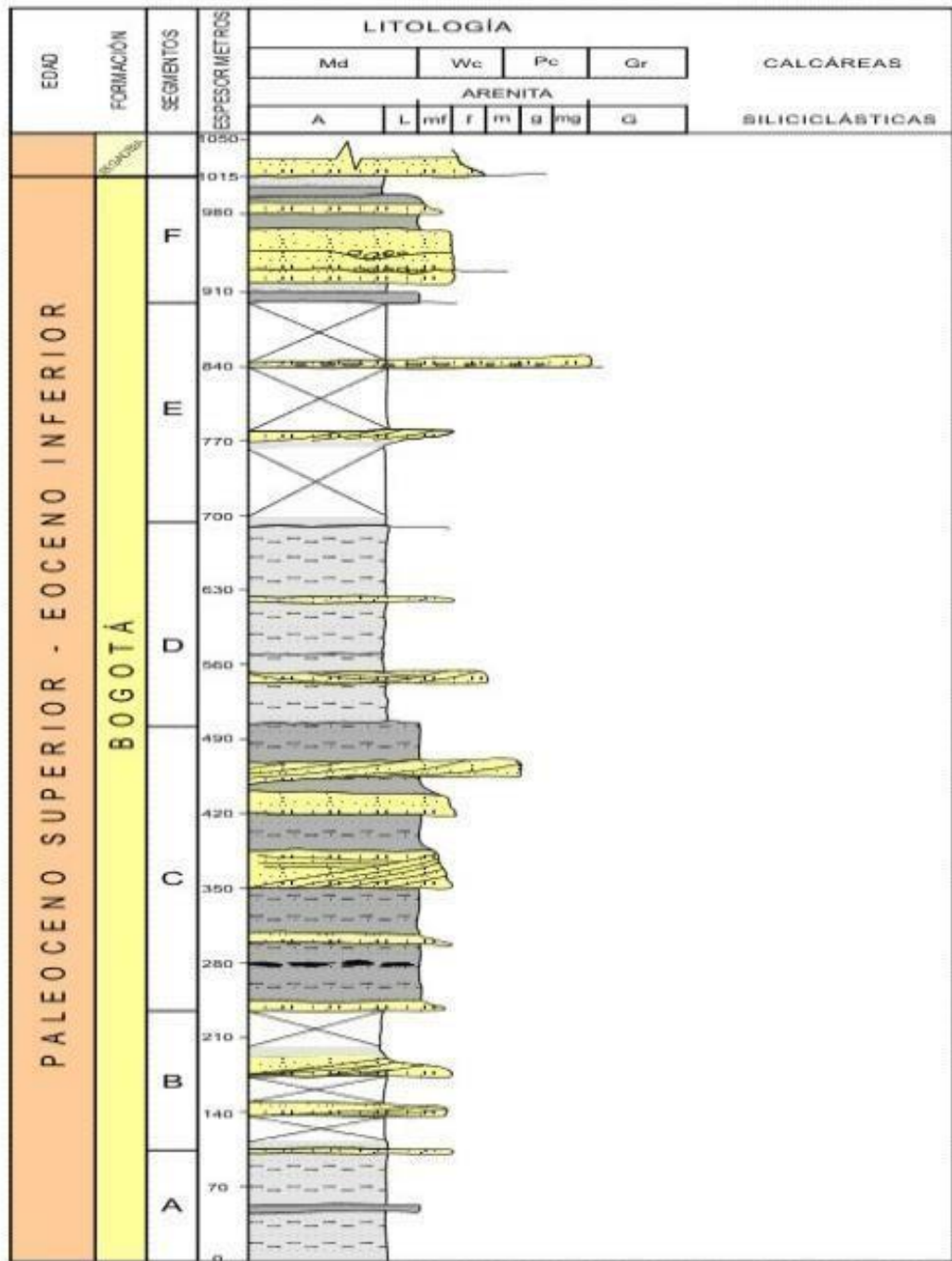
Segmento C. Son 270 m, están representados por intervalos granodecrecientes desde areniscas muy finas a limolitas. Las areniscas son de colores verdes y grises y tienen estratificación cruzada; las limolitas son de colores rojos y violetas, tienen concreciones de arcillolita y niveles de arcillolita negra (Hoorn, 1988).

Segmento D. Le corresponden 195 m. En los primeros 100 m se presentan dos intervalos granodecrecientes, desde arenisca de grano medio a fino a limolitas y arcillolitas, las areniscas presentan estratificación cruzada y paralela y bases erosivas y las arcillolitas y limolitas son de color violeta a gris (Hoorn, 1988).

Segmento E. Son 200 m, en gran parte cubiertos, en la base son secuencias de areniscas de grano medio a fino que decrecen a arcillolitas limosas, es común el desarrollo de estructuras en las areniscas como estratificación cruzada, laminación y canales (Hoorn, 1988).

Segmento F. Con 115 m, la base está representada por bancos de areniscas (10 m) con lentes de gravas y contactos erosivos, estas areniscas gradan de tamaño grueso a muy fino, y tienen laminación cruzada y paralela. Le siguen secuencias grano decrecientes desde areniscas muy finas hasta arcillolitas (Hoorn, 1988).

Figura 55 Formación Bogotá



CONVENCIONES LITOLOGÍA

- | | | | |
|--|--------------|--|--------------------------|
| | Arcillolitas | | Concreciones Limoníticas |
| | Limolitas | | Conglomerados |
| | Arenitas | | Estratificación Cruzada |

(Hoorn, 1988)

4.6. PATOLOGÍAS ASOCIADAS A LA VEGETACIÓN DE LA ZONA

Las patologías que se presentan en la estructura, que están asociadas directamente al agrietamiento de la subrasante, los cuales son producidos por cambios volumétricos inducidos por la acción de las raíces, se presentan a continuación, las cuales son resultados de estudios realizados en la zona de estudio por Pineda, Murillo y Colmenares (Pineda Jaimes, y otros, 2015):

Tabla 16 Fallas Asociadas a la Vegetación de la zona

Tipo de Falla	Nomenclatura	Descripción
Fisuras longitudinales	FL	<p>Son grietas paralelas al eje del pavimento o a la dirección de construcción y pueden ser causadas por:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Una junta de carril del pavimento pobremente construida. 2. Contracción de la superficie de concreto asfaltico debido a bajas temperaturas (inferiores a 2 °C), o al endurecimiento del asfalto durante la construcción, o al ciclo diario de temperatura. 3. Inestabilidad de la subrasante
Fisuras en media luna	FML	<p>Son fisuras con curvatura que separan zonas de niveles diferentes en un tramo vial. Se asocian a la ausencia de confinamiento de la via y a procesos de inestabilidad de la subrasante.</p>
Hundimientos o Depresiones	HUN	<p>Son áreas localizadas de la superficie del pavimento con niveles visiblemente más bajos que el pavimento a su alrededor. En múltiples ocasiones, las depresiones suaves solo son visibles después de las lluvias. Las depresiones son formadas por el asentamiento de la subrasante o por una construcción incorrecta de las capas granulares.</p>
Fisuras en Bloques	FBL	<p>Las grietas o fisuras en lo que son discontinuidades interconectadas que dividen el pavimento en pedazos aproximadamente rectangulares. Las grietas en bloque se originan principalmente por el envejecimiento del asfalto y por la aparición de deformaciones excesivas de la subrasante, en lugares en donde la condición de envejecimiento del asfalto puede ocasionar esta patología.</p>

5. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACION Y CALIFICACION DEL PAVIMENTO

Las patologías que se presentan en el pavimento informan sobre su condición y las causas posibles de la misma. El registro y descripción de los daños de la estructura de pavimento representa una información fundamental en el proceso de evaluación del estado del mismo. Actualmente, se conocen muchos catálogos de los daños que se pueden presentar en el pavimento y además, éstos presentan metodologías para establecer un diagnóstico sobre la patología de los pavimentos, teniendo en cuenta el grado en el que se encuentra; algunos tienen sistemas de calificación cuantitativa del estado del pavimento permitiendo establecer índices, al establecer los tipos de daños se pueden determinar las causas posibles y las soluciones para la condición del deterioro y se pueden jerarquizar de acuerdo con la prioridad de la reparación y con su efecto sobre la comodidad y seguridad para el usuario y sobre el estado del pavimento, lo cual permite planificar los recursos y las soluciones (Bermudez, 2006).

La información obtenida de los registros que se obtienen de campo, permite establecer tramos homogéneos de la vía de acuerdo con el estado del pavimento y la solución de construcción, con esta información es posible calcular las cantidades de obra correspondientes a los trabajos de reparación que se necesite realizar en la estructura (Bermudez, 2006).

Para el proyecto se utilizó la metodología del índice de condición de pavimento, debido a que es la más completa para evaluar y calificar de manera objetiva la estructura de pavimento flexible, esto teniendo en cuenta a que discrimina un mayor número de daños, da un estudio de mayor número de sectores, por ello tiene un mayor detalle para el establecimiento del estado de la estructura y las posibles decisiones para la intervención de la misma (Castaño, y otros, 2004).

5.1. ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO (PCI)

El Índice de Condición del Pavimento (PCI, por su sigla en inglés) se constituye en la metodología más completa para la evaluación y calificación objetiva de pavimentos ya sean flexibles o rígidos. La metodología es de fácil implementación y no requiere de herramientas especializadas (Pinto, 2012).

Esta herramienta fue desarrollada por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos, con el fin de obtener un índice de la integridad estructural del pavimento y de la condición operacional de la superficie de rodadura, la información de los daños da una perspectiva de la causa de los mismos y la relación de estos con las cargas o el clima. Con la herramienta se hace el cálculo del PCI de cada daño de acuerdo a la cantidad y severidad que se evidencien durante el trabajo de campo, en el cual se identifica no solo el daño sino además la clase, severidad y la extensión del mismo (Ospina, 2010).

Los rangos de calificación del PCI están entre 100-85 considerado excelente y 010 como una condición de estructura fallada, teniendo en cuenta que la información de los daños obtenida del método se ve relacionada con diferentes factores de la zona. El manual de daños del PCI incluye la evaluación de la calidad del tránsito para determinar el nivel de severidad de los daños (Ospina, 2010):

- L: (Low: Bajo) se perciben vibraciones en el vehículo, pero no es necesario reducir la velocidad en aras de la comodidad o la seguridad.
- M: (Medium: Medio) las vibraciones en el vehículo son significativas y se requiere alguna reducción de la velocidad en aras de la comodidad y la seguridad.
- H: (High: Alto) las vibraciones en el vehículo son tan excesivas que debe reducirse la velocidad de forma considerable en aras de la comodidad y la seguridad.

Tabla 17 Rangos de Calificación del PCI

RANGOS DE CALIFICACIÓN DEL PCI	
RANGO CALIFICACIÓN	
100 – 85	Excelente
85 – 70	Muy Bueno
70 – 55	Bueno
55 – 40	Regular
40 – 25	Malo
25 – 10	Muy Malo
10 – 0	Fallado

(Ospina, 2010)

Procedimiento de Evaluación de la Condición del Pavimento

Para realizar un levantamiento adecuado de inventarios viales en la red secundaria y parte de la terciaria de los departamentos, inicialmente es necesario a la realización de un trabajo de campo en el cual se identifican los daños, teniendo en cuenta la clase, severidad y extensión de los mismos, para ello es necesario dividir la vía en secciones dependientes del tipo de vía y de la capa de rodadura; posteriormente se procede al cálculo del Índice de Condición de Pavimento, para determinar así el estado de la superficie (Ospina, 2010).

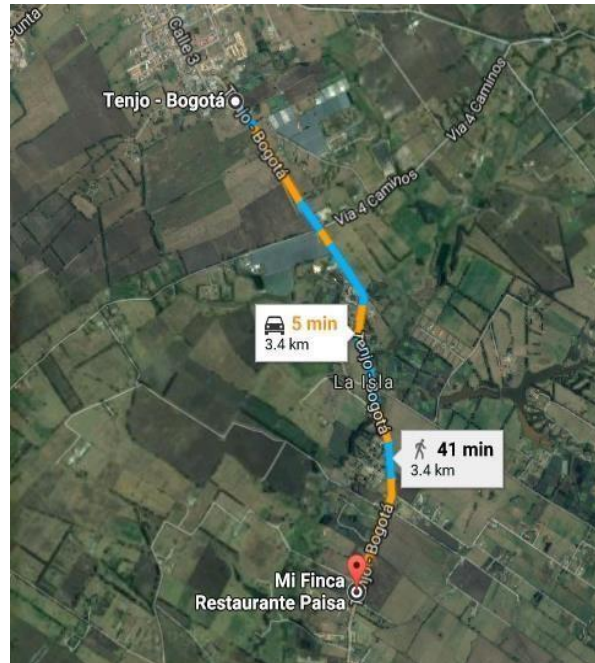
5.2. INSPECCIÓN VISUAL

Una parte importante del presente estudio se realizó en la inspección visual de la superficie de pavimento flexible de la vía en la zona de interés, entre las cuales se obtuvieron mediciones cuantitativas, y se consideraron principalmente los tipos de daños que se asocian a las deformaciones causadas por fenómenos de desecación y de vegetación de la subrasante.

Considerando además de los fenómenos generados por la desecación y la vegetación, se tienen los daños generados por el tránsito, el medio ambiente, el proceso constructivo o de los materiales que determinan las características funcionales y estructurales de la estructura del pavimento y a su vez la condición del mismo.

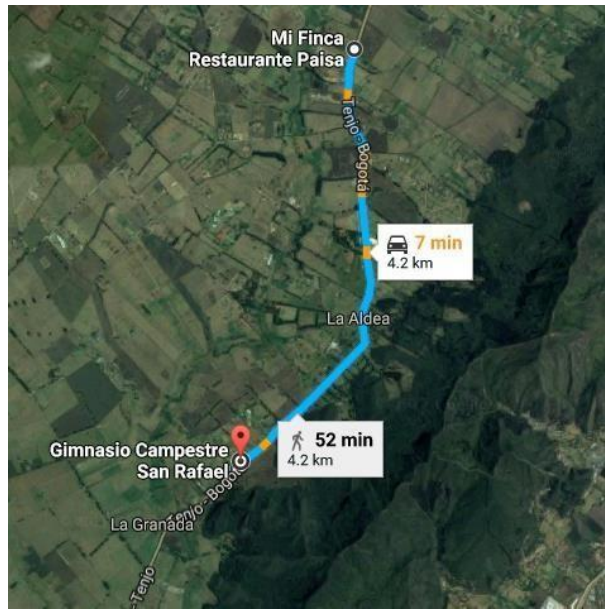
Con el fin de identificar los daños en la estructura de pavimento y determinar de manera aproximada el porcentaje de daños por longitud del pavimento, para lo cual se realizó una inspección visual del pavimento y se registró un inventario manual de los mismos asociados a los diferentes fenómenos ya mencionados, en esta inspección los 12 kilómetros de vía se dividieron en 3 tramos, los cuales tienen longitud aproximada de 4 kilómetros y un ancho de calzada promedio de 6 metros.

Figura 566 Tramo de inspección No. 1



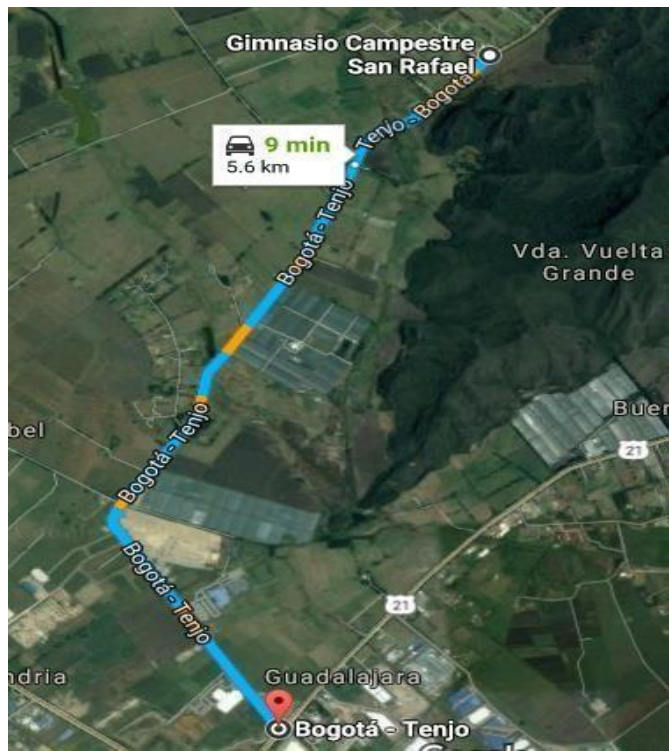
(Google Maps, 2017)

Figura 577 Tramo de inspección No. 2



(Google Maps, 2017)

Figura 588 Tramo de inspección No. 3



(Google Maps, 2017)

El formato utilizado permitió registrar los daños, las dimensiones tales como longitudes, aberturas, profundidades; y se tomaron las distancias que tienen las cercas vivas y arboles a la vía, y se tomó el registro fotográfico (Ver Anexo)

5.2.1. Tramo1

Tabla 18 Tramo 1 de Inspección

TRAMO 1					
K0+000 (Tenjo) - K3+290					
Coordenada Norte			4°52,009"		
Coordenada Oeste			74°08,531"		
Patología	Longitud	Unidad	Profundidad (cm)	Abertura	Unidad
Piel de cocodrilo con bache	3,4	cm ²	12		
Piel de cocodrilo con bache	3,7	cm ²	6		
Hundimiento			7,5		
Bache	20	cm ²	12		
Piel de cocodrilo con bache	107	cm ²	6		
Piel de cocodrilo con bache	2,8	cm ²	17		
Piel de cocodrilo con bache	26	cm ²	13		
Hundimiento			7		
Abultamiento			12		

Hundimiento			6		
Piel de cocodrilo con bache			10		
Fisura Longitudinal				12	mm
Fisura Longitudinal				2	mm
Bache	2,4	cm ²	13		
Pulimiento de agregado	90*63	cm ²			
Bache			5		
Fisura Longitudinal	3,14	cm		3,5	cm
Fisura Longitudinal				1	cm
Fisura Longitudinal	8,9	cm	1		

Hundimiento			4		
Falla de borde				1	cm
Fisura Longitudinal				3	cm
Abultamiento			3,5		
Fisura Longitudinal				2	cm
Hundimiento			6		
Piel de cocodrilo con bache	29,8	cm ²	12		
Bache	1,7*30	cm ²	1		
Fisura Longitudinal				5	mm
Fisura Longitudinal				12	mm
Piel de cocodrilo con bache			5		
Bache			12		
Abultamiento			1,5		
Fisura longitudinal				1	cm
Fisura longitudinal				3	mm
Bache			6,5		
Bache			7,2		
Fisura longitudinal				1	cm
Bache			4,5		
Fisura longitudinal				5	mm
Hundimiento			9		
Bache			5		
Piel de cocodrilo con bache	35,7	cm ²			
Fisura de borde				3	cm
Abultamiento				1	

Fisura Longitudinal				2	cm
Bache			7		
Hundimiento			7		
Fisura Longitudinal				8	mm
Hundimiento			8,5		
Bache			9		
Abultamiento			2		
Fisura Longitudinal				1,2	cm
Hundimiento			8		
Bache			4		
Bache			5		
Fisura de borde				3	cm
Abultamiento			1		
Abultamiento			2		
Hundimiento			13		

(Autor, 2017)

5.2.2. Tramo 2

Tabla 19 Tramo 2 de Inspección

Tramo 2							
K3+290 - K7+300							
Coordenada Norte				4°50,316"			
Coordenada Oeste				74°08,031"			
Patología	Longitud	Unidad	Profundidad (cm)	Distancia del árbol a la vía (cm)	Abertura	Unidad	largo (cm)
Piel de cocodrilo con bache	18	m ²					
Abultamiento			5				
Piel de cocodrilo con bache	38*108	cm ²	2				
Fisura longitudinal					3	mm	220

Hundimiento			3	150			
Piel de cocodrilo	26,6	m ²					
Piel de cocodrilo con abultamiento	28	m ²	5				
Bache	44*70	cm ²	2				
Abultamiento			2				
Bache	68*63	cm ²	4				
Piel de cocodrilo con abultamiento			1				
Piel de cocodrilo con hundimiento			7				
Fisura longitudinal					0,5	cm	630
Fisura de borde					1	cm	305
Hundimiento			7	286			
Hundimiento			8	286			
Abultamiento			2				
Hundimiento			7	286			
Hundimiento			2				
Piel de cocodrilo con abultamiento	40,4	m ²	3				
Piel de cocodrilo con hundimiento			5				
Hundimiento			4	97 (cuneta)			
Fisura longitudinal					4	mm	440
Fisura longitudinal					3	mm	
Piel de cocodrilo con abultamiento			1				
Hundimiento			3	77 (cuneta)			
Piel de cocodrilo con abultamiento			1	223			
Fisura de borde					1,5	cm	332
piel de cocodrilo con bache	22,4	m ²	5	110			
Fisura longitudinal					1	cm	103
Fisura de borde					2,5	cm	215
Fisura longitudinal					5	mm	127
Hundimiento			7				
Bache	69*98	cm ²	5				
Hundimiento			4	170			
Piel de cocodrilo con hundimiento			10	200			
Piel de cocodrilo	24,3	m ²					
Fisura de borde					4	cm	
Piel de cocodrilo con hundimiento			6	169			
Piel de cocodrilo con hundimiento			14	150			

Fisura longitudinal					1	cm	60
Piel de cocodrilo con hundimiento			10	5			
Hundimiento			8	240			
Fisura de borde					4	mm	136
Hundimiento			10	180			
Hundimiento			7				
Hundimiento			9				
Bache	50*53	cm ²	5				
Hundimiento			7				
Fisura longitudinal					4	mm	650
Hundimiento			8				
Hundimiento			14	360			
Bache	63*47	cm ²	10				
Abultamiento			2,5				
Hundimiento			6				

(Autor, 2017)

5.2.3. Tramo 3

Tabla 20 Tramo 3 de Inspección

Tramo 3						
K7+300 - K12+000						

Coordenada Norte			4°48,210"			
Coordenada Oeste			74°08,671"			
Patología	Longitud	Unidad	Profundidad (cm)	Abertura	Unidad	largo (cm)
Hundimiento			5			
Abultamiento			1,5			
Fisura longitudinal				3	mm	498
Fisura de borde				3	mm	654
Hundimiento			5			
Hundimiento			3			
Hundimiento			7			
Fisura de borde				6	mm	370

Hundimiento			8			
Hundimiento			4			
Fisura longitudinal				1	cm	1330
Abultamiento			12			
Fisura de borde				5	mm	
Bache	43*54	cm	5			
Abultamiento			10			
Hundimiento			8			
Abultamiento			9			
Hundimiento			5			
Abultamiento			9			
Abultamiento			12			
Hundimiento			6			
Hundimiento			11			
Abultamiento			11			
Abultamiento			16			
Abultamiento			13			
Abultamiento			13			
Hundimiento			16			
Fisura de borde						180
Hundimiento			12			
Fisura de borde				5	mm	520
Fisura de borde				1	cm	373
Abultamiento			10			
Abultamiento			9			
Fisura de borde				6	mm	606
Piel de cocodrilo	19,4	cm2				

(Autor, 2017)

5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizada la revisión bibliográfica, la inspección visual y el catalogo del manual de daños de INVIAS, se procedió al análisis de las patologías encontradas, así como la asociación de las mismas a la desecación, vegetación, a aspectos ambientales y geológicos; una vez obtenida dicha relación se pudo hacer un análisis de la incidencia de estas patologías en la funcionalidad de la zona de estudio y la seguridad del usuario.

Tabla 21 Porcentajes por tipo de daño

Daño	TRAMO (cm)			LONGITUD TOTAL DEL DAÑO	Porcentaje por Tipo de Daño (%)
	1	2	3		
1. Hundimiento	63,00	156,00	99,00	318,00	4,26
2. Fisura Longitudinal	26,40	2.230,00	1.828,00	4.084,40	54,69
4. Bache	143,20	28,00	5,00	176,20	2,36
5. Abultamiento	23,00	22,50	125,50	171,00	2,29
7. Fisura de borde	4,00	988,00	1.727,00	2.719,00	36,41
				7.468,60	100,00

(Autor, 2017)

En la tabla No. 21 se relacionan el total de los daños, discriminándolos por el tipo de patología por tramo y la totalización de los mismos, por lo cual se puede hacer la apreciación que el tramo que tiene menores daños es el tramo No. 1.

Los datos que se muestran en la columna de porcentaje, corresponden al porcentaje que representa el daño respectivo sobre la totalidad de los daños evidenciados a lo largo de la vía.

Las fisuras longitudinales y las fisuras de borde constituyen los porcentajes mayores de daño en la vía, esto debido a que a lo largo de la vía estas fisuras junto a la piel de cocodrilo son las más visibles; pero además esto debido a que las fisuras se asocian a las contracciones de la superficie por las bajas temperaturas, la ausencia de confinamiento de la vía o a la inestabilidad de la subrasante; este último relacionado con que la subrasante son suelos arcillosos desecados, que como se ha descrito en el presente trabajo de investigación en capítulos anteriores contribuye a que el suelo pierda continuidad.

Figura 59 Grieta de Borde



En su mayoría las grietas de borde evidenciadas corresponden a grietas paralelas al borde de la vía; en la figura 59 se evidencia la distancia correspondiente desde el borde del pavimento hasta la fisura es en promedio de 40 cm, en los cuales en su mayoría se encuentra la presencia de árboles ciprés al lado de la vía.

Tabla 22 Porcentajes de daños (Desección)

<i>Daño</i>	TRAMO (cm)			LONGITUD TOTAL DEL DAÑO	Porcentaje por Tipo de Daño (%)
	1	2	3		
<i>1. Hundimiento</i>	63,00	156,00	99,00	318,00	10,47
<i>7. Fisura de borde</i>	4,00	988,00	1.727,00	2.719,00	89,53
				3.037,00	100,00

Los hundimientos presentes a lo largo de la vía oscilan con profundidades hasta los 15 cm, de los cuales los de mayor profundidad y que se presentan de manera mas repetitiva se evidenciaron en el tramo 2, la mayoría de los hundimientos presentados se evidencian en zonas donde la cerca viva de vegetación es abundante, y en su mayoría la presencia de los arboles de gran altura como se detalló en capítulos anteriores de este proyecto.

El porcentaje de daño presentado en la tabla 22 hace referencia al porcentaje que representa el daño respectivo sobre la totalidad de los daños de desección. Se puede evidenciar que el mayor porcentaje lo tienen las fisuras de borde, ya que presentan longitudes amplias, las cuales son más grandes cuando la cerca viva de vegetación esta presente a menos de 20 cm de la vía aproximadamente.

5.3.1. Relación de patologías con aspectos ambientales, geológicos o de uso del suelo

Teniendo en cuenta los estudios en los que se basó el presente proyecto, se pudieron relacionar los hundimientos y las fallas de borde con los aspectos geológicos debido a:

- Los hundimientos de mayor medida se encontraron en las zonas donde se presenta cerca viva en ambos lados de la vía, dicha cerca viva es en su mayoría de árboles de más de 20 metros de longitud, con separaciones entre los 15 y 33 centímetros.
- La vegetación que se presenta en su mayoría es vegetación no nativa, los cuales se encuentran con una separación muy pequeña entre ellos, y como se pudo explicar en capítulos anteriores, las raíces de los mismos son grandes, por lo cual necesitan un área de proliferación radial mayor que la que poseen, que en épocas de sequía empeora debido a la cantidad de agua que deben absorber.
- En las zonas en las que más se presentan fallas de borde y fisuras longitudinales es en el tramo 1, en el cual hay evidencia de tramos de más de 1 kilómetro en el cual el eucalipto está a ambos lados de la vía
- Teniendo en cuenta el Manual de Inspección de Pavimento Flexible del INVIAS, se tiene la percepción de abultamientos en muchas zonas de la vía, de los cuales según la misma son causados en su mayoría por expansiones de la subrasante, la mayoría de las zonas donde se presenta esta patología se observan arboles a menos de 2 metros de la vía los cuales tienen una altura aproximada de 30 metros, los cuales son en su mayoría pinos que por su naturaleza requieren grandes volúmenes de agua, lo que hace que la subrasante por las raíces este en continuos cambios volumétricos.

Las características que presenta la proliferación de fisuras de borde de aproximadamente 2.700 cm a lo largo de la vía y la piel de cocodrilo por los estudios realizados en el INVIAS y materializados en el manual son debidos principalmente por los aspectos ambientales, es decir, los cambios de clima a los que puede estar afectada la estructura de pavimento; estas patologías están debidas a los cambios que sufre la carpeta asfáltica en las zonas de sequía y de alta pluviosidad, teniendo

en cuenta además que la vegetación no nativa requiere grandes cantidades de agua, lo cual produce en la carpeta una mayor sequía y por ende una reagudización de la misma; pero también cabe señalar que la piel de cocodrilo está dada además por la fatiga de la carpeta esto debido a la pérdida de aceites que originan la rigidización del material, lo que trae consigo la pérdida de flexibilidad del mismo.

Durante la inspección visual, se notó que la piel de cocodrilo y las fisuras de bloque se encuentran en áreas extensas, las cuales son de longitud aproximada de 50 metros, las cuales no fue posible reportar en su totalidad, por los efectos del tránsito sobre la vía, ya que la extensión de la patología en su mayoría era del ancho de la calzada como se puede observar a continuación.

Figura 609 (a) Piel de cocodrilo (Autor, 2017) y (b) combinación de daños



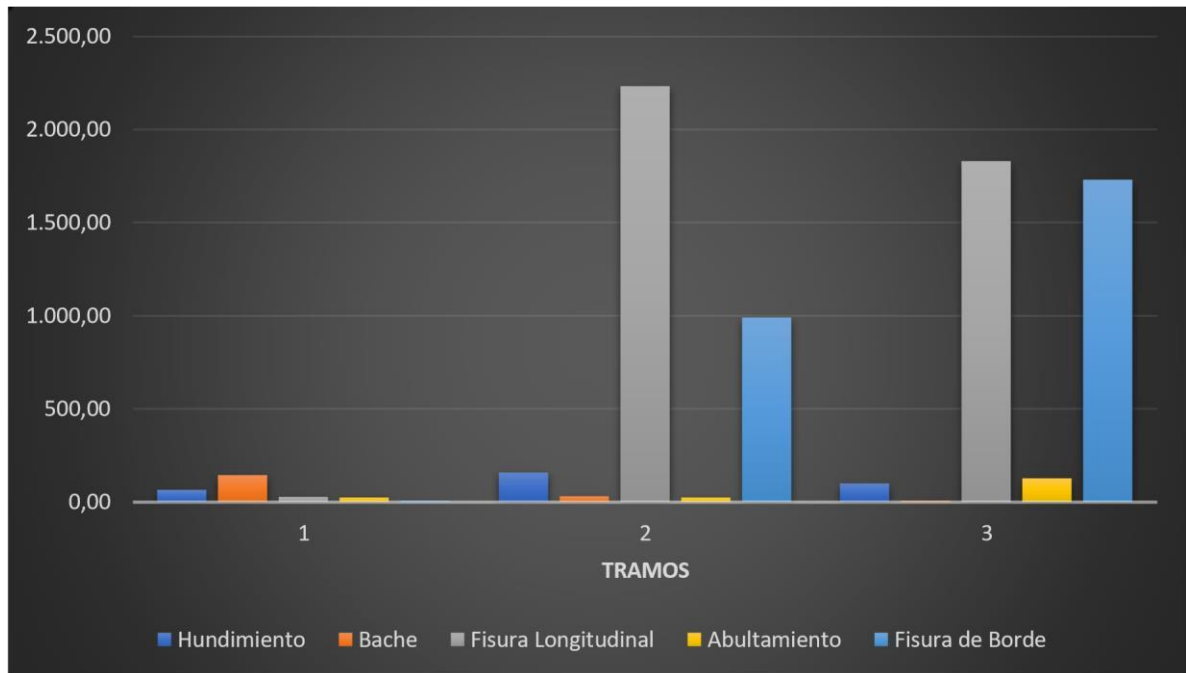
(a)

(b)

(Rueda, 2012)

5.3.2. Incidencia de las patologías en la zona de estudio

Tabla 23 Relación de Patologías por Tramos



(Autor, 2017)

La vía de Siberia a Tenjo es una vía secundaria, la cual es una de las más utilizadas para los usuarios de los municipios dirigirse a la ciudad de Bogotá, ya sea por motivos de trabajo o estudio; además en la vía se tienen varios restaurantes y lugares de recreación y concentración de personas.

En la inspección visual se observó una carga vehicular importante y permanente en la vía, así como también la circulación de vehículos de carga, los cuales también influyen en los daños que se presentan en la vía; además se pudo notar que debido a la cantidad de vehículos y en nivel de daños que se presentan en la vía se forman trancones extensos, los mismos con el fin de evitar los daños o sobrepasarlos a una velocidad en la que se manifieste la seguridad y comodidad del usuario.

Las mediciones tomadas en la vía de cada patología nos reflejan una estimación del nivel de serviciabilidad en el que se encuentra, en la cual la mayoría de las patologías se encuentran en rangos de medio a alto, lo que nos lleva a definir y establecer el nivel de servicio E, el cual representa un nivel bajo, que debido a las patologías la velocidad se ve regulada en función de los vehículos precedentes y se da la formación de colas en puntos localizados, siendo esta de aproximadamente 50 a 55 Km/h.

6. CONCLUSIONES

- El tramo vial en estudio, se dividió en primera medida debido a la extensión de la misma, y en segunda medida por la magnitud y repetición de las patologías, esto en consecuencia de la cercanía y los tipos de la vegetación que se encuentran en diferentes puntos de la vía.
- La desecación que se presenta en el Occidente de la Sabana de Bogotá y la contracción volumétrica de la misma son causadas por las pérdidas de humedad de los suelos arcillosos, esto por la presencia de vegetación que no es nativa de la zona, las cuales realizar un proceso de succión mayor al que el suelo es capaz de ofrecer, estos factores influyen de manera directa sobre el desempeño de la estructura a lo largo de la vida útil.
- En la inspección visual se reportaron datos de las patologías encontradas, tanto por factores de desecación como las que se deben a la vegetación y a los cambios de clima, dentro de los cuales las más influyentes y que causan un peligro mayor la funcionalidad de la vía son los hundimientos y abultamientos, debido a que tienen medida hasta los 15 cm de profundidad.
- La desecación está relacionada directamente con los balances hídricos negativos, es decir, la evapotranspiración presente es mayor a la precipitación que se presenta anual en la zona; además la disminución del nivel de los acuíferos por la explotación continua de agua subterránea, lo cual repercute en la estabilización del nivel freático.
- Cuando se presentan suelos arcillosos afectados, localizados sobre el nivel freático, como es el caso de la zona de estudio se presenta una presión de succión, lo cual origina agrietamiento del material y pérdida de continuidad del mismo, lo cual se está presentando en gran medida por la presencia de árboles y vegetación no nativa, excesiva evapotranspiración (descenso del nivel freático) o la extracción de agua subterránea de la Formación Sabana. Dichos suelos en los cuales se tiene inmerso un problema de desecación debido a la combinación de efectos físicos y químicos la succión total será mayor a mayor pérdida de humedad, lo cual induce a la pérdida de continuidad del suelo.

- La vegetación de la franja altoandina y andina tienen una gran influencia con los cambios volumétricos que se presentan en la estructura, debido a que estas poseen raíces más grandes y profundas con separaciones muy pequeñas, lo cual hace que la presión de succión sea mayor al igual que los esfuerzos efectivos del suelo; esta condición aumenta en épocas de sequía. Dentro de la vegetación que más demanda agua en el sector es el eucalipto ya que posee un poder radicular, absorción y almacenamiento de agua
- En la zona de estudio se evidenció desplazamiento de vehículos de carga con productos cultivados de la zona y además de ello se evidenció que estos vehículos transitan de manera frecuente en la zona, por lo cual se encuentra una cantidad de vehículos considerable ya sea por comunicación de municipios, los restaurantes que están presentes a lo largo de la vía, las zonas de recreación y reunión de las personas de los alrededores de la vía; esta alta densidad de vehículos implica una carga sobre la estructura de pavimento mayor que para la cual fue diseñada; no se realizó un aforo de tránsito debido a que no hace parte de los objetivos de este trabajo, por lo cual este es un dato visual.
- Zonas en las cuales se evidencian múltiples patologías los vehículos deben reducir notablemente la velocidad para evitar un accidente, lo cual puede determinarse con las velocidades cuando la vía se encontraba en buen estado y ahora con las patologías; este hecho se evidenció igualmente en la rehabilitación de la vía en el 2012 donde la velocidad de los vehículos con la vía rehabilitada era de aproximadamente de 25 minutos (ICCU, 2012), hoy en día la velocidad promedio está en aproximadamente de 35 a 40 minutos, tiempo en el cual también repercuten los trancones en dichos tramos.
- Las patologías que se evidenciaron en la vía como se muestra en las tablas de inspección son en su mayoría combinadas, entre las cuales empiezan en su mayoría con fisuras en bloque o piel de cocodrilo, y con el tiempo generando baches, desprendimientos de material y hundimientos, lo que representa un peligro mayor para los usuarios.
- Las patologías de fisuras de bloque y piel de cocodrilo se encuentran de manera muy representativa a lo largo de la vía, de las cuales la mayoría se evidencian con desprendimiento de la carpeta de rodadura, lo cual conlleva a la formación de baches.

- Durante la última inspección a la vía, en el tramo 3 se evidenció la construcción de una sobrecarpeta de aproximadamente 1.5 kilómetros, en el cual se pudo observar por el perfil de la misma que no se realizó ningún tipo de tratamiento a las patologías que se presentaban, por el contrario se hizo un relleno de las mismas con el material asfáltico sin tener en cuenta el tipo de patología que se presentaba, mucho menos la posibilidad de que a largo plazo estas patologías se reflejen en la superficie de la sobrecarpeta colocada.
- A pesar de que con respecto a los demás daños los hundimientos y abultamientos no poseen un porcentaje considerable son de profundidades muy grandes dentro de las cuales la inclinación de los vehículos al pasar con poca velocidad es muy notoria. Fue necesario establecer el porcentaje entre los hundimientos y las fisuras de borde que son las que hacen referencia al proceso de desecación obteniendo que un 10,47% corresponde a los hundimientos y un 89,53% a las fisuras de borde, esto debido a que simultáneamente en la inspección se observaron un hundimiento y fisuras de borde a distancias de menos de 10 metros uno del otro.

7. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Debido a la inspección visual presentada en el presente proyecto y en investigaciones presentadas por otros autores, es necesario tener una aproximación a la naturaleza de la vegetación, debido a que este es uno de los factores principales de la desecación en la zona por los cambios volumétricos, los cuales aceleran la aparición de patologías por carga o procesos constructivos. Con el fin de contribuir al mantenimiento preventivo de las patologías es necesario ahondar en temas como:

- Tratamiento de la estructura mediante alternativas de refuerzo.
- Estudio de la vegetación no nativa de la zona, con influencia en las proximidades a la vía.
- Diseño alternativo de estructuras de pavimento sobre subrasantes con problemas de desecación en suelos arcillosos.
- El fenómeno de la desecación es una condición que no es posible tratar ni controlar; por lo cual es necesaria la implementación de un mecanismo que contribuya a convivir con la desecación generando el menor daño posible en las estructuras.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, Alexis, y otros. 2012.** *Condiciones que debe tener un buen pavimento.* Peru : s.n., 2012.
- Acuña, William. 2012.** *Pavimentos Rígidos.* Bogota : s.n., 2012.
- ALEGSA. 2015.** Argilita (roca). *Definiciones.* [En línea] 23 de Febrero de 2015. [Citado el: 28 de Agosto de 2017.] <http://www.definicionesde.com/Definicion/de/argilita.php>.
- Bahamondes, Rodrigo, Echaveguren, Tomás y Vargas Tejada, Sergio. 2013.** *Análisis de métodos de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón.* Santiago de Chile : Revista de la construcción, 2013.
- Barrera, Pablo Javier. 2007.** Elementos estructurales de un pavimento. *Geocities.* [En línea] 30 de septiembre de 2007. [Citado el: 27 de 08 de 2017.] <http://www.geocities.ws/pablojavierbarrera/pav.html>.
- Bermudez, Viviana Ceron. 2006.** *Evaluación y comparación de metodologías vizir y pci sobre el tramo de vía en pavimento flexible y rígido de la vía: museo quimbaya - CRQ armenia quindío (PR00+000 - PR02+600).* Manizales : Universidad Nacional de Colombia, 2006.
- Castaño, L y Galeano, J. 2004.** *Comparación de las metodologías VIZIR, PCR y PCI en la evaluación de tramos de pavimento de la vía Manizales - La Siria - Chinchina. Tesis de maestría.* Manizales. Colombia : Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- Chang, Carlos M. 2014.** Pavimentos Rígidos y Flexibles. *Vialidad y Transporte Latinoamericano.* [En línea] 2014.
- Chang, Carlos. 2014.** Vialidad y transporte. *Pavimentos rígidos versus flexibles.* [En línea] 2014. <http://vialidadytransporte.com/noticia/17-pavimentosrigidosversus-flexibles-mitos-realidades>.
- CMT. 2000.** *Características de los materiales.* Bogotá : Calidad de materiales asfálticos, 2000.
- Cruz, Michael. 2017.** Vía a Tenjo, todo un dolor de cabeza. *El Tiempo.* 30 de Enero de 2017.
- Duarte, Ender Jhobany Orduz. 2017.** *Simulación de una estructura de pavimento apoyada e una subrasante arcillosa fracturada por desecación. estudio de aplicación en vías de la sabana del occidente de bogotá.* Bogotá :

Universidad Santo Tomas, 2017.

EPSA-LABCO. 2013. *Guía para el diseño de vías de alto volumen.* s.l. : adocem, 2013.

Fonseca, Alfonso Montejo. 2002. *Ingeniería de pavimentos.* Bogota : Universidad Católica de Colombia, 2002. ISBN: 9589603629.

Gonzales, Alejandra Montillo. 2012. *Petrología de rocas detríticas.* Sonora : UNISON, 2012.

Gonzales, Pedro. 2013. Pavimento Flexible. *Instituto universitario politecnico Santiago Nariño.* [En línea] 23 de Octubre de 2013. [Citado el: 03 de Septiembre de 2017.] [https://es.slideshare.net/jesus_iupsm/diapositivas-depavimentoflexible.](https://es.slideshare.net/jesus_iupsm/diapositivas-depavimentoflexible)

Grisales, James Cardenas. 2013. *Diseño geométrico de carreteras.* Bogota : ECOE, 2013. ISBN: 9789586488594.

—. **2013.** *Diseño geométrico de carreteras.* Bogota : ECOE, 2013.

Hoorn, K. 1988. *Quebrada del Mochuelo, type locality of the Bogotá formation: a sedimentological, petrographical and palynological study.* Amsterdam : Hugo de Vries Laboratory, Amsterdam, 1988.

ICCU, Instituto de Infraestructura y Concesiones. 2012. *Via Siberia - Tenjo.* Bogota D.C. : El Tiempo, 2012.

IDEAM. 2014. *Tiempo y Clima.* Colombia : Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2014.

IDU, Convenio UNAL -. 2005. *Convenio Universidad Nacional de Colombia.* Bogota : Universidad Nacional de Colombia, 2005.

INGEOMINAS. 2010. *Distribución de los rangos de evapotranspiración en la Sabana de Bogotá.* Bogotá D.C : s.n., 2010.

—. **2005.** *Geología de la Sabana de Bogotá.* Bogotá : Subdirección de Geología Básica, 2005.

—. **2000.** *Mapa hidrogeológico de la sabana de Bogotá.* Bogotá : s.n., 2000.

INVIAS. 2006. *Especificaciones generales de construcción de carreteras. Capítulo 3.* Bogotá : INVIAS, 2006.

—. **2006.** *Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles.* Bogotá D.C : Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá , 2006.

- Jaimes, Jorge Arturo Pineda. 2013.** *Algunas Patologías de Pavimentos Flexibles Sobre Suelos Arcillosos Fisurados.* Mexico : s.n., 2013.
- Julivert, Manuel. 1963.** *Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogota y los mecanismos de formación de las estructuras.* Santander : Universidad de Santander. BOLETÍN DE GEOLOGÍA, 1963. Núm. 13-14 (1963).
- LanammeUCR. 2012.** *Manual de auscultación visual de pavimentos.* Costa Rica : Universidad de costa rica, 2012.
- Lim, D y Shackel, B. 2003.** *Mechanism of Paver Interlock.* Santiago de Chile : 7th International Conference on Concrete Block Paving, Tel Aviv, 2003.
- Loboguerrero, A. 1992.** *Geología e hidrología de Santafé de Bogotá y su Sabana.* Bogotá : VII Jornadas geotécnicas de la Ingeniería Colombiana, 1992.
- Mejía, Adela Nagore. 2012.** *Rocas sedimentarias.* Bogotá : s.n., 2012.
- Menéndez, Juan Luis. 2014.** Asturnatura. *Limonita.* [En línea] 24 de Diciembre de 2014. [Citado el: 28 de Agosto de 2017.] <https://www.asturnatura.com/mineral/limonita/812.html>.
- Merino, A y Marínez Cortizas, A. 1991.** *Propiedades de los suelos desarrollados sobre argilitas de Gipuzkoa.* España : MUNIBE , 1991.
- Miranda, Cecilia Caballero. 2012.** *Identificación y clasificación de rocas clásticas.* Mexico : UNAM, 2012.
- Miranda, Juan Carlos. 2012.** *Inspección de pavimentos - Método PCI.* Chile : Universidad de Chile, 2012.
- Olivares, Javier Paul Morales. 2005.** *Técnicas de rehabilitación de pavimentos de concreto.* Peru : Universidad de Piura, 2005.
- Ordoñez, Jorge Alberto Rodríguez. 2015.** *ANÁLISIS DE INTERACCIÓN SUELO O ESTRUCTURA PARA REFUERZO DE SUELOS FISURADOS.* 2015.
- Osorio, Santiago. 2012.** *Diseño racional en ingeniería geotécnica. Apuntes de geotecnia con énfasis en laderas.* [En línea] 14 de Noviembre de 2012. [Citado el: 27 de Agosto de 2017.] http://geotecniasor.blogspot.com.co/2012/11/eldisenoracional-en-la-ingenieria_8.html.
- Otero, Alberto Villarino. 2012.** *Materiales bituminosos.* Avila : Escuela Superior Politécnica de Avila, 2012.

Paba, F. y Hammen, Th. Van Der. 1961. *Boletín de Geología*. Bucaramanga, Colombia : Departamento de Geología de la Facultad de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander, 1961.

Pardo, Sebastian Alberto Rivera. 2014. *CARACTERIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DESECADOS AL OCCIDENTE DE LA SABANA DE BOGOTA*. Bogota : s.n., 2014.

Pavimentos rígidos y flexibles. **Chang, Carlos M. 2014.** Peru : Vialidad y transporte latinoamericano, 2014, Vol. 17.

Perlman, Howard. 2017. Agua Subterránea. *La ciencia del agua*. [En línea] 29 de Agosto de 2017. [Citado el: 31 de Agosto de 2017.] <http://water.usgs.gov/gotita/earthgw.html>.

Pineda Jaimes, J.A y Colmenares Montanez, J. E. 2000. *Influencia de la desecación en el comportamiento volumétrico de la arcilla de Bogotá*. Bogotá D.C : Universidad Nacional de Colombia, 2000.

Pineda Jaimes, Jorge Arturo, Murillo Feo, Carol Andrea y Colmenares, Juan Esteban. 2015. *Caracterización de patologías asociadas a la acción de especies vegetales en una vía al occidente de la sabana de Bogotá*. Bogotá D.C, Colombia : EPSILON, 2015. págs. 39-68. ISSN 1692-1259.

Pineda Jaimes, Jorge arturo, Murillo Feo, Carol Andrea y Colmenares, Julio Esteban. 2012. *Caracterización de patologías asociadas a la acción de especies vegetales en una vía al occidente de la sabana de Bogota*. Bogota : s.n., 2012.

Pineda, Jorge Arturo. 2014. *RELACIONES SUCCIÓN-HUMEDAD Y COMPORTAMIENTO VOLUMÉTRICO DE ARCILLAS LACUSTRES FISURADAS POR DESECACIÓN*. Habana : Convencion científica de Ingeniería y Arquitectura, 2014.

Pinto, Monica Yasmin Rueda. 2012. *ESTADO DEL ARTE DE LA PROBLEMATICA ASOCIADA A DESECACION EN PAVIMENTOS EN LA ZONA OCCIDENTAL DE LA SABANA DE BOGOTA*. Bogota : s.n., 2012.

Rattia, Jorge. 2014. *Capitulo 2: Generalidades y definiciones sobre los pavimentosq*. Bogotá D.C, Colombia : s.n., 2014.

Rico y del Castillo. 1984. *Fallas en pavimentos flexibles*. Zacatenco : Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, 1984.

Rodriguez, Juan Carlos Garzon. 2011. *Evaluación de asentamientos por consolidación generada por descenso del nivel nivel freático*. Bogota D.C. Colombia : Universidad Nacional de Colombia, 2011.

- Rondón Quintana, Hugo Alexander y Reyes Lizcano, Fredy Alberto. 2007.** Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. [En línea] 17 numero 02, 02 de Diciembre de 2007. [Citado el: 03 de Septiembre de 2017.] <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91117204>. ISSN: 0124-8170.
- Rueda M, Y y Pineda, A. 2012.** *Patologías asociadas a fenómenos de desecación en pavimentos flexibles del occidente de la sabana de Bogotá*. Bogotá, Colombia : Universidad Santo Tomás, 2012.
- Rueda Pinto, Monica Yasmin y Pineda Jaimes, Jorge Arturo. 2011.** *Patologías asociadas a fenómenos de desecación en pavimentos flexibles del occidente de la Sabana de Bogota*. Bogota : ResearchGate, 2011.
- Sanchez, Javier. 2010.** *Evapotranspiración*. Salamanca : Universidad de Salamanca, 2010.
- Sandoval, Simon. 2009.** Obras civiles. *Pavimentos articulados*. [En línea] 27 de 04 de 2009. <http://udesobrasciviles.blogspot.com.co/2009/04/pavimentosarticulados.html>.
- Schlumberger. 2017.** *Lutita*. s.l. : Oilfield Glossary, 2017.
- Sotelo Penagos, Cristian Camilo y Campos Piñeros, Johan Sebastian. 2017.** Lodolitas, características y uso en la Ingeniería. *Geología-Lodolits*. [En línea] 24 de Febrero de 2017. [Citado el: 27 de Agosto de 2017.] <https://es.scribd.com/document/344267511/GEOLOGIA-LODOLITAS>.
- Tenorio, Ruth Cardenas. 2000.** *Sección típica de un pavimento flexible*. Brasil : Instituto tecnologico de aeronautica, 2000.
- Valencia, Julian Pinilla. 2007.** *AUSCULTACIÓN, CALIFICACIÓN DEL ESTADO SUPERFICIAL Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA CARRETERA SECTOR PUENTE DE LA LIBERTAD – MALTERIA DESDE EL K0+000 HASTA EL K6+000*. Manizales : Universidad Nacional de Colombia, 2007.
- Valenzuela, Mariana. 2003.** *El asfalto, en la conservación de pavimentos*. Valdivia, Chile : Universidad Austral de Chile, 2003.
- Varlan, Horia. 2017.** *Pavimentos flexibles*. Sevilla : Urbanismo, 2017.
- Vásquez, Haymarí y Graterol, Mariluz. 2013.** *Roca sedimentaria, Lutita*. Venezuela : Universidad de Málaga, 2013.
- Vasquez, Ricardo. 2002.** *Pavement Condition Index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras*. Colombia : Ingepav, 2002.

Vesga, L. 2000. *Agrietamientos en los suelos del occidente de la Sabana de Bogotá.* Bogota : Boletín Colombiano de Geotecnia, 2000.

ANEXOS

TRAMO 1



Piel de cocodrilo con presencia de baches



Parqueo con piel de cocodrilo en su inferior aflorando



Piel de cocodrilo con depresión



Parqueo con piel de cocodrilo en su inferior aflorando



Bache



Combinación de patologías, predominando la piel de cocodrilo y el hundimiento



Parqueo con piel de cocodrilo en su inferior



Piel de cocodrilo con bache aflorando



Hundimiento con piel de cocodrilo



Piel de cocodrilo



Piel de cocodrilo con presencia de bache



Parqueo con piel de cocodrilo en su inferior
Aflorando y fisuras de borde



Fisuras de borde con presencia de cerca viva y piel de cocodrilo



Bache



Parqueo



Hundimiento



Combinación de patologías



Bacheo



Abultamiento



Hundimiento



Fisura de borde con abultamiento



Piel de cocodrilo con presencia de parche



Combinacion de patologias, baches y piel de cocodrilo



Fisuras de borde, paralelas al eje de la via, con cerca viva



Piel de cocodrilo con desprendimiento de material



Fisuras en bloque con bache y hundimiento



TRAMO 2



Desprendimiento de la sobrecarpeta



Hundimiento repetitivo



Cerca viva con presencia de arboles ciprés



Hundimiento repetitivo



Hundimiento en zona de las huellas
vehiculares



Hundimiento con cerca viva



Hundimientos repetitivos



Fisuras de borde paralelas al eje de la via



Piel de cocodrilo



Desprendimiento de la carpeta con fisura media luna



Hundimiento repetitivo



Piel de cocodrilo con bacheo y parcheo



Piel de cocodrilo con parche y cerca viva





Fisuras de bloque



Hundimiento con Piel de cocodrilo



Hundimiento



Parche



Cerca viva de aproximadamente 80 cm de alto



Piel de cocodrilo con parche



Desprendimiento del material de la carpeta



Parche



Perdida de adherencia de la carpeta



Fisura de bloque



Fisuras de bloque y parcheo

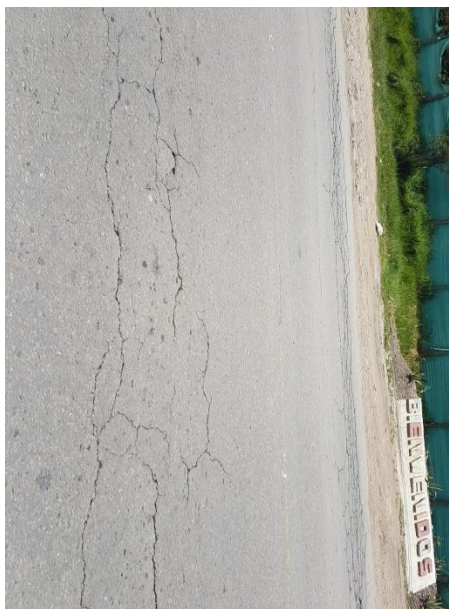


Fisura de borde

TRAMO 3



Combinacion de patologias coon cerca viva a amos costados de la vía



Fisura de borde paralela al eje de la vía



Fisuramiento en bloque



Piel de cocodrilo con cerca viva



Perdida de la carpeta de rodadura con piel de cocodrilo



Desprendimiento de carpeta de rodadura



Sobrecarpeta nueva



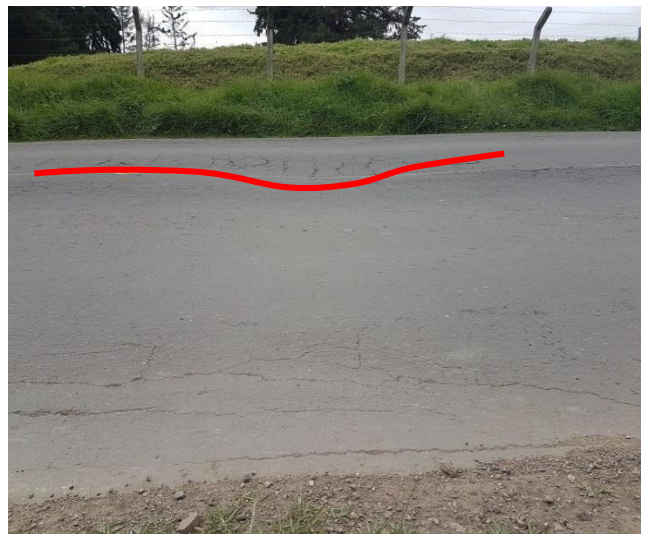
Cerca viva con piel de cocodrilo paralela a la via



Rodadura en afirmado eje de



Piel de cocodrilo con depresion



Hundimiento



Cerca viva de arboles de mas de 6 metros de



Fisuramiento en el eje de la vía altitud