

**ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA  
ESTRUCTURA DE PAVIMENTO APLICADO A LA RUTA DEL SOL TRAMO 2 ENTRE EL K62+200 Y EL  
K66+500**

Victoria Barbosa Figueroa, Lina Juliana Henao Perea, Felipe Pinilla Cabrera



**UNIVERSIDAD**  
**La Gran Colombia**

Vigilada MINEDUCACIÓN

Ingeniería Civil, Facultad de ingenierías

Universidad La Gran Colombia

Bogotá D.C

2024

**Análisis de la aplicabilidad de Georradar para determinar los espesores de la estructura de pavimento  
aplicado a la Ruta del Sol tramo 2 entre el K62+200 y el K66+500**

**Victoria Barbosa Figueroa, Lina Juliana Henao Perea, Felipe Pinilla Cabrera**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero civil**

**Directora Ingrid Marylin Silva**



**UNIVERSIDAD**  
**La Gran Colombia**

Vigilada MINEDUCACIÓN

**Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías**

**Universidad La Gran Colombia**

**Bogotá D.C**

**2024**

### **Agradecimientos**

Hoy, mientras culmina esta etapa tan significativa en nuestras vidas, queremos tomar un momento para expresar nuestro profundo agradecimiento a aquellos que han hecho posible este logro tan importante para nosotros.

Principalmente a Dios por darnos la fuerza y perseverancia necesarias para completar este camino académico, su guía constante y su amor incondicional. Agradecemos de todo corazón a nuestras madres, cuyo sacrificio y apoyo incondicional han sido la base de nuestro éxito, con sus palabras de ánimo, la paciencia, su amor infinito, nos han llevado hasta este día; gracias por creer en nosotros incluso cuando dudábamos.

También queremos expresar nuestra gratitud a la directora de proyecto, Ingrid Silva, por su orientación experta, su dedicación, conocimientos, consejos y por tan amenas conversaciones.

**Tabla de contenido**

**RESUMEN ..... 9**

**ABSTRACT ..... 10**

**INTRODUCCIÓN ..... 11**

**OBJETIVOS ..... 12**

    OBJETIVO GENERAL ..... 12

    OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 12

**CAPÍTULO I: MARCO REFERENCIAL ..... 13**

    1.1. MARCO TEÓRICO: ..... 13

        1.1.1. PAVIMENTO: ..... 13

        1.1.2. PAVIMENTO FLEXIBLE: ..... 13

        1.1.3 EXPLORACIONES IN SITU: ..... 14

        1.1.4 DEFLECTOMETRÍA: ..... 15

            1.1.4.1 *Funcionamiento del FWD* ..... 15

            1.1.4.2 *Capacidad Estructural-Deflexión (Do)* ..... 16

        1.1.5 LÍMITE PLÁSTICO (PL): ..... 17

        1.1.6 LÍMITE LÍQUIDO: ..... 17

        1.1.7 ÍNDICE DE PLASTICIDAD (PI): ..... 18

        1.1.8 LÍMITES DE ATTERBERG: ..... 18

            1.1.8.1 *Carta de plasticidad*: ..... 18

        1.1.9 GRANULOMETRÍA: ..... 19

            1.1.9.1 *Análisis por Tamizado*: ..... 19

            1.1.9.2 *Análisis por Sedimentación*: ..... 20

ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO 5

1.1.10 CBR: .....	20
1.1.10.1 Procedimiento del Ensayo CBR según la norma ASTM D1883 y AASHTO T193: .....	21
1.1.11 GEORRADAR: .....	22
1.1.11.1 Funcionamiento del georradar: .....	22
1.1.11.2 Principales aplicaciones del georradar en pavimentos: .....	24
1.1.11.3 Carro de transporte: .....	26
1.2 ANTECEDENTES .....	26
<b>CAPÍTULO 2: NORMATIVIDAD Y DOCUMENTOS TÉCNICOS A APLICAR .....</b>	<b>30</b>
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA .....</b>	<b>32</b>
3.1. PLANIFICACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS: .....	32
3.2. PROCESAMIENTO DE DATOS GEORRADAR: .....	32
3.3. ANÁLISIS DE DATOS DE APIQUES: .....	32
3.4. INTEGRACIÓN DE DATOS: .....	32
3.5. EVALUACIÓN Y CONCLUSIONES: .....	33
3.6. DOCUMENTACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS: .....	33
3.7. VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN: .....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
<b>CAPÍTULO 4: GENERALIDADES DEL CORREDOR .....</b>	<b>34</b>
4.1 LOCALIZACIÓN: .....	34
4.1.1 TIPO DE VÍA .....	35
4.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE .....	35
4.2.1 Resultados de Información existente .....	35
4.2.2 PAVIMENTOS EXISTENTES. ....	36

# ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA

## DE PAVIMENTO

6

4.3 GEOLOGÍA.....	37
4.4 CLIMA.....	38
4.5 PRECIPITACIÓN.....	40
4.5.1 PRECIPITACIÓN MEDIA.....	40
4.6 TEMPERATURA.....	41
4.6.1 <i>Temperatura media</i> .....	41
4.6.2 <i>Temperatura máxima</i> .....	42
4.6.3 <i>Temperatura mínima</i> .....	42
4.7 HUMEDAD RELATIVA.....	43
<b>CAPÍTULO 5: TRABAJOS DE CAMPO.....</b>	<b>45</b>
5.1 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS.....	45
5.2 SUBRASANTE.....	46
5.3 CONTENIDO ORGÁNICO.....	63
5.4 DEFLEXIÓN D0 - MEDICIÓN CON FWD.....	67
5.5 GEORRADAR GSSI.....	71
5.5.1 <i>Núcleos de Calibración</i> .....	72
5.5.2 <i>Limitaciones del estudio</i> .....	72
<b>CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS GEORRADAR.....</b>	<b>73</b>
6.1 RESULTADOS - ANÁLISIS SECTORIZACIÓN DE CORREDOR Y PRESENTACIÓN ESPESORES DEL CORREDOR EXISTENTE.....	73
6.2 DENSIDAD DEL CONCRETO ASFALTICO DEL SECTOR.....	77
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>81</b>
<b>LISTA DE REFERENCIA.....</b>	<b>86</b>

LISTA DE FIGURAS

*Figura 1*.....14

*Figura 2*.....19

*Figura 3*.....20

*Figura 4*.....34

*Figura 5*.....35

*Figura 6*.....36

*Figura 7*.....36

*Figura 8*.....38

*Figura 9*.....41

*Figura 9*.....41

*Figura 11*.....43

*Figura 12*.....44

*Figura 13*.....58

*Figura 14*.....58

*Figura 15*.....59

*Figura 16*.....59

*Figura 17*.....60

*Figura 18*.....60

*Figura 19*.....62

*Figura 20*.....62

*Figura 21*.....78

**Figura 22**.....83

**Lista de Tablas**

**Tabla 1**.....16

**Tabla 2**.....21

**Tabla 3**.....39

**Tabla 4**.....46

**Tabla 5**.....46

**Tabla 6**.....52

**Tabla 7**.....61

**Tabla 8**.....63

**Tabla 9**.....67

**Tabla 10**.....73

**Tabla 11**.....79

**Tabla 12**.....82

### **Resumen**

La evaluación precisa del estado del pavimento es primordial para garantizar la seguridad vial y la eficiencia del transporte en la Ruta del Sol, el cual es un corredor vial crucial en la región. Las técnicas tradicionales de evaluación, como la perforación y el muestreo destructivo, presentan limitaciones en cuanto a costo y tiempo; el Georradar surge como una alternativa prometedora que ofrece un análisis no destructivo y preciso de la estructura interna del pavimento.

Este estudio investiga la viabilidad del Georradar para determinar el espesor de la estructura del pavimento en un tramo específico de la Ruta del Sol. Se busca comparar la efectividad del georradar con métodos tradicionales como la perforación, evaluando su precisión y tiempo de ejecución. Este estudio busca mejorar la gestión de la infraestructura vial en la región, promoviendo estrategias de mantenimiento más efectivas y eficientes, lo que supondrá una mayor seguridad vial y una mejor experiencia para los usuarios de la carretera.

*Palabras clave: Pavimento, Perforación, Muestreo, Georradar, Infraestructura vial, Deflectometría*

**Abstract**

Accurate pavement condition assessment is paramount to ensure road safety and transport efficiency on the Ruta del Sol, which is a crucial road corridor in the region. Traditional assessment techniques, such as drilling and destructive sampling, have limitations in terms of cost and time; the Georradar appears as a promising alternative that offers a non-destructive and accurate analysis of the internal structure of the pavement.

This study investigates the feasibility of Georadar to determine the thickness of the pavement structure in a specific section of the Ruta del Sol. The effectiveness of georadar is compared with traditional methods such as drilling, evaluating its accuracy and execution time. This study is expected to contribute to the improvement of road infrastructure management in the region, promoting more effective and efficient maintenance strategies, which will lead to greater road safety and a better experience for road users.

*Keywords: Pavement, Drilling, Sampling, Ground-penetrating radar, Road's infrastructure, Deflectometry.*

## Introducción

En la ingeniería de carreteras, la evaluación precisa de la condición del pavimento es crucial para garantizar la seguridad vial y la eficiencia del transporte. La Ruta del Sol, uno de los principales corredores viales en nuestra región, no es una excepción. El tramo entre el kilómetro 62+200 y el kilómetro 66+500 enfrenta desafíos por la degradación del pavimento debido al uso constante y factores climáticos.

Para abordar estas preocupaciones y mejorar la gestión de la infraestructura vial, surge la necesidad de implementar tecnologías innovadoras de evaluación y monitoreo; las técnicas tradicionales de evaluación del pavimento, como la perforación y el muestreo destructivo, pueden resultar costosas, invasivas y llevar mucho tiempo. Además, estas técnicas pueden proporcionar una representación limitada de la condición real del pavimento debido a su naturaleza puntual. En este contexto, el Georradar emerge como una herramienta prometedora que ofrece la capacidad de analizar la estructura interna del pavimento de manera no destructiva y precisa.

El objetivo fundamental de este análisis es explorar la utilidad del Georradar para establecer los espesores de una estructura del pavimento del tramo de la Ruta del Sol. Este análisis se centra en brindar información detallada acerca del estado actual del pavimento y colocar las bases para el diseño de estrategias eficaces para el mantenimiento y rehabilitación.

A lo largo de este documento, se examinará la metodología empleada para la recopilación y análisis de datos mediante el Georradar, se discutirán los resultados obtenidos y se ofrecerán recomendaciones para futuras investigaciones y acciones prácticas. En última instancia, se prevé que este estudio ayude significativamente a la mejora de mantener la gestión de la infraestructura vial en la región, promoviendo la seguridad y la eficiencia en el transporte.

## Objetivos

### Objetivo General

Analizar la viabilidad y precisión del Georradar como herramienta para la determinación de los espesores de la estructura del pavimento en el tramo específico de la Ruta del Sol entre el kilómetro 62+200 y el kilómetro 66+500.

### Objetivos Específicos

- Investigar y revisar la literatura existente sobre el uso del Georradar en la evaluación de pavimentos y estructuras viales.
- Recopilar datos de georradares mediante la realización de escaneos sistemáticos a lo largo del tramo de la carretera bajo estudio.
- Procesar y analizar los datos de georradares recopilados para obtener mediciones precisas de los espesores de la estructura del pavimento.
- Comparar los resultados obtenidos mediante el Georradar con mediciones de espesores de pavimento realizadas mediante métodos tradicionales, como perforaciones y muestreos destructivos. Luego, emitir recomendaciones basadas en los hallazgos del estudio para mejorar la gestión y mantenimiento de la infraestructura vial en el tramo analizado y en áreas similares.

## Capítulo I: Marco referencial

### 1.1. Marco teórico:

#### 1.1.1. Pavimento:

Un pavimento se puede definir como la capa o conjunto de capas de materiales apropiados, entre el nivel superior de la subrasante y la superficie de rodamiento, cuyas principales funciones son proporcionar una superficie uniforme, de color y textura apropiadas, resistente al tránsito y otros agentes perjudiciales; y transmitir adecuadamente los esfuerzos a la subrasante, para que no se deforme perjudicialmente (Montejo Fonseca, 1998).

#### 1.1.2. Pavimento flexible:

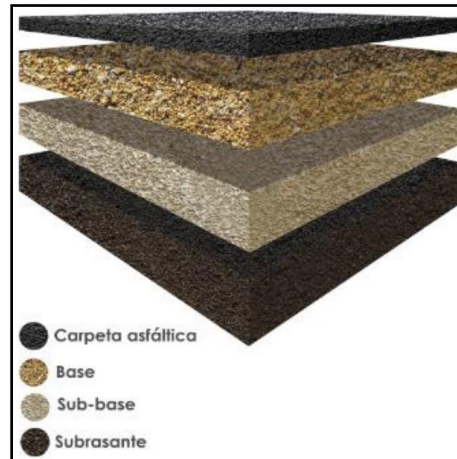
Según Perdomo (2023) Un pavimento flexible se puede caracterizar porque su estructura se flexiona dependiendo de acuerdo con las cargas que se ejercen sobre él. Son muchos los lugares donde se usan este tipo de estructuras, pero principalmente se encuentran en lugares de abundante tráfico (vías, aeropuertos, aceras o parkings). Aunque el periodo de vida útil está entre 10 y 15 años es un pavimento que requiere constante mantenimiento para prolongar su vida útil.

Las capas del pavimento flexible se componen de la subbase granular la cual impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante, ayuda a la disminución de las deformaciones generalmente asociadas a expansiones o cambios extremos de temperatura, adicionalmente soporta los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores; la base granular cuya función principal consiste en proporcionar un elemento resistente que

transmita a la subbase; la carpeta o superficie de rodamiento la cual proporciona una superficie uniforme y estable al tránsito, resistiendo los efectos abrasivos del tránsito. (Montejo Fonseca, 1998).

**Figura 1**

*Estructura del pavimento asfáltico*



*Nota.* tomado de “estado del arte de tecnologías emergentes y metodologías tradicionales para la evaluación de la calidad de pavimentos flexibles” H.Perdomo (2023) <https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/78a87d32-3d95-4d0b-b8ea-dc1c093d1161/content>

### **1.1.3 Exploraciones in situ:**

Son ensayos realizados en campo para aprovechar las condiciones naturales del terreno, lo que ayuda a que estas exploraciones sean más acertadas que los ensayos de laboratorio. Cada ensayo de campo se correlaciona con uno o varios ensayos de laboratorio, de tal forma que un mismo parámetro tenga más de una forma de ser determinado y comparado por otro medio. (UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA)

Con la mayoría de estas exploraciones se buscan determinar las propiedades y parámetros esfuerzo-deformación del terreno, algunos ensayos tienen un principio de aplicación de carga de forma estática y

otros, dinámica, dependiendo de la metodología diseñada. Existen diferentes tipos de exploraciones in situ:

- Ensayo de penetración estándar (SPT)
- Ensayo de penetración con cono (CPT)
- Ensayo de carga (placa de carga)
- Apiques (Las excavaciones manuales permiten la observación directa del terreno a una profundidad específica y la extracción de muestras alteradas o inalteradas.)

#### **1.1.4 Deflectometría:**

Se trata de un enfoque no destructivo utilizado para evaluar la capacidad estructural de pavimentos. Este procedimiento se basa en medir las deformaciones o deflexiones que se producen en la superficie del pavimento cuando se somete a una carga controlada. Estas deflexiones son indicativas de la respuesta del pavimento a las cargas de tráfico, permitiendo evaluar la integridad estructural del mismo y estimar su vida útil. Uno de los equipos más utilizados en la Deflectometría es el deflectómetro de impacto de Caída o the Falling Weight Deflectometer (FWD).

##### **1.1.4.1 Funcionamiento del FWD**

- **Aplicación de la Carga:** El FWD aplica una carga mediante la caída controlada de una masa sobre una placa de carga que se coloca en la superficie del pavimento. La masa se deja caer desde una altura predefinida, generando un impacto que simula el paso de un eje de rueda sobre el pavimento.

- **Medición de las Deflexiones:** Alrededor de la placa de carga, el FWD tiene sensores llamados geófonos o acelerómetros, distribuidos en diferentes distancias desde el punto de aplicación de la carga. Estos sensores miden las deflexiones que ocurren en la superficie del pavimento como respuesta al impacto. La magnitud de estas deflexiones depende de la rigidez y capacidad estructural del pavimento.
- **Interpretación de Datos:** Los datos de deflexión recogidos por el FWD se utilizan para calcular parámetros importantes del pavimento, como la rigidez o módulo elástico de las capas de pavimento. Estos cálculos ayudan a evaluar que la capacidad del pavimento para transportar cargas futuras y a determinar si es necesario realizar algún tipo de mantenimiento o rehabilitación.

**1.1.4.2 Capacidad Estructural-Deflexión (Do)**

Para la capacidad estructural se realiza una revisión por secciones según las calificaciones de índole cualitativo que dependen del valor Do. De acuerdo con Horak, hay niveles de deflexiones con los que se pueden definir preliminarmente las condiciones como buenas, regulares o malas en los sectores de análisis.

**Tabla 1**

*Parámetro d0 en evaluación cualitativa, 40 Kn de carga – pavimentos flexibles*

TIPO DE BASE	CONDICION ESTRUCTURAL	d0
GRANULAR	Buena	<500

	Regular	500 - 700
	Mala	>750
	Buena	<200
	Regular	200 - 400
CEMENTADA	Mala	>400
	Buena	<400
	Regular	400 - 600
BITUMINOSA	Mala	<600

*Nota.* Tomado de “Apéndice técnico 1-Alcance Concesión SABANA DE TORRES – CURUMANÍ.” Ministerio de transporte Chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpgclclefindmkaj/https://www.ani.gov.co/sites/default/files/7.\_ap1\_alcance\_c2\_sin\_marcas\_-\_adenda\_4.pdf

#### 1.1.5 Límite plástico (PL):

El límite plástico es el contenido de agua mínimo en el que la superficie pasa de un estado semisólido a plástico y el bajo contenido de agua que el suelo comienza a comportarse plásticamente, puede moldearse y deformarse sin romperse, pero no fluye como un líquido. Para la validación del Límite Plástico de un suelo se requiere aplicar un procedimiento estándar que se describe en normas como la **ASTM D4318** o la **AASHTO T90**.

#### 1.1.6 Límite Líquido:

El límite líquido (LL) se trata del contenido de agua que conduce el material desde un estado plástico hasta un estado líquido. Se trata del contenido de agua en el que el suelo comienza a comportarse como un líquido viscoso y fluye bajo su propio peso. El límite líquido se establece mediante un dispositivo denominado copa de Casagrande.

### **1.1.7 Índice de Plasticidad (PI):**

La diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (PL) se denomina índice de plasticidad (PI). Este valor es una medida de la plasticidad de un suelo y es un criterio fundamental para la clasificación del suelo.

### **1.1.8 Límites de Atterberg:**

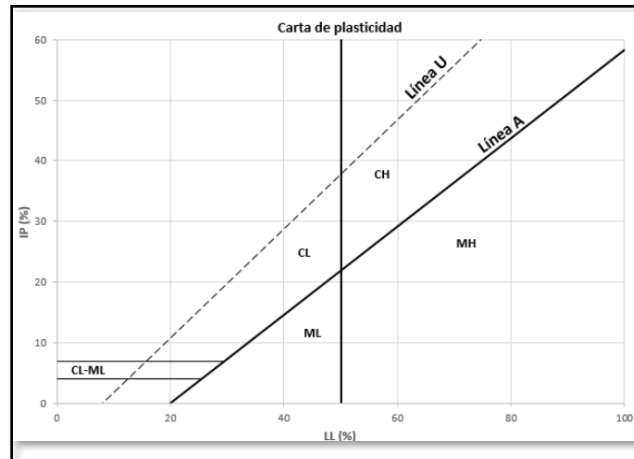
Originalmente, Albert Atterberg definió seis límites de consistencia para los suelos finos: el límite superior del flujo viscoso, el límite líquido, el límite de pegajosidad, el límite de cohesión, el límite plástico y el límite de contracción. En la ingeniería, el término se aplica solo a los límites líquido y plástico, en algunas referencias, también al límite de contracción. Estos límites presentan las fronteras entre diversos estados de consistencia de los suelos plásticos (INVIAS-126-13).

#### **1.1.8.1 Carta de plasticidad:**

Es un gráfico en el que se representan los valores del límite líquido y el índice de plasticidad en un campo de coordenadas cartesianas para diferenciar las arcillas de los limos. Por lo que esta información es de gran valor para identificarlos con facilidad. Los atributos fundamentales de esta carta son la Línea A empírica determinada por la ecuación:  $(LL-20-IP)$  La línea A separa las arcillas inorgánicas (se encuentra por debajo de esta línea) de los limos inorgánicos, los limos orgánicos se encuentran situados por debajo de la línea con el Límite Líquido oscilando entre 30 y 50; las arcillas orgánicas se ubican por debajo de esta línea con un límite líquido superior a 50.

**Figura 2**

*Carta de plasticidad*



*Nota.* Elaboración propia.

### **1.1.9 Granulometría:**

La granulometría es el estudio y la medición de las partículas de un suelo o material granular, como arena, grava o roca triturada, en función de su tamaño. Las características físicas y mecánicas de los terrenos y materiales granulares dependen de su distribución granulométrica; esto permite clasificar el suelo y predecir su comportamiento en aplicaciones como la construcción de carreteras, cimientos, presas y otras estructuras. Existen dos métodos principales para realizar un análisis granulométrico:

#### **1.1.9.1 Análisis por Tamizado:**

Este método se utiliza principalmente para partículas mayores a 75 micrones, como arena y grava. Consiste en pasar una muestra seca de suelo a través de una serie de tamices de diferentes tamaños, apilados de mayor a menor. Cada tamiz retiene las partículas más grandes que su abertura,

mientras que las más pequeñas pasan al siguiente tamiz. Luego, se pesa el suelo retenido en cada tamiz y se calcula el porcentaje de masa que representa. Esto permite crear una curva granulométrica que muestra la distribución de tamaños de partículas en la muestra

#### **1.1.9.2 Análisis por Sedimentación:**

Para partículas más finas que 75 micrones, como limos y arcillas, se utiliza el método de sedimentación basada en la Ley de Stokes. La muestra se mezcla con agua para formar una suspensión y se deja sedimentar en un cilindro graduado. A medida que las partículas se asientan a diferentes velocidades según su tamaño, se toman mediciones a intervalos de tiempo para calcular la distribución de tamaños. Este método permite analizar las partículas finas que no pueden ser evaluadas mediante tamizado.

#### **1.1.10 CBR:**

El CBR (California Bearing Ratio) es un índice que mide la resistencia de un suelo a la penetración bajo condiciones controladas. Es un ensayo que se usa para evaluar la capacidad portante de los suelos y su idoneidad como subrasante, subbase o base para carreteras y aeropuertos. Es un valor porcentual que compara la resistencia del suelo bajo estudio con la resistencia de un material estándar (generalmente una piedra triturada bien graduada).

#### **Figura 3**

*Ecuación de cálculo del CBR*

$$CBR = \frac{F_{\text{suelo}}}{F_{\text{material estandar}}} * 100$$

Donde:

- F suelo es la fuerza requerida para penetrar en la muestra de suelo.
- F material estándar es la fuerza requerida para penetrar en el material estándar (obtenido de tablas predefinidas).

**1.1.10.1 Procedimiento del Ensayo CBR según la norma ASTM D1883 y AASHTO T193:**

Procesamiento de la muestra: Se elabora una muestra de suelo compactada en un molde estándar. La muestra puede estar en estado seco o saturado, dependiendo de las condiciones que se desean simular.

- **Penetración con pistón:** Un pistón cilíndrico de 50 mm de diámetro se introduce en la muestra a una velocidad constante de 1.27 mm/min. Se mide la fuerza requerida para penetrar en profundidades de 2.5 mm y 5.0 mm.
- **Cálculo del CBR:** Se determina la fuerza medida en kilo newtons (kN) para las profundidades de 2.5 mm y 5.0 mm, y se compara con los valores estándar. El CBR se expresa como un porcentaje, y generalmente se toma el valor más alto de los dos (2.5 mm o 5.0 mm).
- **Niveles de CBR:** Los valores típicos del CBR se clasifican en los siguientes rangos:

**Tabla 2**

*Clasificación del CBR*

CBR (%)	Clasificación del Suelo	Aplicación Potencial
0-3	Muy pobre	Suelos de subrasante de muy baja capacidad. Requiere refuerzo.

CBR (%)	Clasificación del Suelo	Aplicación Potencial
3-7	Pobre	Subrasante que necesita tratamiento o mejora.
7-20	Regular	Subrasante aceptable, puede necesitar estabilización adicional.
20-50	Bueno	Puede usarse como subbase.
>50	Muy bueno	Adecuado para usar como base de pavimento.

*Nota.* Adaptado de “CBR DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO Y SOBRE MUESTRA INALTERADA” (2012) <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-148-13.pdf>

**1.1.11 Georradar:**

El georradar (GPR) es un método no destructivo usado para medir espesores de capas en pavimentos.. Este método proporciona una imagen detallada del subsuelo al detectar cambios en la constante dieléctrica de los materiales que lo componen; la constante dieléctrica es la magnitud física en la que se basa el georradar y representa la permitividad al paso de un impulso electromagnético con respecto a la permitividad que presenta el vacío. La antena del GPR emite pulsos de ondas electromagnéticas de alta frecuencia desde una antena transmisora colocada sobre la superficie del pavimento. Estos pulsos penetran en el pavimento y se reflejan en las interfaces entre diferentes materiales, permitiendo así la obtención de datos precisos sobre la estructura interna del pavimento.

**1.1.11.1 Funcionamiento del georradar:**

Funciona mediante la emisión y recepción de ondas electromagnéticas de alta frecuencia para explorar el subsuelo, su funcionamiento se puede dividir en varias fases:

- **Emisión de ondas electromagnéticas:** La antena emisora del georradar genera pulsos de ondas electromagnéticas de alta frecuencia (entre 500 MHz y 2.300 MHz) hacia el suelo o el objeto que se desea analizar.
  - Antena de baja frecuencia, frecuencia central: 500MHz
  - Antena de alta frecuencia, frecuencia central: 1.600MHz
  - Antena de alta frecuencia, frecuencia central: 2.300MHz

Antes de realizar el ensayo deben establecerse los parámetros de medición en el software, de acuerdo con las recomendaciones para cada antena se establece:

- Frecuencia de muestreo: 12 veces la frecuencia central de la antena.
  - Número de muestras: aproximadamente 500.
- **Reflexión de ondas:** Al encontrar materiales con diferentes propiedades eléctricas y dieléctricas en el subsuelo (como capas de tierra, agua, rocas, metales, etc.), parte de la energía de la onda se refleja hacia la superficie debido a las diferencias en las constantes dieléctricas de los materiales.
  - **Recepción de las señales reflejadas:** La antena receptora, situada junto a la emisora, capta las ondas reflejadas y registra el tiempo que tardan en regresar, lo cual depende de la distancia y la densidad de los materiales atravesados.
  - **Procesamiento de datos:** El equipo transforma las señales recibidas en un gráfico llamado "radar grama", los radargramas son una representación gráfica de las trazas generadas cada vez que se produce un pulso electromagnético

durante la medición; las trazas corresponden a un vector de energía recibida por reflexión vs tiempo transcurrido desde la generación del pulso, Los radares grama representa una imagen del subsuelo según la profundidad. Cada pico en el radargrama indica un cambio en el tipo de material o la presencia de una estructura subterránea.

- **Interpretación de resultados:** Los datos del radargrama se analizan para identificar diferentes capas y anomalías, como el espesor de las capas de pavimento, grietas, zonas de humedad, huecos y otros detalles estructurales. La señal de las ondas se adquiere mediante el software *Mala GroundVision*, el cual genera como archivo principal un .rd3. Este archivo se analiza con un software adecuado, donde, mediante distintos filtros se distinguen y marcan las interfaces entre materiales.

Actualmente se utiliza para el procesamiento de datos el software *Gpr\_analyzer*, desarrollado por la empresa sueca *Kuab*, este software es específico para el tratamiento de datos adquiridos de pavimentos con exportación de datos al programa PVD. El PVD es un producto también de la empresa *Kuab*, que permite la incorporación de resultados de distintos equipos en un mismo programa.

#### ***1.1.11.2 Principales aplicaciones del georradar en pavimentos:***

- **Determinar el espesor de las capas del pavimento:** Es una de las aplicaciones más comunes del georradar, permitiendo conocer el grosor de cada capa que

conforma la estructura del pavimento, como la base granular, la subbase, la capa asfáltica y las capas de refuerzo. Esta información es crucial para evaluar la capacidad estructural del pavimento y planificar su mantenimiento o rehabilitación.

- **Detectar anomalías y defectos:** El georradar puede identificar la presencia de vacíos, humedades, fracturas, erosiones u otros defectos en las capas del pavimento que podrían comprometer su integridad y desempeño. La detección temprana de estas anomalías permite tomar medidas correctivas oportunas y evitar el deterioro prematuro de la estructura.
- **Evaluar la calidad de los materiales:** El georradar permite analizar las propiedades dieléctricas de los materiales que componen el pavimento, lo que proporciona información sobre su densidad, compactación y estado de saturación. Esta información es valiosa para evaluar la calidad de los materiales utilizados en la construcción del pavimento y detectar posibles problemas como la presencia de materiales no conformes o la mala compactación.
- **Monitorear el estado del pavimento:** El georradar se puede utilizar para realizar un monitoreo periódico del estado del pavimento, permitiendo detectar cambios en la estructura y propiedades de las capas con el paso del tiempo. Esto permite identificar problemas en sus inicios y adoptar medidas preventivas para evitar la aparición de errores más graves.

### **1.1.11.3 Carro de transporte:**

Se cuenta con dos carros, uno acoplado al equipo FWD y otro manual, en general, para mediciones en pavimento se utiliza el acoplado al FWD, a menos de que sea un estudio puntual en una cantidad acotada de metros.

Cuando se utiliza el GPR acoplado al FWD, el desarrollo del ensayo requiere de dos operarios, un chofer y un técnico encargado del registro de datos. Es recomendable que cada archivo de GPR no supere los 10 km, para evitar que ocupen demasiada memoria y facilitar su procesamiento. Es importante controlar la velocidad utilizando el indicador que proporciona el software y registrar la progresiva de inicio y fin de cada archivo de medición. La información sobre los testigos en el tramo a medir es crucial para calibrar los resultados del ensayo.

## **1.2 Antecedentes**

Con respecto a la implementación de georradars en las estructuras de pavimentos, se conocen artículos de investigación y publicaciones de varios lugares del mundo que demuestran los beneficios de su implementación y aspectos importantes que argumentan la necesidad de usar los georradars, un método no destructivo para determinar el espesor de las vías ya construidas.

Uno de los trabajos que hablan acerca del tema en estudio es el de hornaza, et al., (2003). En su revista *aplicaciones del georradar de subsuelo en obras civiles*. En donde este artículo se presenta una concisa descripción de la técnica de georradar aplicada en la inspección de obras civiles. el enfoque abarca desde los fundamentos teóricos de funcionamiento hasta ejemplos prácticos de su aplicación en el campo.

El georradar es una herramienta no invasiva que utiliza ondas electromagnéticas para explorar y mapear subsuperficiales. su aplicación en la inspección de estructuras y pavimentos ha demostrado ser valiosa para detectar anomalías, evaluar la integridad de materiales y localizar posibles defectos.

En el artículo, se discuten los principios físicos detrás del georradar, así como su configuración y parámetros relevantes. además, se presentan casos de estudio donde se ha utilizado esta técnica para evaluar la calidad del hormigón, detectar cavidades o identificar refuerzos internos en obras civiles.

De igual forma (A.cifuentes,2017) en su tesis *auscultación, proceso e interpretación de datos obtenidos por georradar aplicado a estructuras de pavimento y casos de geotecnia* se centra en el uso del georradar para evaluar superficies y diagnosticar factores que afectan la vida útil de las estructuras de ingeniería civil, donde se utilizó el programa reflexw para visualizar espesores de capas de pavimento. los espesores son cruciales para calcular los módulos del pavimento y su capacidad para soportar cargas de tráfico y se evaluaron los espesores de capas de pavimento en proyectos específicos, como una planta de energía eléctrica, la autopista palín-escuintla y una calle en la zona 6.

En el trabajo de (I.fernando, 2016) en el caso de estudio de *evaluación estructural de un pavimento flexible ubicado en la ciudad de Bogotá, localidad de puente Aranda entre av. calle 13 y 15, utilizando técnicas no destructivas y análisis de los resultados obtenidos* el documento aborda la evaluación estructural de un pavimento flexible ubicado en Bogotá, utilizando técnicas no destructivas. Este tipo de evaluación es esencial para garantizar la calidad y durabilidad de las vías en Colombia. El mantenimiento y la evaluación de pavimentos son fundamentales para asegurar un servicio óptimo y prolongar la vida útil de las vías. Para ello, se utilizan programas de auscultación y monitoreo que permiten planificar rehabilitaciones de manera eficiente. En este estudio, se emplean técnicas no

destructivas, como el Deflectómetro de Impacto (FWD) y el Georradar, para evaluar la capacidad estructural del pavimento en los que usaron inspección Visual, Georradar, Deflectometría con FWD, ensayos destructivos como apiques para obtener perfiles estratigráficos y caracterizar la subrasante, incluyendo el uso del Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) para medir CBR in situ.

El uso combinado de técnicas no destructivas y destructivas evalúa la capacidad estructural de los pavimentos flexibles. Las metodologías evaluadas (AASHTO-93, Rohde) ofrecen resultados comparables y útiles para la planificación de mantenimientos y rehabilitaciones de vías. Este estudio demuestra la eficacia de las técnicas no destructivas para la evaluación estructural de pavimentos y destaca la importancia de utilizar métodos complementarios para obtener un diagnóstico completo y preciso.

El trabajo de grado de J. Antonio en su investigación bibliográfica de *aplicación del método del georradar en la evaluación estructural de pavimentos flexibles en Cuba* realizaron la simulación de las ondas donde los modelos computacionales permitieron definir los parámetros de adquisición adecuados para identificar los deterioros más comunes en los pavimentos flexibles en Cuba. La propuesta de adquisición brinda una base sólida para evaluar el estado técnico de estos pavimentos en investigaciones de detalle.

Este trabajo de graduación, *evaluación y diseño de pavimentos por método no destructivo-georradar (gpr) y deflectómetro de la antigua vía a Conocoto*” presentado por M. Aguirre se enfoca en la evaluación y diseño de pavimentos utilizando métodos no destructivos, específicamente el Georradar (GPR) y el deflectómetro de Impacto. El estudio se aplicó a la antigua vía a Conocoto en Quito, Ecuador. Se realizó la recolección de datos de tráfico y la evaluación de la ubicación del pavimento a través de

GPR y FWD. Se hicieron pruebas de tráfico para establecer el Tráfico Promedio Diario Anual y proyecciones futuras, además de un análisis geotécnico y demarcaciones geográficas de la zona de estudio.

La evaluación del pavimento incluyó la identificación de espesores y defectos estructurales mediante GPR y la medición de deflexiones con el FWD. Los datos recolectados fueron procesados y analizados para determinar la capacidad estructural y necesidades de refuerzo del pavimento.

En resumen, existe bastante información y experiencias en diversos países que actualmente están adoptando los estudios no invasivos como el georradar para evaluar estructuras de pavimento. Estas investigaciones corroboran la eficacia de estas técnicas, respaldadas por los avances logrados en diferentes naciones.

## Capítulo 2: Normatividad y documentos técnicos a aplicar

- **INV NTC 4218:** Esta norma establece los lineamientos para la evaluación del estado de los pavimentos mediante métodos no destructivos, describe los principios generales y criterios de aplicación para este tipo de técnica.
- **INV NTC 4219:** Esta norma complementa la NTC 4218 y proporciona especificaciones para evaluar pavimentos asfálticos mediante el ensayo de deflexión por deflectómetro de caída de peso (FWD), la norma ofrece información valiosa sobre las características estructurales del pavimento
- **“Guía para la evaluación de pavimentos asfálticos con georradar” del Instituto Nacional de Vías (INV):** Este documento proporciona una guía detallada sobre la aplicación del georradar para la evaluación de pavimentos asfálticos en Colombia. Incluye información sobre la metodología de campo, el procesamiento de datos y la interpretación de resultados.
- **Asociación Colombiana de Geotecnia (ACG):** La ACG es una organización que agrupa a los profesionales de la geotecnia en Colombia. En su sitio web, puede encontrar información sobre eventos, publicaciones y recursos relacionados con el uso del GPR en geotecnia, incluidas las aplicaciones en pavimentos.
- **Norma Técnica Colombiana NTC 5655:2012 (Geotecnia - Investigación geotécnica - Ensayo de radar):** Esta norma específica para realizar ensayos de radar en geotecnia, que incluyen el uso de georradar para estudios de pavimentos.

- **NORMAS DE ENSAYOS DE MATERIALES PARA CARRETERAS INVIAS 2013"** son documentos integrales que establecen los procedimientos estandarizados para ensayar materiales utilizados en la construcción de carreteras en Colombia
- **La Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimentos (1993)** es un documento que nos puede proporcionar un marco integral para el diseño de pavimentos de carreteras nuevos y rehabilitados.
- **ASTM D 4748-98 Standard test method for determining the Thickness of bound pavement layers using short-pulse radar:** El objetivo de este documento es determinar las condiciones básicas para el ensayo del pavimento con Georradar (GPR) en las secciones que se requieran.
- **ASTM 6432-99 Standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation:** Esta norma proporciona directrices sobre el uso del georradar como una herramienta no destructiva para el análisis de la estructura de pavimentos y su condición.

### Capítulo 3: Metodología

#### 3.1. Planificación y Recolección de Datos:

- Definir el área de estudio , definición de suelo a estudiar y características.
- Establecer un área de muestreo que cubra de manera representativa el estudio.
- Recolectar datos de métodos tradicionales como apiques y datos del georradar para obtener información sobre las capas del pavimento.

#### 3.2. Análisis de Datos de Apiques:

- Realizar pruebas de laboratorio para determinar la granulometría, densidad, contenido de humedad y resistencia del material.
- Analizar las muestras obtenidas mediante apiques para determinar las propiedades del suelo y del material del pavimento.

#### 3.3. Procesamiento de Datos Georradar:

- Seleccionar los equipos de georradar adecuados para las condiciones del sitio y los objetivos del estudio.
- Procesar los datos del georradar para reducir el ruido y mejorar la calidad de la imagen, obteniendo los espesores de la estructura del pavimento.

#### 3.4. Integración de Datos:

- Combinar la información obtenida de los datos georradar y los datos de apiques para obtener una imagen completa de la estructura del pavimento.

- Comparar los resultados de los datos de georradar con las propiedades del material obtenido de los apiques para validar los hallazgos.

### **3.5. Evaluación y Conclusiones:**

- Evaluar la integridad estructural del pavimento utilizando los datos obtenidos.
- Realizar recomendaciones para el uso del georradar según los datos obtenidos.

### **3.6. Documentación y Presentación de Resultados:**

- Presentar los resultados de manera clara y concisa, utilizando gráficos, tablas y mapas si es necesario.
- Validar los resultados del estudio comparándolos con datos de inspecciones visuales y otros métodos de evaluación de pavimentos.

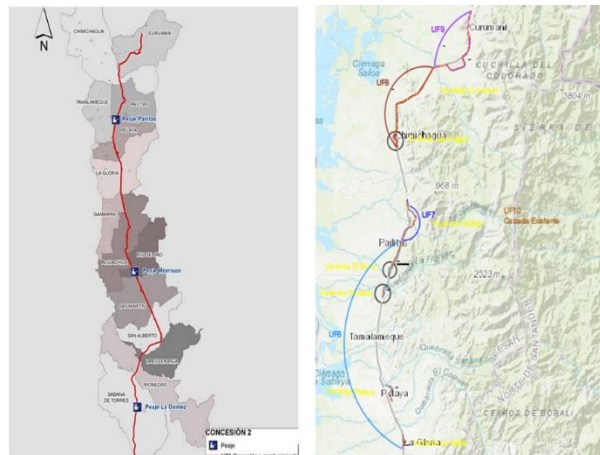
### Capítulo 4: Generalidades del corredor

#### 4.1 Localización:

Con 1.071 kilómetros y doble calzada, la Ruta del Sol es uno de los proyectos viales más extensos de Colombia. Su objetivo es unir el centro de Colombia con la costa atlántica a través del corredor Bogotá (El cortijo) - Villeta - Puerto Salgar - San Alberto - Santa Marta.

Figura 4

localización general

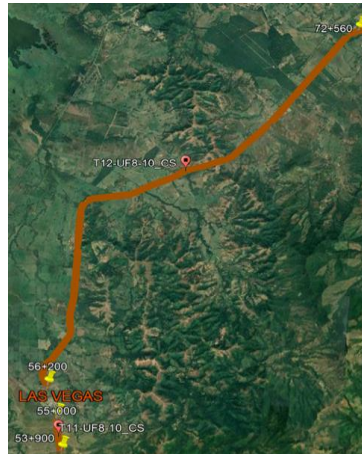


Nota. Tomado de “Apéndice técnico 1-Alcance Concesión SABANA DE TORRES – CURUMANÍ.” Ministerio de transporte Chrome-extension://efaidnbnmnnibpcjpcglcfeindmkaj/https://www.ani.gov.co/sites/default/files/7.\_ap1\_alcance\_c2\_sin\_marcas\_-\_adenda\_4.pdf

El tramo por estudiar se localiza entre los departamentos de Santander y Cesar en el tramo 2 entre el K62+200 y el K66+500:

**Figura 5**

*Localización específica*



*Nota.* Tomado de “Apéndice técnico 1-Alcance Concesión SABANA DE TORRES – CURUMANÍ.” Ministerio de transporte Chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ani.gov.co/sites/default/files/7.\_ap1\_alcance\_c2\_sin\_marcas\_-\_adenda\_4.pdf

**4.1.1 Tipo de vía**

Gran parte de la ruta del sol está diseñada como una autopista dado que cuenta con múltiples carriles por sentido, generalmente, sin intersecciones permitiendo una mayor fluidez vehicular, clasificándola como una vía primaria siendo una de las principales rutas del país. En algunos tramos la vía es dual, contando con dos calzadas separadas teniendo intersecciones en algunos puntos.

**4.2 Recopilación de información existente**

**4.2.1 Resultados de Información existente.**

Se presenta la información existente del estado de los pavimentos durante la vigencia de los años 2017 y 2018 desarrollada durante la ejecución del informe EI-S2-SS0-I-GP-PV-N-AU-I-0001 R02, correspondiente al Volumen 6 – Pavimentos del contrato ANI 597 de 2017. A continuación, se presenta

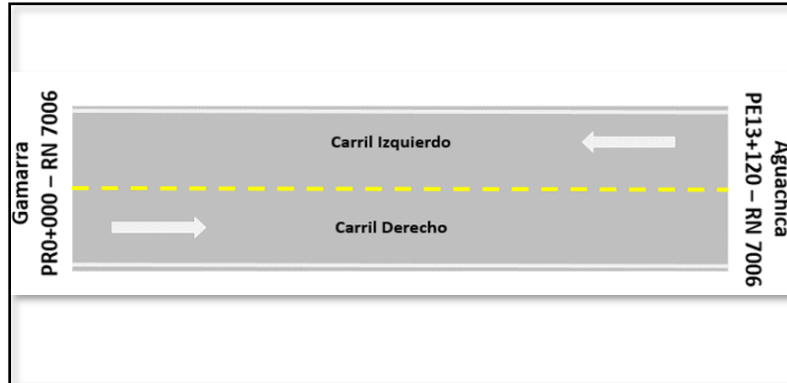
con recuento y resumen la información del Volumen 6- Pavimentos consultada en el cuarto de datos de la ANI, para conocer las condiciones del corredor vial establecidas.

#### 4.2.2 Pavimentos existentes.

La toma de información fue entre el 26 de febrero de 2017 y el 26 de marzo de 2018. Se realizaron mediciones de perfil longitudinal, perfil transversal, resistencia a la fricción y Deflectometría teniendo en cuenta la convención de carriles que a manera de ejemplo se muestra en las siguientes figuras, en donde la nomenclatura de las calzadas (norte o sur) a nivel general se realiza por el sentido de flujo vehicular en lugar de la posición de la calzada.

**Figura 6**

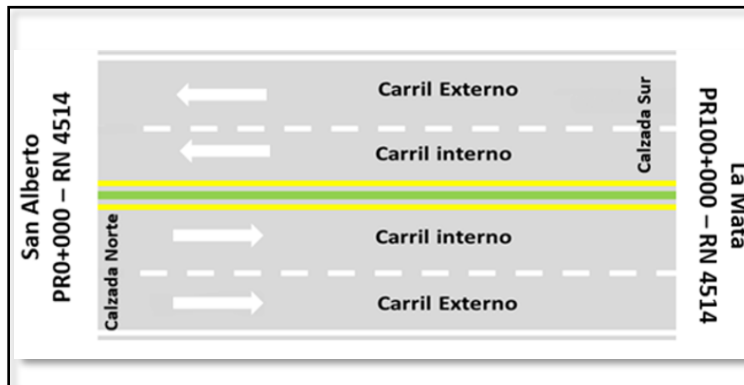
*Convención de carriles para la medición –calzada sencilla*



*Nota.* Tomado de "Apéndice técnico 1-Alcance Concesión SABANA DE TORRES – CURUMANÍ." Ministerio de transporte Chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ani.gov.co/sites/default/files/7.\_ap1\_alcance\_c2\_sin\_marcas\_-\_adenda\_4.pdf

**Figura 7**

*Convención de carriles para la medición –calzada doble*



*Nota.* Tomado de “Apéndice técnico 1-Alcance Concesión SABANA DE TORRES – CURUMANÍ.” Ministerio de transporte Chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://www.ani.gov.co/sites/default/files/7.\_ap1\_alcance\_c2\_sin\_marcas\_-\_adenda\_4.pdf

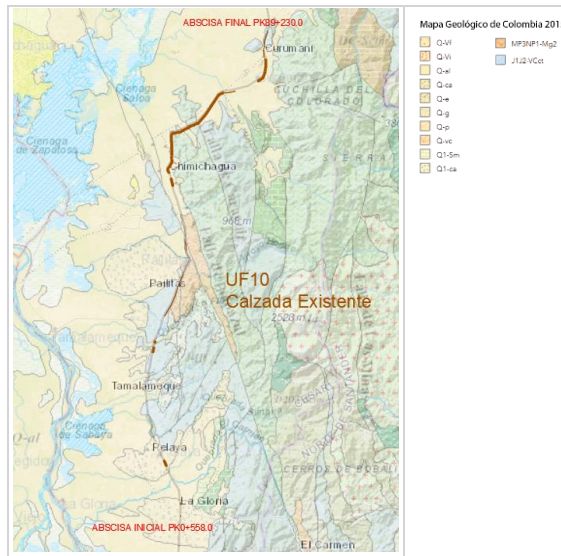
### 4.3 Geología

El proyecto se ubica en el Departamento del Cesar, que cuenta con una geología diversa de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias del Precámbrico, con 51 unidades geológicas diferentes. Físicamente, se divide en tres áreas principales: la Sierra Nevada de Santa Marta al norte, la Serranía de Perijá al este y extensas llanuras en el centro y oeste.

El departamento tiene dos sistemas de fallas estructurales importantes: una en el borde norte de la Sierra Nevada de Santa Marta y otra en el borde este de la Serranía de Perijá, con grandes pliegues entre ellas. Además, posee abundantes recursos naturales como zinc, cobre, baritina, arenas, gravas, calizas y arcillas, que son cruciales para la economía local y la planificación de proyectos de infraestructura.

**Figura 8**

*Unidades geológicas*



*Nota.* Tomado del Servicio Geológico Colombiano (2015) <https://www.sgc.gov.co/>

Las fallas y pliegues de la subcuenca de Cesar tienen una orientación NE-SW. La mayoría de las fallas son inversas de convergencia de alto ángulo hacia el suroeste y fallas recientes de rumbo. A excepción de algunas fallas someras con despegues en la Formación Colón asociados con la deformación del Oligoceno Tardío y Plio-Pleistoceno, la resolución sísmica debajo del Cretácico es muy baja y no permite ver el comportamiento de las fallas en profundidad.

#### 4.4 Clima

La ruta del Sol en Colombia es una importante carretera que conecta la región del Caribe con la región Andina, y atraviesa varias zonas con climas muy diversos. La ruta se extiende desde la costa Caribe hasta el interior del país y su clima varía significativamente dependiendo de la región, en la siguiente tabla se presenta de manera resumida la información climática del sector de la ruta del sol:

**Tabla 3**

*Clima ruta del sol por Abscisa*

SECTOR	Abscisa	ALTITUD	Temp Media Aire	Prec anual
		msnm	°C	mm/año
Aguachica- rio de oro	K00+000	128	27,7	1.456
	K05+000	180	27,4	
	K10+000	240	27,0	
	K15+000	265	26,9	
	K20+000	402	26,0	
	K25+000	774	23,8	
	K30+000	1.109	21,8	
	K35+000	1.426	19,8	
	K36+000	1.516	19,3	
	K40+000	1.306	20,6	
	K43+000	1.190	21,3	1.12

*Nota.* Tomado de “Apéndice técnico 1-Alcance Concesión SABANA DE TORRES – CURUMANÍ.” Ministerio de transporte Chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ani.gov.co/sites/default/files/7.\_ap1\_alcance\_c2\_sin\_marcas\_-\_adenda\_4.pdf

la Ruta del Sol en Colombia atraviesa una variedad de climas, desde tropical cálido en la costa Caribe hasta templado y fresco en las zonas montañosas de la Sierra. Cada región ofrece un clima distintivo que cambia a medida que se avanza a lo largo de la ruta.

## **4.5 Precipitación**

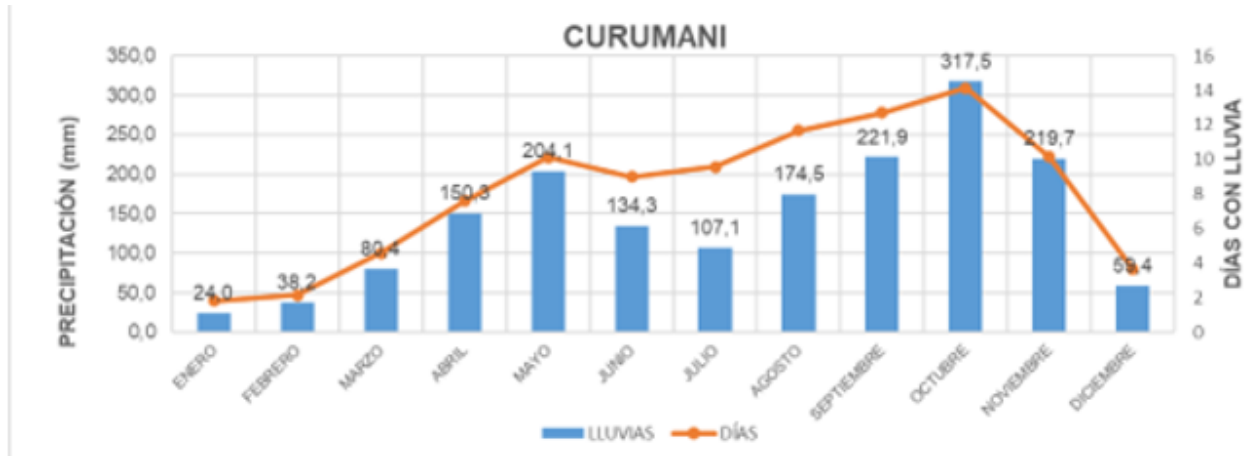
### **4.5.1 Precipitación media**

La precipitación en la zona de desarrollo del proyecto tiene régimen pluviométrico bimodal, en la temporada invernal ocurre en el primer semestre en abril y mayo y en el segundo semestre entre septiembre y noviembre, presentando picos en mayo y octubre, la mayoría de las veces. En magnitud las lluvias promedio anuales que se dan sobre el corredor vial están en un marco de entre 1500 mm y 2000 mm, a excepción del tramo sobre la Mata de la Unidad Funcional 6, donde la lluvia media anual alcanza valores próximos a los 2800 mm. Como parte del análisis de lluvias, se recopiló la información de 17 estaciones para estimar sus correspondientes valores medios mensuales y anuales.

Para ilustrar el comportamiento medio mensual de las lluvias sobre la zona, a continuación, se muestran las gráficas de distribución temporal de las estaciones más cercanas al corredor del proyecto, junto con información del número de días de lluvia promedio, donde se distinguen la estacionariedad de las lluvias y la magnitud de los picos.

**Figura 9**

*Distribución mensual media de la precipitación*



Nota. Tomado de “Especialidad de Hidráulica e Hidrología del Proyecto”, IDEAM (2018) <https://www.ideam.gov.co/>

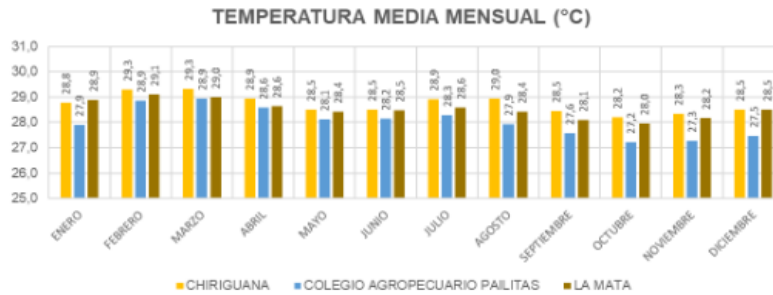
## 4.6 Temperatura

### 4.6.1 Temperatura media.

La temperatura en la ruta del sol presenta los registros más altos durante los meses de febrero y marzo con 29°C en promedio y en julio con 28.8°C promedio. Se representa gráficamente este comportamiento para las estaciones analizadas.

**Figura 10**

*Distribución mensual Temperatura Media en la zona de intervención del proyecto*



Nota. Tomado de “Especialidad de Hidráulica e Hidrología del Proyecto”, IDEAM (2018) <https://www.ideam.gov.co/>

Para el análisis de la distribución espacial, se asoció a la topografía disponible de la zona con este parámetro para conseguir representar el cambio de temperaturas medias en función de la altitud.

#### 4.6.2 Temperatura máxima.

El comportamiento de la temperatura máxima es estacionalmente similar al que experimenta la temperatura media, encontrando los picos más altos en febrero y marzo con temperaturas de 39.6°C a 40°C en promedio y 39.1°C en julio. La magnitud de la temperatura máxima se reduce hacia el sur de la zona de intervención del proyecto (La Mata–UF6), principalmente en invierno.

#### 4.6.3 Temperatura mínima

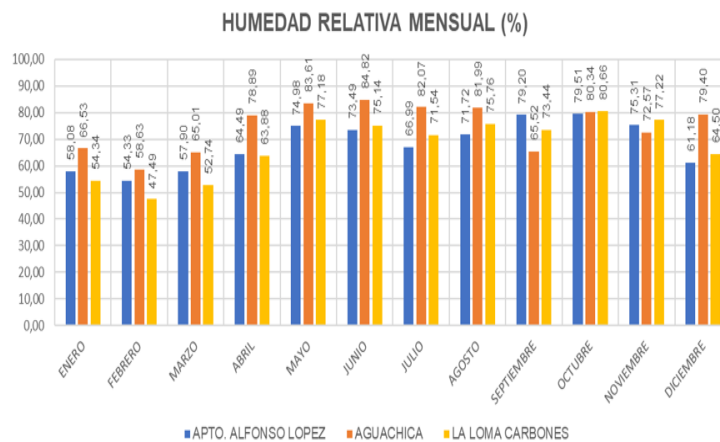
A diferencia de las temperaturas anteriormente descritas, la temperatura mínima tiene un comportamiento más estable a lo largo del año con un periodo donde los registros muestran reducción durante los meses de diciembre y enero; a lo largo del trazado se pueden esperar temperaturas mínimas promedio del orden de los 18.5 °C.

#### 4.7 Humedad relativa

Considerando la relación Temperatura - Lluvias - Humedad relativa, se obtuvo un patrón donde se observa el incremento de este parámetro con el inicio de las temporadas de lluvias, acompañado con la reducción de las temperaturas medias y máximas. Para la zona de estudio su humedad relativa promedio es del 70%, en la siguiente gráfica se puede evidenciar la distribución mensual y espacial sobre la zona del proyecto.

**Figura 11**

*Humedad relativa - distribución mensual*

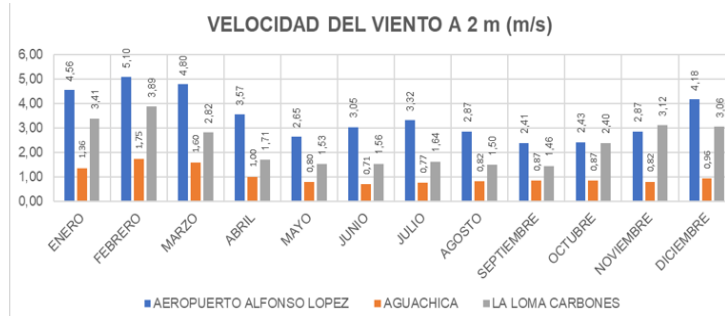


*Nota.* Tomado de “Especialidad de Hidráulica e Hidrología del Proyecto”, IDEAM (2018) <https://www.ideam.gov.co/>

En cuanto a las velocidades registradas sobre el área del proyecto, los valores máximos al norte del proyecto en las estaciones del Aeropuerto Alfonso López y la Loma Carbones con promedios anuales de 3.48 y 2.34 m/s respectivamente; mientras que en la estación Aguachica se presentan velocidades promedio anuales de 1.03 m/s. Los valores más altos de este parámetro se alcanzan en los primeros 3 meses del año con picos locales y menores en proporción en julio y diciembre.

Figura 12

Velocidad del viento a 2m de altura en la zona de intervención - mensual



Nota. Tomado de "Especialidad de Hidráulica e Hidrología del Proyecto", IDEAM (2018) <https://www.ideam.gov.co>

## Capítulo 5: Trabajos de campo

Se requiere conocer las propiedades de los materiales existentes a nivel de subrasante y las condiciones de las capas (sistema de pavimento) que la cubren, con base en lo anterior se tuvieron en cuenta las actividades de exploración en campo y ensayos de laboratorio que permitieron conocer la capacidad estructural de la subrasante natural y las condiciones de la estructura de pavimento actual, los cuales complementados con la ejecución de pruebas de campo no destructivas suministran la información suficiente para acometer las actividades de diseño.

### 5.1 Características geotécnicas

El objetivo de la prospección geotécnica para pavimentos es obtener muestras y realizar ensayos que permitan determinar las principales características de los suelos subrasantes y las capas que conforman la estructura del pavimento. Para la verificación de cómo está compuesta la estructura de pavimento con la caracterización de los materiales que conforman; dentro del programa de exploración del subsuelo; por lo tanto, se ejecutaron las siguientes actividades:

- Registro adecuado de los materiales encontrados a lo largo de los perfiles de cada ápice en las diversas capas y/o estratos de suelo.
- Definición de las características geotécnicas más relevantes.
- Ensayos de Laboratorio comprendidos por: Límites de Atterberg, Clasificación, Humedad y CBR.

**Tabla 4**

*Total de Ensayos según la norma establecida*

ENSAYOS REALIZADO		
ENSAYOS	CANTIDAD	NORMA
Perfil Estratigráfico	18	NTC 1504:2000
Granulometría	39	INV E 123:2007
Límites de Consistencia	39	INV E 125:2007/126:2007
Humedad Natural	39	INV E 122:2007
Ensayo de Capacidad de Soporte	18	INV E 148-2007

*Nota.* Elaboración Propia.

## 5.2 Subrasante

Sobre las muestras tomadas a nivel de subrasante se desarrollaron ensayos para poder definir las propiedades geomecánicas de estos materiales. Para analizar la subrasante se toma la información obtenida en los apiques desarrollados por el CONSORCIO SENER MAGDALENA 2, en la especialidad de Pavimentos. Tal y como se muestra a continuación, se realiza el planteamiento de datos iniciales como lo son; número de apique, calzada, abscisa y georreferencia. Así mismo, se muestran los resultados obtenidos de los espesores y profundidades en cada abscisa:

**Tabla 5**

*Campaña de exploración (Ensayos destructivos)*

# ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

47

# Apique	Abscisa	Costado de Calzada	Coordenadas		# Apique	Profundidad (m)	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Descripción	
			N	W						
AP Inicial 16	PR62+200.0	Norte a Sur	1047128.98	1502112.41	AP Inicial 16	0.00	0.30	0.30	0.15	Carpeta asfáltica en buen estado (Geotextil)
						0.30	0.60	0.30	0.45	Grava limo arenosa habana humedad baja compacta
						0.60	1.50	0.90	1.05	Arcilla limosa rojiza tonos habanos presencia de gravas finas y medias escasas consistencia alta humedad y plasticidad media
APC 47	K62+450.0	Norte a Sur	1047303.03	1502286.84	APC 47	0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con agrietamiento y parcheo
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.10	0.50	0.40	0.30	Carpeta asfáltica
						0.50	0.65	0.15	0.58	Material granular habano amarillo con gravas redondeadas densas humedad optima
						0.65	1.50	0.85	1.08	Arcilla limosa rojiza humedad moderada consistencia media
APC 48	K62+700.0	Norte a Sur	1047542.91	1502352.91	APC 48	0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con agrietamiento y parcheo
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.10	0.30	0.20	0.20	Carpeta asfáltica
						0.30	0.50	0.20	0.40	Material granular habano areno limoso amarillo compacto, gradado con sobre tamaño de 4" en un 10% humedad optima
						0.50	1.50	1.00	1.00	Acilla limosa rojiza humedad moderada consistencia media con gravas fina
APC 49	K62+950.0	Norte a Sur	1047788.48	1502399.75	APC 49	0.00	0.45	0.45	0.23	Carpeta agrietamiento
						0.45	0.65	0.20	0.55	Material granular habano areno limoso, compacto sobre tamaño en 4" en un 10 %
						0.65	1.50	0.85	1.08	Arcilla limosa rojiza humedad moderada consistencia media gravas finas
APC 50	K63+200.0	Norte a Sur	1047803.405	1502441.659	APC 50	0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamiento

# ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

48

# Apique	Abscisa	Costado de Calzada	Coordenadas		# Apique	Profundidad (m)	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Descripción	
			N	W						
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.10	0.45	0.35	0.28	Carpeta asfáltica
						0.45	0.75	0.30	0.60	Material granular gris habano areno limoso, compacto gravas densas redondeadas
						0.75	0.85	0.10	0.80	Arcilla limosa con gravas fina rojiza humedad moderada consistencia media
						0.85	1.50	0.65	1.18	Arcilla limosa gravas finas habana humedad moderada consistencia media
APC 51	K63+450.0	Norte a Sur	1048377.83	1502512.27	APC 51	0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.10	0.50	0.40	0.30	Carpeta asfáltica
						0.50	0.60	0.10	0.55	Material granular arenoso gravas densas humedad optima color amarillo
						0.60	1.50	0.90	1.05	Arcilla limosa habana vetas blancas rojiza humedad moderada consistencia media
APC 52	K63+700.0	Norte a Sur	1048520.04	1502558.63	APC 52	0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamientos
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.10	0.50	0.40	0.30	Carpeta asfáltica
						0.50	0.60	0.10	0.55	Material granular arenoso gravas densas humedad optima color amarillo
						0.60	1.50	0.90	1.05	Arcilla limosa habana vetas blancas rojiza humedad moderada consistencia media
APC 53	K63+950.0	Norte a Sur	1048737.28	1502682.28	APC 53	0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamientos
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.10	0.35	0.25	0.23	Carpeta asfáltica

# ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

49

# Apique	Abscisa	Costado de Calzada	Coordenadas		# Apique	Profundidad (m)	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Descripción	
			N	W						
AP Inicial 17	PR64+200.0	Norte a Sur	1048953.58	1502807.64	AP Inicial 17	0.50	1.10	0.60	0.80	Material granular amarillo areno limoso gravas densas humedad optima compacto
						1.10	1.50	0.40	1.30	Arcilla limosa amarillo habano humedad moderada consistencia media con gravas finas
						0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con agrietamientos y parcheo
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.00	0.22	0.22	0.11	Carpeta asfáltica
						0.22	0.50	0.28	0.36	Grava limo arenosa carmelito de tamaño máximo < a 1" humedad baja bien compacta
						0.50	0.90	0.40	0.70	Grava limo arenosa amarilla ocre humedad baja bien compacta
APC 54	K64+450.0	Norte a Sur	1049173.09	1502927.19	APC 54	0.90	1.50	0.60	1.20	Limo areno arcilloso amarillo ocre consistencia alta plasticidad baja
						0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamientos
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.10	0.35	0.25	0.23	Carpeta asfáltica
APC 55	K64+700.0	Norte a Sur	1049396.39	1503039.62	APC 55	0.50	1.10	0.60	0.80	Material granular amarillo areno limoso gravas densas humedad optima compacto
						1.10	1.50	0.40	1.30	Arcilla limosa amarillo habano humedad moderada consistencia media con gravas finas
						0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con agrietamientos y parcheo
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.10	0.35	0.25	0.23	Carpeta asfáltica
0.45	1.05	0.60	0.75	Material granular arenoso limoso amarillo habano gradado y compacto sobre tamaño de 3" en un 10%						

# ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

50

# Apique	Abscisa	Costado de Calzada	Coordenadas		# Apique	Profundidad (m)	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Descripción	
			N	W						
APC 56	K64+950.0	Norte a Sur	1049619.54	1503152.33	APC 56	1.05	1.50	0.45	1.28	Gravas arcillosas con arenas y limo habano vetas rojiza consistencia alta humedad moderada
						0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamientos
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.10	0.45	0.35	0.28	Carpeta asfáltica
						0.45	0.90	0.45	0.68	Material granular amarillo presenta sobre tamaño de 4 y 5 2 en un 10% compacta humedad optima gradado
APC 57	K65+200.0	Norte a Sur	1049827.47	1503290.78	APC 57	0.90	1.50	0.60	1.20	Arcilla limosa carmelito habano humedad moderada consistencia media
						0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con agrietamiento y parcheo
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.10	0.40	0.30	0.25	Carpeta asfáltica
						0.40	0.70	0.30	0.55	Material granular habano areno limoso compacta humedad optima gravas densas amarilla
APC 58	K65+450.0	Norte a Sur	1050036.53	1503427.36	APC 58	0.70	1.50	0.80	1.10	Arena arcillosa limosa con presencia de gravas amarilla humedad moderada consistencia media
						0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamientos
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.10	0.40	0.30	0.25	Carpeta asfáltica
						0.40	0.80	0.40	0.60	Material granular habano areno limoso amarillo ocre compacto, humedad optima gravas densas redondeadas presenta tamaños de 4" y 5" en un 20%
APC 59	K65+700.0	Norte a Sur	1050272.05	1503510.32	APC 59	0.80	1.50	0.70	1.15	Arena arcillosa algo limosa habana marrón humedad moderada consistencia media gravas fina
						0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamientos
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra

# ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

51

# Apique	Abscisa	Costado de Calzada	Coordenadas		# Apique	Profundidad (m)	Espesor (m)	Profundidad media (m)	Descripción	
			N	W						
						0.10	0.45	0.35	0.28	Carpeta asfáltica
						0.45	0.90	0.45	0.68	Material granular areno limoso gradada humedad optima, compacto
						0.90	1.50	0.60	1.20	Arcilla limosa gris verdoso humedad moderada consistencia media gravas finas
APC 60	K65+950.0	Norte a Sur	1050510.10	1503586.55	APC 60	0.00	0.10	0.10	0.05	Carpeta asfáltica con agrietamientos y parcheo
						0.10	0.10	0.00	0.10	Malla en fibra
						0.10	0.45	0.35	0.28	Carpeta asfáltica
						0.45	0.75	0.30	0.60	Material granular habano areno limoso gradado, compacto
						0.75	0.90	0.15	0.83	Formación rocosa matriz arenosa sobre tamaños
AP Inicial 18	PR66+200.0	Norte a Sur	1050736.41	1503692.60	AP Inicial 18	0.00	0.35	0.35	0.18	Carpeta asfáltica
						0.35	0.70	0.35	0.53	Grava limo arenosa amarilla humedad baja plasticidad baja compacta
						0.70	1.50	0.80	1.10	Arena limo arcillosa rojiza tonos habanos gravas finas plasticidad baja
APC 61	K66+450.0	Norte a Sur	1050963.49	1503796.95	APC 61	0.00	0.45	0.45	0.23	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamiento
						0.45	0.70	0.25	0.58	Material granular amarillo ocre habano areno limoso, compacto con gravas densas redondeadas
						0.70	0.90	0.20	0.80	Conglomerado fino arenas arcillosas limosas con gravas rojizo ocre humedad moderada consistencia media gravas finas
						0.90	1.50	0.60	1.20	Arena arcillosa carmelito habano humedad moderada consistencia media presencia gravas finas

Nota. Elaboración propia

ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

52

En cuanto a los ensayos de laboratorio, se realizan según las muestras de los diferentes apiques realizados que se especifican en la tabla 8. Campaña de exploración (Ensayos destructivos); en donde, se realizan ensayos de clasificación por la metodología USCS y la metodología AASHTO, a continuación, se muestran los resultados obtenidos de los laboratorios encontrando su clasificación, granulometría, límites de consistencia y CBR:

**Tabla 6**

*Resultados ensayos de clasificación*

# Apique	Profundidad (m)		Clasificación		Granulometría			Wn (%)	Límites de Consistencia, %			Índice de Liquidez IL	CBR%					
			USCS	AASHTO	% Gravas	% Arenas	% Finos		Límites de Consistencia, %				Inalterado		Sumergido			
									LL	LP	IP							
AP Inicial 16	0.00	0.30																
	0.30	0.60	GM	A-1-b (0)	43.00	42.60	14.50	6.70	N.L.L.	N.L.P.	N.P.							
	0.60	1.50	CL	A-6 (3)	14.90	30.60	54.60	8.60	26.00	15.00	11.00	-0.58	11.30	11.60	4.80	4.70		
APC 47	0.00	0.10																
	0.10	0.10																
	0.10	0.50																
	0.50	0.65	GM	A-1-b (0)	0.44	0.38	0.18	7.70	N.L.L.	N.L.P.	N.P.							



ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

54

# Apique	Profundidad (m)		Clasificación		Granulometría			Wn (%)	Límites de Consistencia, %			Índice de Liquidez IL	CBR%				
			USCS	AASHTO	% Gravas	% Arenas	% Finos		LL	LP	IP		Inalterado		Sumergido		
	0.50	0.60	GM	A-1-b (0)	0.42	0.41	0.16	7.70	N.L.L.	N.L.P.	N.P.						
	0.60	1.50	CL	A-4 (2)	0.09	0.41	0.50	11.70	28.00	18.40	9.60	-0.70	6.80	7.50	3.20	3.60	
APC 52	0.00	0.10															
	0.10	0.10															
	0.10	0.50															
	0.50	0.60	GM	A-1-b (0)	0.48	0.35	0.17	5.30	N.L.L.	N.L.P.	N.P.						
	0.60	1.50	CL	A-4 (2)	0.14	0.35	0.50	12.60	28.00	18.70	9.30	-0.66	9.00	8.70	5.30	5.10	
APC 53	0.00	0.10															
	0.10	0.10															
	0.10	0.35															
	0.50	1.10	GM	A-1-b (0)	0.48	0.34	0.18	11.20	N.L.L.	N.L.P.	N.P.						
	1.10	1.50	CL	A-4 (2)	0.06	0.42	0.52	7.80	23.00	14.00	9.00	-0.69	8.60	7.30	4.20	3.80	
AP Inicial 17	0.00	0.10															
	0.10	0.10															
	0.00	0.22															
	0.22	0.50	GM	A-1-b (0)	44.00	39.80	16.20	6.60	N.L.L.	N.L.P.	N.P.						
	0.50	0.90	GM	A-2-4 (0)	43.70	29.80	26.50	5.80	N.L.L.	N.L.P.	N.P.						
	0.90	1.50	SC	A-2-4 (0)	34.30	39.10	26.60	11.10	26.00	17.80	8.20	-0.82					

ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

55

# Apique	Profundidad (m)		Clasificación		Granulometría			Wn (%)	Límites de Consistencia, %			Índice de Liquidez IL	CBR%				
			USCS	AASHTO	% Gravas	% Arenas	% Finos		Límites de Consistencia, %				Inalterado	Sumergido			
									LL	LP	IP						
APC 54	0.00	0.10															
	0.10	0.10															
	0.10	0.35															
	0.50	1.10	GM	A-1-b (0)	0.48	0.34	0.18	11.20	N.L.L.	N.L.P.	N.P.						
	1.10	1.50	CL	A-4 (2)	0.06	0.42	0.52	7.80	23.00	14.00	9.00	-0.69	13.00	12.10	8.20	8.30	
APC 55	0.00	0.10															
	0.10	0.10															
	0.10	0.35															
	0.45	1.05	GM	A-1-b (0)	0.40	0.36	0.23	4.70	N.L.L.	N.L.P.	N.P.						
	1.05	1.50	GC	A-2-4 (0)	0.40	0.35	0.25	7.20	22.00	14.30	7.70	-0.92					
APC 56	0.00	0.10															
	0.10	0.10															
	0.10	0.45															
	0.45	0.90	GM	A-1-b (0)	0.52	0.30	0.18	6.20	N.L.L.	N.L.P.	N.P.						
	0.90	1.50	CL	A-4 (5)	0.03	0.12	0.85	14.20	22.00	13.40	8.60	0.09	5.30	6.00	2.20	2.40	
APC 57	0.00	0.10															
	0.10	0.10															
	0.10	0.40															
	0.40	0.70	GM	A-1-b (0)	0.45	0.39	0.16	5.50	N.L.L.	N.L.P.	N.P.						
	0.70	1.50	SC	A-4 (0)	0.16	0.47	0.37	9.00	21.00	12.20	8.80	-0.36	17.10	16.50	8.80	8.30	

ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

56

# Apique	Profundidad (m)		Clasificación		Granulometría			Wn (%)	Límites de Consistencia, %			Índice de Liquidez IL	CBR%			
			USCS	AASHTO	% Gravas	% Arenas	% Finos		LL	LP	IP		Inalterado		Sumergido	
APC 58	0.00	0.10														
	0.10	0.10														
	0.10	0.40														
	0.40	0.80	GM	A-1-b (0)	0.52	0.36	0.12	7.20	N.L.L.	N.L.P.	N.P.					
	0.80	1.50	SC	A-6 (2)	0.16	0.44	0.41	10.10	30.00	14.80	15.20	-0.31	12.60	10.70	8.10	7.30
APC 59	0.00	0.10														
	0.10	0.10														
	0.10	0.45														
	0.45	0.90	GM	A-1-b (0)	0.43	0.37	0.21	7.20	N.L.L.	N.L.P.	N.P.					
	0.90	1.50	CL	A-4 (4)	0.12	0.19	0.70	13.40	22.00	11.60	10.40	0.17	5.30	5.50	3.00	2.80
APC 60	0.00	0.10														
	0.10	0.10														
	0.10	0.45														
	0.45	0.75	GM	A-1-b (0)	0.40	0.37	0.23	5.50	N.L.L.	N.L.P.	N.P.					
	0.75	0.90	GM	A-1-b (0)	0.69	0.19	0.12	7.40	N.L.L.	N.L.P.	N.P.					
AP Inicial 18	0.00	0.35														
	0.35	0.70	GC-GM	A-1-b (0)	46.80	38.10	15.10	5.30	22.00	16.10	5.90	-1.83				
	0.70	1.50	SC	A-2-4 (0)	29.80	47.10	23.10	9.30	26.00	17.80	8.20	-1.04				
APC 61	0.00	0.45														
	0.45	0.70	GM	A-1-b (0)	0.41	0.38	0.21	6.50	N.L.L.	N.L.P.	N.P.					

# ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

57

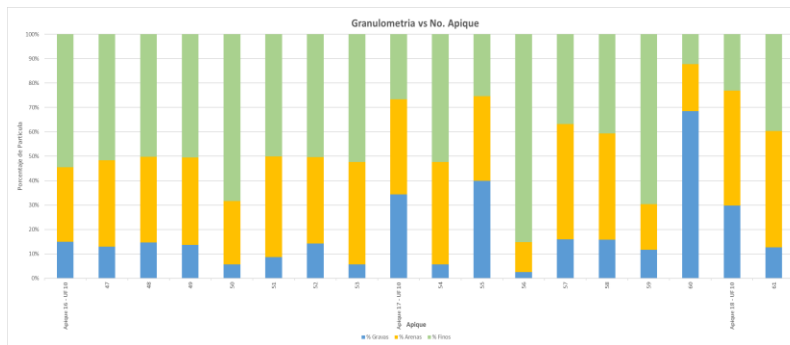
# Apique	Profundidad (m)		Clasificación		Granulometría			Wn (%)	Límites de Consistencia, %			Índice de Liquidez IL	CBR%					
			USCS	AASHTO	% Gravas	% Arenas	% Finos		LL	LP	IP		Inalterado		Sumergido			
	0.70	0.90	SC-SM	A-2-4 (0)	0.15	0.53	0.32	8.90	25.00	17.90	7.10	-1.27						
	0.90	1.50	SC	A-4 (0)	0.13	0.48	0.40	18.90	28.00	19.40	8.60	-0.06	12.10	11.70	9.10	7.90		

Nota. Elaboración propia

En cuanto a la granulometría, los resultados obtenidos indican que predominan los suelos finos tipo limos y arcillas, aunque existen suelos granulares; se debe recordar que, si el contenido de finos es superior al 35%, predominará el comportamiento de la fracción fina:

**Figura 13**

*Granulometría de materiales constituyentes de la subrasante.*

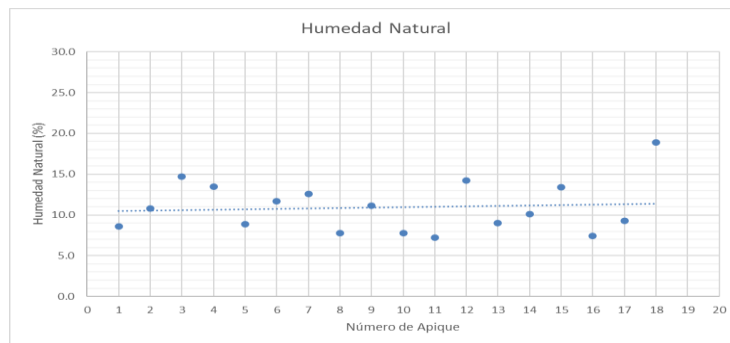


Nota. Elaboración Propia.

En cuanto a la variación de la humedad natural se tiene que los valores varían entre 7.2% y 20%.

**Figura 14**

*Humedad natural de materiales constituyentes de la subrasante.*

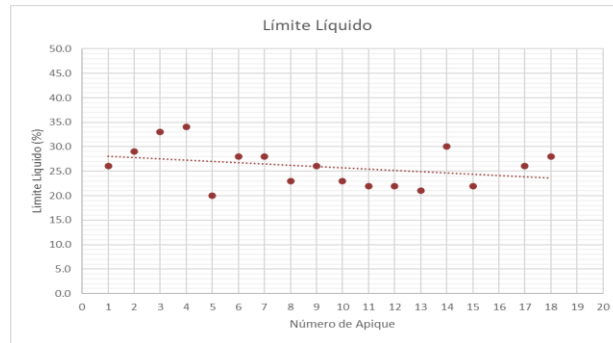


Nota. Elaboración Propia.

Para el caso del Límite Líquido se tiene que los valores oscilan entre 34.0% y 20.0%, tal como se presenta a continuación:

**Figura 15**

*Límite líquido de materiales constituyentes de la subrasante.*

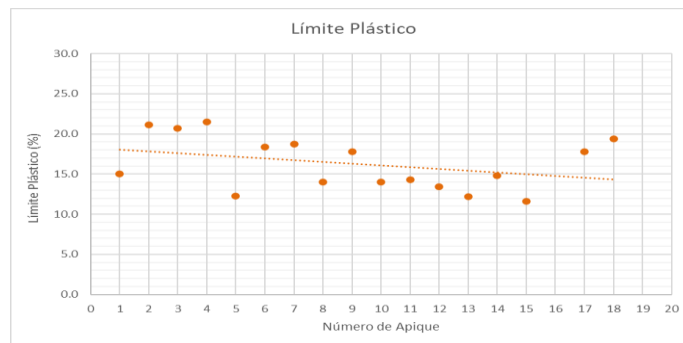


Nota. Elaboración Propia.

En cuanto al Límite Plástico se tiene que los valores oscilan entre 11.6% y 21.5%, tal como se presenta a continuación:

**Figura 16**

*Límite plástico de materiales constituyentes de la subrasante.*

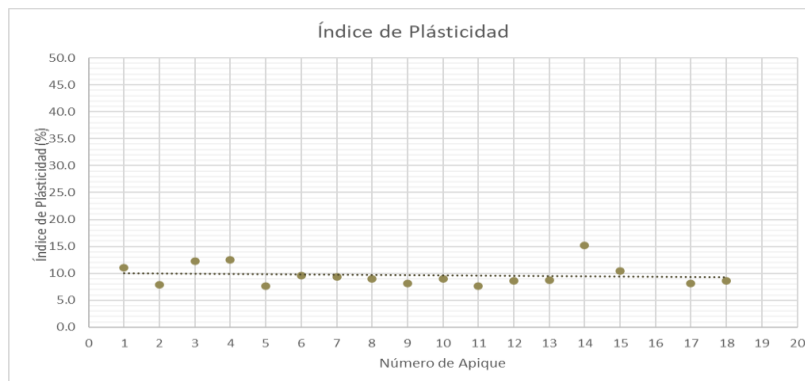


Nota. Elaboración Propia.

Para el Índice de plasticidad se obtiene que la variación esta entre 7.7% y 15.2% de acuerdo con lo presentado:

**Figura 17**

*Índice de plasticidad de materiales constituyentes de la subrasante.*

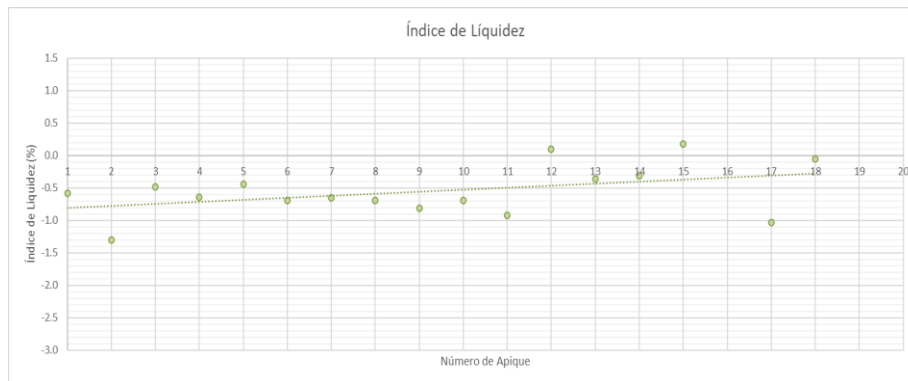


Nota. Elaboración Propia.

Para el Índice de Liquidez se tiene que este varía entre -1.3 y 0.17, con lo cual se infiere una tendencia a encontrar suelos sobre consolidados y dado que solo se presenta en una muestra el índice de liquidez superior a 1, se descarta la existencia de suelos altamente sensitivos susceptibles a remodelarse.

**Figura 18**

*Índice de liquidez de materiales constituyentes de la subrasante.*



Nota. Elaboración Propia.

Su comportamiento mecánico será adverso a aceptable y su capacidad de drenaje será baja, casi impermeable en su mayor parte. por lo que se debe pensar en una apropiada red de drenaje superficial y subsuperficial, para soportar la construcción de obras de infraestructura. El Índice de plasticidad (IP) y el Límite Líquido (LL). Hay un nivel en el que el IP cambia, al igual que los límites LL y LP. Los valores generales del índice de plasticidad superan el 7.7% y alcanzan el 15.2%, lo que indica que es ligeramente plástico y baja plasticidad, según la siguiente tabla:

**Tabla 7**

*Plasticidad de la subrasante.*

IP	DESCRIPCIÓN
0 - 3	No plástico
	ligeramente
3 - 15	plástico
15 - 30	Baja plasticidad

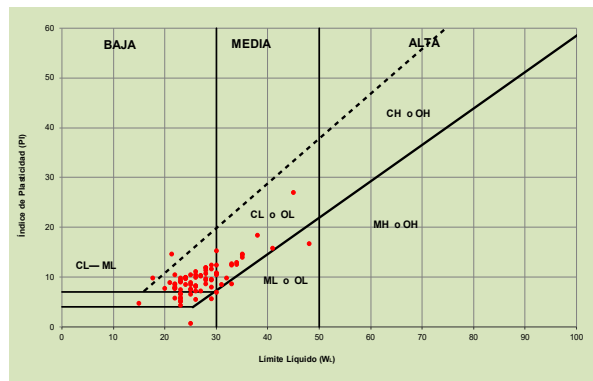
>30 Alta plasticidad

Nota. Tomado de “Diseño estructural de pavimentos hidráulicos y asfálticos”, M. Farfan (2017) <https://es.slideshare.net/slideshow/clase-01-suelos-de-subrasante/75066648>

En cuanto a la clasificación de los suelos en la carta de plasticidad de Casagrande se obtiene lo siguiente:

Figura 19

Clasificación de los materiales de subrasante según su plasticidad



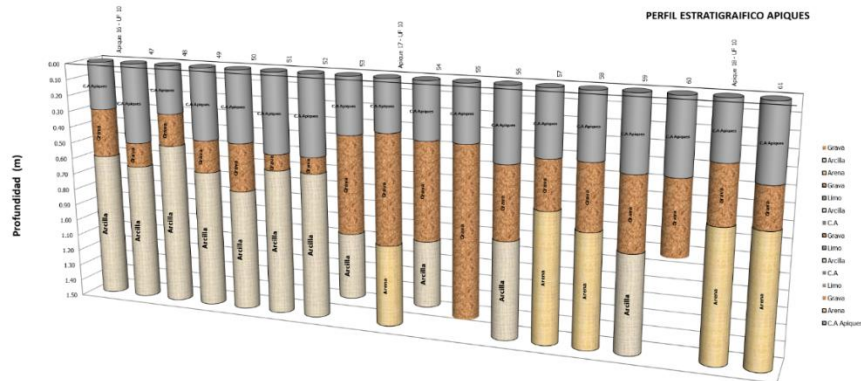
Nota. Elaboración propia.

Los resultados encontrados en la exploración de referencia se ubicaron en la carta de plasticidad de Casagrande, encontrando que todos los valores están por encima de la línea A, clasificando como arcillas de alta plasticidad.

El perfil estratigráfico resultado de los apiques se muestra a continuación:

Figura 20

Perfil estratigráfico de espesores obtenidos por apiques



Nota. Elaboración Propia.

### 5.3 Contenido orgánico

Se ha determinado un valor de materia orgánica promedio de 0,68%, y dada la desviación de estos resultados, que esta del orden de 0,38%, lo que se considera que no se requerirá acciones para contrarrestar esta condición de materia orgánica, pero se debe contemplar la acción de adición de cal en las zonas donde se encuentren suelos subrasante donde se detecten suelos con altos contenidos de materia orgánica. Tal y como se muestra a continuación:

Tabla 8

Valores de contenido de material orgánica en los apiques explorados según los laboratorios realizados

# Apique	Profundidad (m)		Descripción	Contenido de Materia Orgánica
				C. DE MATERIA ORGANICA (%)
AP Inicial LG	0.00	0.30	Carpeta asfáltica en buen estado (Geotextil)	
	0.30	0.60	Grava limo arenosa habana humedad baja compacta	0.78

# Apique	Profundidad (m)		Descripción	Contenido de Materia Orgánica
				C. DE MATERIA ORGANICA (%)
	0.60	1.50	Arcilla limosa rojiza tonos habanos presencia de gravas finas y medias escasas consistencia alta humedad y plasticidad media	1.52
APC 47	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con agrietamiento y parcheo	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.10	0.50	Carpeta asfáltica	
	0.50	0.65	Material granular habano amarillo con gravas redondeadas densas humedad optima	0,26
	0.65	1.50	Arcilla limosa rojiza humedad moderada consistencia media	0,95
APC 48	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con agrietamiento y parcheo	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.10	0.30	Carpeta asfáltica	
	0.30	0.50	Material granular habano areno limoso amarillo compacto, gradado con sobre tamaño de 4" en un 10% humedad optima	0,20
	0.50	1.50	Acilla limosa rojiza humedad moderada consistencia media con gravas fina	1,05
APC 49	0.00	0.45	Carpeta agrietamiento	
	0.45	0.65	Material granular habano areno limoso, compacto sobre tamaño en 4" en un 10 %	0,21
	0.65	1.50	Arcilla limosa rojiza humedad moderada consistencia media gravas finas	1,08
APC 50	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamiento	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.10	0.45	Carpeta asfáltica	
	0.45	0.75	Material granular gris habano areno limoso, compacto gravas densas redondeadas	0,27
	0.75	0.85	Arcilla limosa con gravas fina rojiza humedad moderada consistencia media	1,02
	0.85	1.50	Arcilla limosa gravas finas habana humedad moderada consistencia media	1,27
APC 51	0.00	0.10	Carpeta asfáltica	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.10	0.50	Carpeta asfáltica	
	0.50	0.60	Material granular arenoso gravas densas humedad optima color amarillo	0,20
	0.60	1.50	Arcilla limosa habana vetas blancas rojiza humedad moderada consistencia media	0,92
APC 52	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamientos	
	0.10	0.10	Malla en fibra	

# Apique	Profundidad (m)		Descripción	Contenido de Materia Orgánica
				C. DE MATERIA ORGANICA (%)
	0.10	0.50	Carpeta asfáltica	
	0.50	0.60	Material granular arenoso gravas densas humedad optima color amarillo	0,22
	0.60	1.50	Arcilla limosa habana vetas blancas rojiza humedad moderada consistencia media	0,86
APC 53	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamientos	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.10	0.35	Carpeta asfáltica	
	0.50	1.10	Material granular amarillo areno limoso gravas densas humedad optima compacto	0,24
	1.10	1.50	Arcilla limosa amarillo habano humedad moderada consistencia media con gravas finas	0,79
AP Inicial 17	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con agrietamientos y parcheo	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.00	0.22	Carpeta asfáltica	
	0.22	0.50	Grava limo arenosa carmelito de tamaño máximo < a 1" humedad baja bien compacta	0.14
	0.50	0.90	Grava limo arenosa amarilla ocre humedad baja bien compacta	0.11
APC 54	0.90	1.50	Limo areno arcilloso amarillo ocre consistencia alta plasticidad baja	1.28
	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamientos	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.10	0.35	Carpeta asfáltica	
	0.50	1.10	Material granular amarillo areno limoso gravas densas humedad optima compacto	0,26
APC 55	1.10	1.50	Arcilla limosa amarillo habano humedad moderada consistencia media con gravas finas	0,81
	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con agrietamientos y parcheo	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.10	0.35	Carpeta asfáltica	
	0.45	1.05	Material gran anular arenoso limoso amarillo habano gradado y compacto sobre tamaño de 3" en un 10%	0,20
APC 56	1.05	1.50	Gravas arcillosas con arenas y limo habano vetas rojiza consistencia alta humedad moderada	0,99
	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamientos	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.10	0.45	Carpeta asfáltica	
	0.45	0.90	Material granular amarillo presenta sobre tamaño de 4 y 5 2 en un 10% compacta humedad optima gradado	0,23

# Apique	Profundidad (m)		Descripción	Contenido de Materia Orgánica
				C. DE MATERIA ORGANICA (%)
APC 57	0.90	1.50	Arcilla limosa carmelito habano humedad moderada consistencia media	0,91
	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con agrietamiento y parcheo	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.10	0.40	Carpeta asfáltica	
	0.40	0.70	Material granular habano areno limoso compacta humedad optima gravas densas amarilla	0,17
APC 58	0.70	1.50	Arena arcillosa limosa con presencia de gravas amarilla humedad moderada consistencia media	0,58
	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamientos	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.10	0.40	Carpeta asfáltica	
APC 59	0.40	0.80	Material granular habano areno limoso amarillo ocre compacto, humedad optima gravas densas redondeadas presenta tamaños de 4" y 5" en un 20%	0,15
	0.80	1.50	Arena arcillosa algo limosa habana marrón humedad moderada consistencia media gravas fina	0,61
	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamientos	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.10	0.45	Carpeta asfáltica	
APC 60	0.45	0.90	Material granular areno limoso gradada humedad optima, compacto	0,26
	0.90	1.50	Arcilla limosa gris verdoso humedad moderada consistencia media gravas finas	0,88
	0.00	0.10	Carpeta asfáltica con agrietamientos y parcheo	
	0.10	0.10	Malla en fibra	
	0.10	0.45	Carpeta asfáltica	
AP Inicial 18	0.45	0.75	Material granular habano areno limoso gradado, compacto	0,21
	0.75	0.90	Formación rocosa matriz arenosa sobre tamaños	0,09
	0.00	0.35	Carpeta asfáltica	
APC 61	0.35	0.70	Grava limo arenosa amarilla humedad baja plasticidad baja compacta	0,17
	0.70	1.50	Arena limo arcillosa rojiza tonos habanos gravas finas plasticidad baja	0,15
	0.00	0.45	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamiento	
	0.45	0.70	Carpeta asfáltica con parcheo y agrietamiento	
APC 61	0.45	0.70	Material granular amarillo ocre habano areno limoso, compacto con gravas densas redondeadas	0,20
	0.70	0.90	Conglomerado fino arenas arcillosas limosas con gravas rojizo ocre humedad moderada consistencia media gravas finas	0,72

# Aplique	Profundidad (m)	Descripción	Contenido de Materia Orgánica
	0.90	1.50	Arena arcillosa carmelito habano humedad moderada consistencia media presencia gravas finas
			C. DE MATERIA ORGANICA (%)
			0,86

Nota. Elaboración propia

### 5.4 Deflexión D0 - medición con FWD

Las deflexiones de campo se deben estandarizar mediante unos factores de corrección, con la finalidad de trabajar con valores para carga de 40 KN y a una temperatura de 20°C, sin embargo y dadas las condiciones del corredor y con base en la temperatura de la zona, se estandariza la corrección de la temperatura como reza en el anexo C de la Guía de rehabilitación en el numeral C.7, considerando que para el corredor este valor será igual a la unidad (1.0), así las cosas, se establece lo siguiente:

**Tabla 9**

#### Evaluación Deflectometría cualitativa

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL, FUNCIONAL Y SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS  
DEL PROYECTO TRONCAL DEL MAGDALENA II  
DETERMINACIÓN INDICADOR E16: CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Datos de Campo		Temp. Pavimento BELLS	Deflexiones Normalizadas por Carga Carga Estándar: 40 kN										Evaluación Deflectométrica Cualitativa						
Carril	Abscisa		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D0 (µm)	ICB=d0-d300	ICM=d300-d600	ICI=d600-d900				
		°C	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	Valor	Calif.	Valor	Calif.	Valor	Calif.	Valor	Calif.
Descendente	K62+200	26.2	124	80	72	58	46	29	18	12	8	124	Buena	54	Buena	25	Buena	17	Buena
Descendente	K62+250	25.7	184	136	126	111	92	63	44	30	20	184	Buena	59	Buena	34	Buena	27	Buena
Descendente	K62+300	25.9	95	62	55	46	37	26	20	16	15	95	Buena	40	Buena	18	Buena	10	Buena
Descendente	K62+350	25.4	99	59	55	47	39	28	21	16	13	99	Buena	45	Buena	16	Buena	10	Buena
Descendente	K62+400	25.5	105	60	54	46	37	29	23	18	14	105	Buena	52	Buena	16	Buena	8	Buena
Descendente	K62+450	25.2	150	108	96	78	62	40	28	21	16	150	Buena	55	Buena	34	Buena	22	Buena

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL, FUNCIONAL Y SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS  
DEL PROYECTO TRONCAL DEL MAGDALENA II  
DETERMINACIÓN INDICADOR E16: CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Datos de Campo		Temp. Pavimento BELLS	Deflexiones Normalizadas por Carga Carga Estándar: 40 kN										Evaluación Deflectométrica Cualitativa						
Carril	Abscisa		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D0 (µm)	ICB=d0-d300	ICM=d300-d600	ICI=d600-d900				
		°C	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	Valor	Calif.	Valor	Calif.	Valor	Calif.	Valor	Calif.
Descendente	K62+500	25.1	182	123	108	86	66	43	30	21	16	182	Buena	75	Buena	41	Buena	23	Buena
Descendente	K62+550	25.0	99	57	52	47	41	32	26	21	16	99	Buena	48	Buena	10	Buena	9	Buena
Descendente	K62+600	25.0	149	105	99	85	70	50	37	25	19	149	Buena	51	Buena	28	Buena	19	Buena
Descendente	K62+650	25.1	112	78	74	68	61	48	40	31	25	112	Buena	39	Buena	14	Buena	12	Buena
Descendente	K62+700	25.4	77	40	37	35	32	26	22	19	17	77	Buena	40	Buena	4	Buena	6	Buena
Descendente	K62+750	25.4	138	101	92	86	75	61	48	36	29	138	Buena	47	Buena	17	Buena	14	Buena
Descendente	K62+800	24.7	168	121	114	99	84	58	45	32	22	168	Buena	54	Buena	30	Buena	26	Buena
Descendente	K62+850	25.6	229	157	143	123	101	71	53	38	27	229	Buena	87	Buena	41	Buena	29	Buena
Descendente	K62+900	25.7	245	180	163	141	116	83	61	42	31	245	Buena	84	Buena	46	Buena	31	Buena
Descendente	K62+950	25.4	140	98	91	79	68	52	40	29	23	140	Buena	50	Buena	23	Buena	16	Buena
Descendente	K63+000	25.7	146	90	82	72	64	48	39	31	27	146	Buena	65	Buena	17	Buena	16	Buena
Descendente	K63+050	26.0	151	114	107	93	78	58	46	36	26	151	Buena	46	Buena	28	Buena	19	Buena
Descendente	K63+100	25.9	202	143	132	114	91	63	43	32	21	202	Buena	71	Buena	40	Buena	27	Buena
Descendente	K63+150	26.0	168	120	109	90	75	53	39	30	23	168	Buena	61	Buena	33	Buena	21	Buena
Descendente	K63+200	26.0	351	242	208	164	124	74	48	37	29	351	Buena	145	Buena	83	Buena	48	Buena
Descendente	K63+250	26.1	294	184	159	125	94	59	40	27	22	294	Buena	137	Buena	64	Buena	33	Buena
Descendente	K63+300	26.2	237	143	122	97	77	50	38	26	20	237	Buena	117	Buena	44	Buena	26	Buena
Descendente	K63+350	26.1	219	155	142	116	94	63	45	34	24	219	Buena	79	Buena	48	Buena	29	Buena
Descendente	K63+400	26.3	371	235	205	163	125	78	52	35	28	371	Buena	170	Buena	78	Buena	45	Buena
Descendente	K63+450	26.2	242	176	159	134	108	71	50	34	29	242	Buena	86	Buena	50	Buena	35	Buena
Descendente	K63+500	25.9	236	163	149	121	94	62	42	28	22	236	Buena	89	Buena	55	Buena	30	Buena
Descendente	K63+550	26.3	222	147	132	109	90	60	41	28	19	222	Buena	92	Buena	41	Buena	28	Buena
Descendente	K63+600	26.3	213	161	145	124	100	69	47	30	22	213	Buena	71	Buena	44	Buena	29	Buena
Descendente	K63+650	25.9	148	95	85	71	59	42	31	22	17	148	Buena	64	Buena	26	Buena	17	Buena
Descendente	K63+700	26.0	149	87	77	65	55	39	29	21	15	149	Buena	73	Buena	22	Buena	15	Buena
Descendente	K63+750	25.8	218	151	139	120	100	68	47	32	23	218	Buena	81	Buena	38	Buena	31	Buena
Descendente	K63+800	26.0	126	91	84	74	63	45	33	24	17	126	Buena	43	Buena	21	Buena	17	Buena

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL, FUNCIONAL Y SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS  
DEL PROYECTO TRONCAL DEL MAGDALENA II  
DETERMINACIÓN INDICADOR E16: CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Datos de Campo		Temp. Pavimento BELLS °C	Deflexiones Normalizadas por Carga Carga Estándar: 40 kN										Evaluación Deflectométrica Cualitativa						
Carril	Abscisa		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D0 (µm)	ICB=d0-d300	ICM=d300-d600	ICI=d600-d900				
		µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	Valor	Calif.	Valor	Calif.	Valor	Calif.	Valor	Calif.
Descendente	K63+850	26.0	211	139	125	107	91	63	46	35	24	211	Buena	87	Buena	34	Buena	27	Buena
Descendente	K63+900	26.4	147	113	107	95	83	65	48	35	27	147	Buena	42	Buena	23	Buena	16	Buena
Descendente	K63+950	25.9	211	149	136	113	93	64	45	32	24	211	Buena	76	Buena	43	Buena	27	Buena
Descendente	K64+000	26.1	171	116	104	85	68	49	37	24	20	171	Buena	68	Buena	36	Buena	19	Buena
Descendente	K64+050	26.2	319	207	184	146	113	66	42	27	18	319	Buena	137	Buena	70	Buena	45	Buena
Descendente	K64+100	26.3	252	193	177	151	122	81	57	36	22	252	Buena	77	Buena	54	Buena	39	Buena
Descendente	K64+150	26.3	481	350	296	226	160	78	46	34	23	481	Buena	189	Buena	134	Regular	79	Regular
Descendente	K64+200	25.9	137	100	90	75	65	49	38	31	23	137	Buena	49	Buena	24	Buena	15	Buena
Descendente	K64+250	26.4	163	101	88	70	55	38	28	20	18	163	Buena	77	Buena	33	Buena	16	Buena
Descendente	K64+300	26.0	152	91	81	64	51	36	27	20	17	152	Buena	72	Buena	30	Buena	14	Buena
Descendente	K64+350	25.9	168	104	90	75	62	44	35	27	24	168	Buena	79	Buena	28	Buena	17	Buena
Descendente	K64+400	25.9	94	60	54	47	40	30	24	19	16	94	Buena	41	Buena	13	Buena	9	Buena
Descendente	K64+450	25.8	151	94	82	68	52	34	24	18	11	151	Buena	70	Buena	30	Buena	18	Buena
Descendente	K64+500	25.7	178	122	109	90	73	51	38	29	22	178	Buena	71	Buena	35	Buena	21	Buena
Descendente	K64+550	26.0	131	76	67	58	49	37	30	24	20	131	Buena	65	Buena	18	Buena	11	Buena
Descendente	K64+600	25.9	146	93	84	68	58	44	34	30	21	146	Buena	63	Buena	25	Buena	13	Buena
Descendente	K64+650	25.6	144	100	83	66	52	36	26	20	17	144	Buena	61	Buena	31	Buena	15	Buena
Descendente	K64+700	25.9	309	225	202	166	139	89	61	43	30	309	Buena	109	Buena	63	Buena	48	Buena
Descendente	K64+750	25.7	194	114	100	83	68	46	32	23	21	194	Buena	96	Buena	31	Buena	21	Buena
Descendente	K64+800	25.8	201	150	139	121	104	75	56	39	27	201	Buena	64	Buena	35	Buena	27	Buena
Descendente	K64+850	26.0	234	161	146	124	102	70	52	38	31	234	Buena	90	Buena	43	Buena	30	Buena
Descendente	K64+900	25.7	152	108	101	87	76	59	46	35	30	152	Buena	52	Buena	25	Buena	17	Buena
Descendente	K64+950	26.0	323	231	209	176	144	99	72	50	38	323	Buena	116	Buena	65	Buena	43	Buena
Descendente	K65+000	26.3	295	237	218	184	150	106	70	47	34	295	Buena	80	Buena	67	Buena	42	Buena
Descendente	K65+050	26.5	157	104	95	84	72	52	40	31	23	157	Buena	63	Buena	23	Buena	19	Buena
Descendente	K65+100	27.1	85	53	49	42	38	29	23	18	15	85	Buena	38	Buena	10	Buena	8	Buena
Descendente	K65+150	26.9	144	98	87	74	61	45	32	24	16	144	Buena	59	Buena	25	Buena	15	Buena

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL, FUNCIONAL Y SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS  
DEL PROYECTO TRONCAL DEL MAGDALENA II  
DETERMINACIÓN INDICADOR E16: CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Datos de Campo		Temp. Pavimento BELLS	Deflexiones Normalizadas por Carga Carga Estándar: 40 kN										Evaluación Deflectométrica Cualitativa						
Carril	Abscisa		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D0 (µm)	ICB=d0-d300	ICM=d300-d600	ICI=d600-d900				
		°C	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	µm	Valor	Calif.	Valor	Calif.	Valor	Calif.	Valor	Calif.
Descendente	K65+200	27.0	177	119	112	90	73	50	36	26	19	177	Buena	68	Buena	38	Buena	20	Buena
Descendente	K65+250	27.1	163	113	102	86	70	48	35	26	19	163	Buena	64	Buena	31	Buena	20	Buena
Descendente	K65+300	27.0	122	84	78	68	59	44	35	26	21	122	Buena	47	Buena	19	Buena	13	Buena
Descendente	K65+350	27.2	124	81	69	58	50	36	29	21	16	124	Buena	57	Buena	18	Buena	12	Buena
Descendente	K65+400	26.8	146	96	89	74	62	43	32	23	18	146	Buena	60	Buena	26	Buena	18	Buena
Descendente	K65+450	27.1	140	101	92	80	66	48	35	25	19	140	Buena	51	Buena	25	Buena	16	Buena
Descendente	K65+500	27.3	144	100	93	81	71	54	43	34	26	144	Buena	55	Buena	22	Buena	14	Buena
Descendente	K65+550	27.3	133	93	86	77	66	51	38	29	22	133	Buena	49	Buena	20	Buena	12	Buena
Descendente	K65+600	27.2	136	99	89	78	68	50	38	29	23	136	Buena	50	Buena	21	Buena	16	Buena
Descendente	K65+650	26.8	79	43	38	32	28	22	17	14	13	79	Buena	41	Buena	10	Buena	6	Buena
Descendente	K65+700	27.0	234	173	159	133	108	74	53	36	28	234	Buena	79	Buena	49	Buena	31	Buena
Descendente	K65+750	27.0	168	123	110	92	76	54	40	31	25	168	Buena	60	Buena	34	Buena	20	Buena
Descendente	K65+800	27.1	170	110	100	86	73	55	42	32	25	170	Buena	73	Buena	26	Buena	17	Buena
Descendente	K65+850	27.1	183	120	109	92	79	55	41	30	19	183	Buena	77	Buena	30	Buena	21	Buena
Descendente	K65+900	27.0	135	92	84	73	64	47	36	26	24	135	Buena	53	Buena	20	Buena	15	Buena
Descendente	K65+950	27.2	128	83	77	66	57	44	33	25	20	128	Buena	53	Buena	19	Buena	12	Buena
Descendente	K66+000	27.3	177	125	116	98	81	56	41	31	26	177	Buena	65	Buena	34	Buena	23	Buena
Descendente	K66+050	26.9	202	153	141	125	108	83	64	48	38	202	Buena	64	Buena	32	Buena	23	Buena
Descendente	K66+100	27.2	131	82	72	57	45	26	17	10	6	131	Buena	61	Buena	26	Buena	17	Buena
Descendente	K66+150	27.3	175	127	114	96	82	59	44	33	25	175	Buena	63	Buena	32	Buena	21	Buena
Descendente	K66+200	26.9	255	175	158	134	111	80	57	43	35	255	Buena	100	Buena	45	Buena	29	Buena
Descendente	K66+250	27.2	566	354	292	215	158	97	66	43	27	566	Regular	280	Regular	131	Regular	58	Regular
Descendente	K66+300	27.1	285	202	180	161	131	88	65	46	33	285	Buena	109	Buena	48	Buena	40	Buena
Descendente	K66+350	27.2	280	205	185	155	127	85	62	45	33	280	Buena	99	Buena	57	Buena	39	Buena
Descendente	K66+400	27.1	134	97	87	69	53	29	17	10	8	134	Buena	49	Buena	32	Buena	23	Buena
Descendente	K66+450	26.6	68	36	30	24	19	11	7	5	3	68	Buena	38	Buena	11	Buena	8	Buena
Descendente	K66+500	27.3	104	72	66	59	51	38	32	26	22	104	Buena	40	Buena	15	Buena	11	Buena

Nota. Elaboración propia

La evaluación Deflectometría cualitativa, es una técnica no destructiva utilizada para determinar el estado y la capacidad estructural de un pavimento asfáltico. Consiste en medir la deformación (o deflexión) que experimenta el pavimento bajo una carga aplicada, ya sea estática o dinámica. A partir de estas mediciones, se pueden obtener conclusiones sobre la rigidez de las diferentes capas del pavimento, su capacidad para soportar cargas y su estado general de conservación.

### 5.5 Georradar GSSI

Para la obtención de datos se empleó el Georradar de Penetración (GPR) GSSI Roadscan, fabricado por el Geophysical Survey System Inc, mediante el cual se registró onda electromagnética cada 10cm a una velocidad promedio de 50 km/h, mediante el uso de dos antenas, una con frecuencia de 1 GHz y otra de 400 MHz.

Se realizó la prospección geofísica con GPR con el fin de detectar los espesores de la estructura de pavimentos para apoyar el análisis de la capacidad portante de la subrasante y del estado estructural del pavimento. Las mediciones se llevaron a cabo en el carril externo en los sectores con doble calzada, y en ambos carriles en aquellos con calzada sencilla bidireccional.

Para la determinación de los espesores y la calibración de equipos se utilizó la Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar. “norma ASTM D4748-10 “(2020)

Los parámetros definidos para la adquisición de datos se presentan a continuación. Para los procesos de registro de campo, se utilizaron los programas Radscan y Radan.

- Ventana temporal: 100ns
- El número de muestras por traza es de 256

- La cantidad de trazas por metro es de 120
- La función de amplificación (ganancia): lineal con extremos en -20 y en +49 dB
- Scans/Unit(m): 5
- Bits/Sample:32
- Constante dieléctrica: 5.18 (asfalto) y 6.9 (capas granulares).

#### ***5.5.1 Núcleos de Calibración***

Se realizaron 90 núcleos, cada 10 km para conocer el espesor de la estructura existente. Los sondeos se realizaron frente a cada PR a una distancia entre 20 y 40 cm de la línea de demarcación externa y dentro del carril.

#### ***5.5.2 Limitaciones del estudio***

Las limitaciones del estudio de espesores usando GPR se relacionaron principalmente con los siguientes factores; el porcentaje de humedad en las capas granulares influyo en la determinación de estos espesores, alterando la estimación real del espesor correspondiente a cada capa granular adyacente. La penetración de la señal del GPR limitada por la presencia de zonas ricas en arcillas. La calibración de los espesores estuvo limitada por los pliegos de condiciones a 1 cada 10 km, lo que pudo generar una diferencia en los valores de las constantes dieléctricas que pueden inducir errores por encima de lo que se establece en la norma.

**Capítulo 6: Análisis de resultados Georradar**

**6.1 Resultados - Análisis sectorización de corredor y presentación espesores del corredor existente**

**Tabla 10**

*Determinación de espesores de pavimento obtenidos por georradar (GPR)*

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL, FUNCIONAL Y SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS  
DEL PROYECTO TRONCAL DEL MAGDALENA II  
DETERMINACIÓN INDICADOR E16: CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Equipo empleado		DYNATEST HWD 8082-153	
Radio del Plato de carga (m)		0.15	
Datos de Campo			
Carril			
Carril Descendente	Abscisa	Espesores Pavimento	
		Capas Asfálticas	Granulares
Descendente	K62+200	50.1	70.0
Descendente	K62+250	34.9	70.0
Descendente	K62+300	40.8	70.0
Descendente	K62+350	29.0	70.0
Descendente	K62+400	31.5	70.0
Descendente	K62+450	24.7	70.0
Descendente	K62+500	23.1	70.0
Descendente	K62+550	21.4	70.0
Descendente	K62+600	19.7	70.0
Descendente	K62+650	20.5	70.0
Descendente	K62+700	26.4	70.0
Descendente	K62+750	24.7	70.0
Descendente	K62+800	14.6	70.0
Descendente	K62+850	27.3	70.0
Descendente	K62+900	28.1	70.0
Descendente	K62+950	21.4	70.0

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL, FUNCIONAL Y SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS  
DEL PROYECTO TRONCAL DEL MAGDALENA II  
DETERMINACIÓN INDICADOR E16: CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Equipo empleado		DYNATEST HWD 8082-153	
Radio del Plato de carga (m)		0.15	
Datos de Campo			
Carril			
Carril Descendente	Abscisa	Espesores Pavimento	
		Capas Asfálticas	Granulares
Descendente	K63+000	24.7	70.0
Descendente	K63+050	31.5	70.0
Descendente	K63+100	28.1	70.0
Descendente	K63+150	29.0	70.0
Descendente	K63+200	30.7	70.0
Descendente	K63+250	32.4	70.0
Descendente	K63+300	34.9	70.0
Descendente	K63+350	33.2	70.0
Descendente	K63+400	38.3	70.0
Descendente	K63+450	38.3	70.0
Descendente	K63+500	30.7	70.0
Descendente	K63+550	40.8	70.0
Descendente	K63+600	40.8	70.0
Descendente	K63+650	30.7	70.0
Descendente	K63+700	31.5	70.0
Descendente	K63+750	25.6	70.0
Descendente	K63+800	29.0	70.0
Descendente	K63+850	29.0	70.0
Descendente	K63+900	38.3	70.0
Descendente	K63+950	26.4	70.0
Descendente	K64+000	30.7	70.0
Descendente	K64+050	31.5	70.0
Descendente	K64+100	34.9	70.0

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL, FUNCIONAL Y SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS DEL PROYECTO TRONCAL DEL MAGDALENA II  
 DETERMINACIÓN INDICADOR E16: CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Equipo empleado		DYNATEST HWD 8082-153	
Radio del Plato de carga (m)		0.15	
Datos de Campo			
Carril			
Carril Descendente	Abscisa	Espesores Pavimento	
		Capas Asfálticas	Granulares
Descendente	K64+150	34.0	70.0
Descendente	K64+200	26.4	70.0
Descendente	K64+250	38.3	70.0
Descendente	K64+300	28.1	70.0
Descendente	K64+350	27.3	70.0
Descendente	K64+400	27.3	70.0
Descendente	K64+450	24.7	70.0
Descendente	K64+500	23.1	70.0
Descendente	K64+550	29.0	70.0
Descendente	K64+600	26.4	70.0
Descendente	K64+650	19.7	70.0
Descendente	K64+700	26.4	70.0
Descendente	K64+750	23.1	70.0
Descendente	K64+800	24.7	70.0
Descendente	K64+850	27.3	70.0
Descendente	K64+900	22.2	70.0
Descendente	K64+950	28.1	70.0
Descendente	K65+000	33.2	70.0
Descendente	K65+050	40.0	70.0
Descendente	K65+100	57.7	70.0
Descendente	K65+150	50.9	70.0
Descendente	K65+200	51.8	70.0
Descendente	K65+250	52.6	70.0

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL, FUNCIONAL Y SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS DEL PROYECTO TRONCAL DEL MAGDALENA II  
 DETERMINACIÓN INDICADOR E16: CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Equipo empleado		DYNATEST HWD 8082-153	
Radio del Plato de carga (m)		0.15	
Datos de Campo			
Carril			
Carril Descendente	Abscisa	Espesores Pavimento	
		Capas Asfálticas	Granulares
Descendente	K65+300	50.1	70.0
Descendente	K65+350	57.7	70.0
Descendente	K65+400	45.0	70.0
Descendente	K65+450	53.5	70.0
Descendente	K65+500	61.1	70.0
Descendente	K65+550	61.9	70.0
Descendente	K65+600	56.9	70.0
Descendente	K65+650	44.2	70.0
Descendente	K65+700	47.6	70.0
Descendente	K65+750	45.9	70.0
Descendente	K65+800	48.4	70.0
Descendente	K65+850	48.4	70.0
Descendente	K65+900	44.2	70.0
Descendente	K65+950	48.4	70.0
Descendente	K66+000	51.8	70.0
Descendente	K66+050	37.4	70.0
Descendente	K66+100	45.0	70.0
Descendente	K66+150	47.6	70.0
Descendente	K66+200	36.6	70.0
Descendente	K66+250	44.2	70.0
Descendente	K66+300	39.1	70.0
Descendente	K66+350	42.5	70.0
Descendente	K66+400	38.3	70.0

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL, FUNCIONAL Y SUPERFICIAL DE LOS PAVIMENTOS  
DEL PROYECTO TRONCAL DEL MAGDALENA II  
DETERMINACIÓN INDICADOR E16: CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Equipo empleado		DYNATEST HWD 8082-153	
Radio del Plato de carga (m)		0.15	
Datos de Campo			
Carril			
		Espesores Pavimento	
Carril Descendente	Abscisa		
		Capas Asfálticas	Granulares
Descendente	K66+450	28.1	70.0

Nota. Elaboración propia

Los resultados del georradar presentados en la tabla anterior, presenta información con la toma de puntos cada 50 metros, tomando como abscisa inicial el K62+200 hasta la abscisa K66+500. En donde se consideró la toma final de 87 puntos. No obstante, muestra valores correspondientes espesores de capa de concreto asfáltico y capa granular de la estructura de pavimento.

### 6.2 Densidad del concreto asfáltico del sector

La densidad del concreto asfáltico MDC-19, brinda una visión según el comportamiento y resultado de datos obtenidos por el georradar y que información fue posiblemente suministrada para calibrarlo; por lo tanto, la variable que predominaría en los resultados del espesor de capa entre apiques y el georradar, corresponde a la densidad del material. Siendo que, afecta la información generada debido a que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas depende de las propiedades físicas del medio, como su permitividad dieléctrica, la conductividad eléctrica y velocidad de onda.

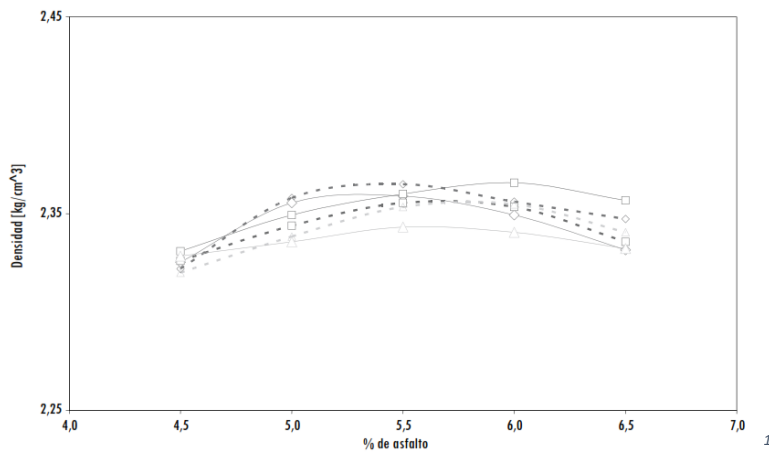
No obstante, en aras de resolver las posibles variaciones de información obtenidas entre apiques y resultados del georradar, se toma la información de núcleos realizados en los sectores con abscisas:

- K66+200 con un contenido %asfalto de: 6.72%
- K64+200 con un contenido %asfalto de: 5.68%

Para determinar la densidad del material de la capa de concreto asfáltico, se evalúa conforme al “INFORME DE LABORATORIO DE MÓDULO RESILIENTE UNE-EN 12697-26:2019” en donde, se analizan los resultados en la siguiente gráfica:

**Figura 21**

*Densidad de la mezcla asfáltica MDC-19*



Nota. Elaboración propia

---

Se infiere que el valor promedio de densidad para un porcentaje de asfalto de %6.72 es de 2.26 g/cm<sup>3</sup>, y para un porcentaje de asfalto de %5.68 es de 2.37 g/cm<sup>3</sup>. Lo anterior, hace referencia al aumento del contenido de asfalto en la mezcla, la cual tiende a disminuir la densidad del concreto asfáltico en lugar de aumentarla. Por lo tanto, en densidad, el contenido de asfalto en la mezcla tiene un efecto indirecto. Generalmente, a mayor contenido de asfalto, la densidad del concreto asfáltico puede disminuir porque el asfalto es menos denso que los agregados que se utilizan en la mezcla. Esto significa que, al incrementar el contenido de asfalto, el volumen de agregados disminuye, lo que podría resultar en una mezcla menos densa.

En conclusión, la información que respalda la variabilidad de resultados entre espesor de concreto asfáltico determinado por georradar y obtenido en los apiques, se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 11**

*Espesores de concreto asfáltico y granulares según campaña de exportación y resultados de georradar*

Apique	Abscisa	C.A Apiques	C.A Georradar	Granulares Georradar	Granulares Apiques
Apique 16 - UF 10	K62+200.0	0.30	0.43	0.70	1.20
47	K62+450.0	0.50	0.27	0.70	1.00
48	K62+700.0	0.30	0.26	0.70	1.20
49	K62+950.0	0.45	0.28	0.70	1.05
50	K63+200.0	0.30	0.30	0.70	1.05
51	K63+450.0	0.50	0.40	0.70	1.00
52	K63+700.0	0.50	0.32	0.70	1.00
53	K63+950.0	0.35	0.33	0.70	1.00
Apique 17 - UF 10	K64+200.0	0.22	0.26	0.70	1.28
54	K64+450.0	0.50	0.27	0.70	1.00
55	K64+700.0	0.45	0.27	0.70	1.05
56	K64+950.0	0.45	0.40	0.70	1.05

# ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE GEORRADAR PARA DETERMINAR LOS ESPESORES DE LA ESTRUCTURA

## DE PAVIMENTO

80

57	K65+200.0	0.40	0.51	0.70	1.10
58	K65+450.0	0.40	0.54	0.70	1.10
59	K65+700.0	0.45	0.48	0.70	1.05
60	K65+950.0	0.45	0.48	0.70	0.45
Apique 18 - UF 10	K66+200.0	0.35	0.37	0.70	1.15
61	K66+450.0	0.45	0.48	0.70	1.05

*Nota.* Elaboración propia

## Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

**7.1.** De la revisión de los estudios presentados de georradares en la evaluación de estructuras de pavimento, se concluye que los georradares se consolidaron como una herramienta eficaz y no destructiva para evaluar la condición de los pavimentos. La capacidad que tienen los georradares para determinar los espesores de capas, anomalías y evaluar la integridad estructural, ha sido validada en diferentes estudios. El georradar se utiliza frecuentemente en combinación con otras técnicas no destructivas como lo es el Deflectometría de impacto (FWD) para obtener una evaluación completa del pavimento en estudio; esta combinación permite caracterizar tanto la estructura del pavimento como su respuesta a las cargas.

Es necesario estandarizar los procedimientos de adquisición y procesamiento de los datos de georradar, para garantizar la comparabilidad de los resultados obtenidos en los diferentes estudios, y la integración de los datos de georradar con sistemas de información geográfica (SIG) permite crear mapas detallados de la condición de los pavimentos y facilitar la gestión de la infraestructura vial.

**7.2.** A partir de los datos recopilados en el estudio se encontró una predominancia en la subrasante de suelos finos principalmente limos y arcillas, adicionalmente se observa una variación en el contenido de humedad natural de las muestras, lo que indica una heterogeneidad en las condiciones del terreno; la mayoría de las muestras presentan un límite líquido negativo, lo que sugiere que los suelos están sobre consolidados, esto nos indica que han sido sometidos a grandes presiones en el pasado. La humedad natural máxima (20%) coincide con el límite líquido mínimo del suelo, lo que significa que el suelo está justo en el límite entre un estado plástico y líquido para su valor más bajo de LL. Esto indica

que el suelo no está excesivamente húmedo, pero puede estar en un estado blando dependiendo de su mineralogía y compactación en algunos puntos.

Los niveles de materia orgánica son bajos, menores a 2, según la norma INVIAS no se considera necesario realizar tratamientos adicionales para reducir su impacto en el comportamiento del suelo; debido a la baja permeabilidad de los suelos arcillosos se recomienda implementar un sistema de drenaje adecuado para así evitar problemas de estabilidad y garantizar la durabilidad de la estructura del pavimento.

**7.3.** Del estudio realizado comprendido entre las abscisas K62+200 Y K66+500 se han obtenido valores numéricos que representan los espesores de las capas de concreto asfáltico y granular a lo largo del tramo analizado, como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 12**

*Espesores de concreto asfáltico y granulares según campaña de exportación y espesores determinados por Georradar*

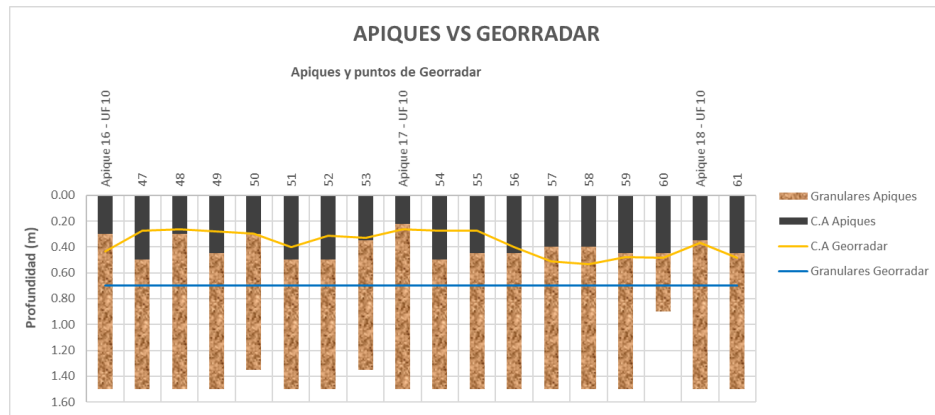
Apique	Abscisa	C.A Apiques	C.A Georradar	Granulares Georradar	Granulares Apiques
Apique 16 - UF 10	K62+200.0	0.30	0.43	0.70	1.20
47	K62+450.0	0.50	0.27	0.70	1.00
48	K62+700.0	0.30	0.26	0.70	1.20
49	K62+950.0	0.45	0.28	0.70	1.05
50	K63+200.0	0.30	0.30	0.70	1.05
51	K63+450.0	0.50	0.40	0.70	1.00
52	K63+700.0	0.50	0.32	0.70	1.00
53	K63+950.0	0.35	0.33	0.70	1.00
Apique 17 - UF 10	K64+200.0	0.22	0.26	0.70	1.28
54	K64+450.0	0.50	0.27	0.70	1.00
55	K64+700.0	0.45	0.27	0.70	1.05
56	K64+950.0	0.45	0.40	0.70	1.05
57	K65+200.0	0.40	0.51	0.70	1.10
58	K65+450.0	0.40	0.54	0.70	1.10

59	K65+700.0	0.45	0.48	0.70	1.05	
60	K65+950.0	0.45	0.48	0.70	0.45	
Apique 18 - UF 10		K66+200.0	0.35	0.37	0.70	1.15
61	K66+450.0	0.45	0.48	0.70	1.05	

Nota. Elaboración propia

**Figura 22**

*Apiques Vs Georradar*



Nota. Elaboración propia

De acuerdo con el análisis realizado, la comparación entre los resultados obtenidos mediante el Georradar (GPR) y los apiques demuestra una notable convergencia en muchos puntos evaluados, lo que refuerza la utilidad del GPR como herramienta para estudios no destructivos en pavimentos. En nuestro estudio, de los 18 puntos evaluados, 9 puntos presentaron una diferencia mínima entre el 0% y el 5%, lo que evidencia la alta precisión del georradar en estas zonas. Sin embargo, los otros 9 puntos registraron discrepancias de entre el 10% y el 20%, lo que sugiere que, aunque el GPR es eficaz para identificar espesores de capas y anomalías generales, su precisión puede variar según las condiciones específicas del material y el terreno.

La diferencia observada puede atribuirse a factores como la heterogeneidad de los materiales, la densidad relativa de las capas, la presencia de humedad y las variaciones en la calibración del equipo. En particular, las capas de menor densidad permiten una mayor velocidad de propagación de las ondas del georradar, lo que puede generar variaciones en los tiempos de tránsito medidos y, por ende, en los espesores calculados. Esto se refleja especialmente en los sectores donde la discrepancia entre el georradar y los apiques osciló entre 20 cm y 22 cm, debido a las diferencias en las características físicas de los materiales presentes, como el contenido de asfalto y la densidad granulométrica, analizadas en detalle en el capítulo 6.3.

La calibración del georradar con información de los apiques en puntos clave (apiques 50, 17, 59, 18 y 61) permitió validar los resultados en sectores donde las mediciones convergieron. Este enfoque de calibración cruzada refuerza la idea de que los apiques son esenciales no solo para la validación de los datos del GPR, sino también para ajustar las constantes dieléctricas y mejorar la precisión de las mediciones no destructivas.

Además, la combinación de tecnologías, utilizando apiques para verificación directa y el georradar para un análisis continuo y no invasivo a lo largo del corredor, optimiza significativamente la evaluación de los espesores de pavimentos. Los apiques aportan información puntual pero precisa sobre la disposición y características de las capas, mientras que el GPR permite extender ese conocimiento de manera continua a lo largo de todo el tramo analizado. Esta sinergia asegura una evaluación más robusta, minimizando errores y mejorando la planificación de intervenciones de mantenimiento y rehabilitación vial.

Por lo tanto, para obtener resultados confiables en la determinación de espesores de pavimento, se recomienda un enfoque integrado que combine métodos destructivos y no destructivos. Este enfoque permite aprovechar las fortalezas de ambos métodos: los apiques como una herramienta de validación directa y el georradar como un método rápido, económico y eficiente para estudios de mayor alcance. Este modelo de trabajo es replicable en otros proyectos de evaluación vial, especialmente en contextos donde se requiere minimizar la intervención destructiva y maximizar la precisión en el análisis estructural.

### Lista de Referencia

- AASHTO. (1993). *Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimentos*.
- Angelica, V. A. M. (2014). *Evaluación y diseño de pavimentos por el método no destructivo - georadar (GPR) y deflectómetro de la antigua vía a Conocoto*. Universidad central del Ecuador.
- Del transporte, I. M. (2013). *Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1*.  
<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt53.pdf>
- Farfán, I. M. M. (2017, abril). *Diseño estructural de pavimentos hidráulicos y asfálticos*.  
<https://es.slideshare.net/slideshow/clase-01-suelos-de-subrasante/75066648>
- Galvez, A. C. C. (2017). *Auscultación, proceso e interpretación de datos obtenidos por georadar aplicado a estructura de pavimento y casos de geotecnia vial*. Universidad del valle de Guatemala.
- Instituto de Hidrología, Metodología y estudios Ambientales. (s/f). IDEAM. <https://www.ideam.gov.co/>
- Instituto nacional de INVIAS. (2012). *Manuel de diseño de cimentaciones superficiales y profundas para carreteras*.
- INVIAS. (2013a). *CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada INV E-148-13*.
- INVIAS. (2013b). *Guía para la evaluación de pavimentos asfálticos con georadar*.
- Jacqueline, A. C. P. (2013). *Evaluación no destructiva de pavimentos mediante el georadar (espesores de estructura) con aplicación en las vías urbanas de Quito*. Universidad Central del Ecuador.
- Javier Ballote, O. R. (2021, abril). *Aplicación del método del georadar en la evaluación estructural de pavimentos flexibles en Cuba*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26075.08486>

Martínez, C. E. M. (2014). *Evaluación de las metodologías vizir como herramienta para la toma de decisiones en las intervenciones a realizar en los pavimentos flexibles*. Universidad militar nueva granada.

Ministerio de Educación nacional. (2006). *Norma Técnica Colombiana NTC 4595*.

Novoa, L. F. I. (2016). *Caso de estudio de una evaluación estructural de un pavimento flexible ubicado en la ciudad de Bogotá, localidad de puente aranda entre Av calle 13 y 15, utilizando técnicas no destructivas y análisis de los resultados obtenidos*. Universidad Militar Nueva Granada.

Laboratorio de Control de Calidad de Fundaciones, I. de E. y. T. (2022). Procedimiento de ensayo con Georradar en pavimentos. [https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2022-03/Procedimiento%20de%20Ensayo%20con%20GPR%20-%20LCCF\\_0.pdf](https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2022-03/Procedimiento%20de%20Ensayo%20con%20GPR%20-%20LCCF_0.pdf)

Perdomo, H. A. (2023). *Estructura del pavimento asfaltico*. Universidad Militar Nueva Granada.

<https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/78a87d32-3d95-4d0b-b8ea-dc1c093d1161/content>