



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS (GEOTECNIA)

TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA

TÍTULO

ESTIMACIÓN DEL CAMBIO DEL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE POR EFECTOS
DEL CLIMA EN ARCILLAS BLANDAS DEL NORTE DE BOGOTÁ.

ASPIRANTE AL TÍTULO DE MAESTRÍA

MANUEL JOSE MEZA SOTO

Código 2109735

manuel.meza@mail.escuelaing.edu.co.

DIRECTOR DEL TRABAJO

CARLOS EDUARDO RODRÍGUEZ PINEDA

Docente Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

BOGOTÁ, 2020

La tesis de maestría titulada ESTIMACIÓN DEL CAMBIO DEL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE POR EFECTOS DEL CLIMA EN ARCILLAS BLANDAS DEL NORTE DE BOGOTÁ, presentada por Manuel José Meza Soto, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Director de la Tesis

Carlos Eduardo Rodríguez Pineda, Ph.D

Jurado

Catalina Lozada López, Ph.D

Jurado

Sandra Ximena Campagnoli Martínez

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por la vida, gracias a mi esposa Carol González y a mis hijos María José, Juan Manuel, Simón Alejandro, por su amor, gracias a mi abuela Rosa Isabel (QEPD) y mi madre de crianza Gloria Inmaculada por su apoyo incondicional en mis años de infancia, gracias a nuestra empresa MJS Ingeniería Vial S.A.S, por permitirme la dirección del área técnica, con profesionales destacados que son mi orgullo.

Agradecimientos al profesor Ing. MSc, PhD, Carlos Rodríguez Pineda por su orientación en la dirección del trabajo presentado, gracias a la Ing. PhD Claudia Zapata de la Universidad de Arizona por su aporte con referencias bibliográficas, gracias al Ing. PhD, Christopher Trejos de la Universidad de Reno por compartir sus conocimientos, gracias a la Ing. MSc. Sandra Campagnoli de la Escuela Colombiana de Ingeniería por su colaboración con el personal técnico del laboratorio en la ejecución de los ensayos de Módulos Resilientes, gracias a mi profesor Ing. MSc Carlos Alberto Benavides Bastidas, profesor de la Universidad del Cauca, por ser mi mentor desde el año 2004.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	12
2	MARCO TEÓRICO	14
2.1	Generalidades del desempeño de los pavimentos	14
2.2	CARACTERIZACIÓN DE SUELOS	15
2.2.1	Propiedades de los Suelos	16
2.3	RESPUESTA MECÁNICA DE LOS SUELOS	16
2.3.1	Relación de Soporte de California	16
2.3.2	Módulo resiliente.	17
2.4	SATURACIÓN DE SUELOS DE SUBRASANTE	19
2.4.1	Succión en Función de Parámetros Climáticos	19
2.4.2	Relación entre Succión y Saturación	22
2.5	EFFECTOS AMBIENTALES EN EL DESEMPEÑO DE LOS PAVIMENTOS	26
2.5.1	Afectaciones de la precipitación	27
2.6	METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS	30
3	OBJETIVOS	32
3.1	OBJETIVO GENERAL	32
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
4	METODOLOGÍA	33
4.1	FASE 1 - RELACIÓN ENTRE MÓDULOS	33
4.2	FASE 2 – APLICABILIDAD AL DISEÑO DE PAVIMENTOS	33
4.3	FASE 3 – DOCUMENTO DE PRESENTACIÓN	33
5	EXPLORACIÓN DE CAMPO	34

6	ENSAYOS DE LABORATORIO	42
6.1	GRANULOMETRÍA	42
6.2	HUMEDAD NATURAL	42
6.3	LÍMITES DE ATTERBERG	42
6.3.1	Límite Líquido	42
6.3.2	Límite Plástico	43
6.4	COMPACTACIÓN DE SUELOS MEDIANTE ENSAYO PROCTOR	43
6.5	CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO MEDIANTE ENSAYO DE CBR44	
6.6	ENSAYO DE MODULO RESILIENTE	46
7	RESULTADOS DE MODULO RESILIENTE POR MEDIO DE ENSAYO	47
7.1	Propiedades esfuerzo dependientes de suelos	47
7.2	Cálculo de módulo resiliente por medio de la teoría de multicapa elástica	49
8	RELACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES	51
8.1	Datos para el Cálculo del módulo de diseño por afectación climática	53
8.1.1	Datos para la subrasante	55
8.1.2	Cálculo del índice de Thornthwaite para la clasificación climática	55
8.1.3	Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP)	57
8.1.3.1	Cálculo de “Índice de calor mensual” (i)	57
8.1.4.2	Cálculo de “Índice de calor anual”	57
8.1.3.3	Cálculo de la ETP mensual “sin corregir”	58
8.1.3.4	Cálculo de la ETP mensual corregido para el número de días del mes y el número de horas de sol	58
8.1.3.5	Cálculo del Exceso (EXC) y del Déficit de humedad (DEF)	59
8.2	Incidencia de la variable clima en el cálculo del módulo resiliente de diseño, del suelo de la subrasante	60

8.2.1	Suelos de subrasante considerados como plásticos ($P_{200} \geq 10\%$ ó $wPI \geq 2.0$)	61
8.2.1.1	Cálculo de succión a partir del Índice de Thornthwaite	61
8.2.1.2	Cálculo de la saturación	62
8.2.2	Cálculo del Factor Ambiental mensual de la subrasante	71
8.2.3	Cálculo del módulo resiliente de la subrasante	74
8.2.4	Cálculo del daño relativo promedio y el Módulo Resiliente de Diseño	75
8.3	Incidencia de la temperatura para el cálculo del módulo dinámico de la carpeta asfáltica	77
8.3.1	Cálculo de la temperatura de la mezcla asfáltica para determinar el módulo dinámico	78
9	APLICACIONAL DISEÑO DE PAVIMENTOS	79
9.1	METODOLOGÍA CONVENCIONAL	79
9.1.1	Predimensionado de La Estructura De Pavimento	79
9.1.1.1	Localización de la Estructura de Pavimento.	79
9.1.1.2	Tránsito para el diseño de la Estructura de Pavimento.	80
9.1.1.3	Parámetros de Predimensionamiento.	81
9.1.1.4	Espesores Obtenidos.	82
9.1.2	Revisión de La Estructura Mediante Método Mecánico Empírico	84
9.1.2.1	Cálculo de Esfuerzos y Deformaciones.	84
9.1.2.2	Consumo por Fatiga.	85
9.2	METODOLOGÍA PROPUESTA	85
9.2.1	Succión de Materiales no Ligados en Función de la Precipitación	87
9.2.2	Estimación del Módulo Resiliente	88
9.2.3	Revisión de la Estructura de Pavimentos Mediante Método Mecanicista	88
10	RESULTADOS	89
10.1.1	Resultados ensayos geotécnicos	89
10.1.1.1	Módulo Resiliente	89
10.1.1.2	Proctor Modificado	89

10.1.1.3	Ensayo CBR	90
10.1.1.4	Humedad de las muestras	93
10.1.1.5	Límites y gravedad específica	93
10.1.1.6	Resumen de resultados	95
10.1.2	Condiciones climáticas Bogotá	95
10.1.3	Aplicación de la Curva SWCC	99
10.1.4	Módulo Resiliente Multitemporal de Materiales no Ligados	100
10.2	COMPARACION DE RESULTADOS	104
11	ANALISIS DE RESULTADOS	106
11.1	Obtención de los parámetros del modelo para los suelos blandos de Bogotá	106
11.2	Módulo Resiliente de Diseño	107
11.3	Diseño de pavimentos	108
12	LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES	111
13	CONCLUSIONES	113
14	BIBLIOGRAFÍA	115
	APÉNDICE A	118
	APÉNDICE B	125

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 2-1. Factores que afectan el módulo resiliente de los materiales cohesivos y el efecto de aumentar el valor del factor.	29
Cuadro 5-1. Profundidades de las muestras	34
Cuadro 8-1. Valores de los parámetros de regresión para el modelo de ajuste del Módulo Resiliente por clima	52
Cuadro 8-2. Ensayos de laboratorio necesarios.....	55
Cuadro 8-3. Formulas Índice de Thornthwaite	56
Cuadro 8-4. Clasificación climática de Thornthwaite	57
Cuadro 8-5. Valores para el modelo “TMI-P200/wPI”	62
Cuadro 8-6. Parámetros Curva SWCC Ensayos realizados en el estado de Nevada, Estados Unidos	70
Cuadro 8-7. Valores de a, b y k_m para el cálculo del factor ambiental según Cary y Zapata	72
Cuadro 9-1. Nivel de confiabilidad para el diseño de pavimentos según la metodología AASHTO 93.....	81
Cuadro 9-2. Coeficiente de drenaje para diseño empírico de pavimentos.....	84
Cuadro 10-1. Parámetros de la regresión lineal múltiple para cada mes.....	89
Cuadro 10-2. Resultados ensayo Proctor	90
Cuadro 10-3. Resultados ensayo CBR	91
Cuadro 10-4. Análisis de Resultados Ensayo CBR.....	91
Cuadro 10-5. Humedad de las muestras ensayadas	93
Cuadro 10-6. Resultados ensayo Gravedad específica	93
Cuadro 10-7. Datos ensayo límite líquido y plástico.....	95
Cuadro 10-8. Resumen de datos de ensayo.....	95
Cuadro 10-9. Variables climáticas promedio Bogotá.....	96

Cuadro 10-10. Cálculo del índice de humedad de Thornthwaite por el método del índice de calor.....	98
Cuadro 10-11. Cálculo del índice de humedad de Thornthwaite por el método de Penman y Monteith.....	98
Cuadro 10-12. Valores utilizados en el estudio curva SWCC.....	100
Cuadro 10-13. Valores del modelo que relaciona el TMI con la succión	100
Cuadro 10-14. Resultados Variables climáticas	101
Cuadro 10-15. Factor ambiental para los dos modelos considerados	102
Cuadro 10-16. Resultados ensayo módulo resiliente	103
Cuadro 10-17. Comparación de resultados de laboratorio y según los modelos propuestos	105
Cuadro 11-1. Daño relativo según diversos métodos.....	107
Cuadro 11-2. Espesores de carpeta asfáltica de diseño para cada módulo resiliente de subrasante.....	109
Cuadro 0-1. Diámetro y altura de las muestras ensayadas	118
Cuadro 0-2. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de mayo 2018	118
Cuadro 0-3. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de junio 2018.....	119
Cuadro 0-4. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de julio 2018.....	119
Cuadro 0-5. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de agosto 2018	120
Cuadro 0-6. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de setiembre 2018...	120
Cuadro 0-7. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de octubre 2018	121
Cuadro 0-8. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de noviembre 2018..	121
Cuadro 0-9. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de diciembre 2018...	122
Cuadro 0-10. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de enero 2019	122
Cuadro 0-11. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de febrero 2019.....	123
Cuadro 0-12. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de marzo 2019	123
Cuadro 0-13. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de abril 2019	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Estructura y distribución típica de esfuerzos del pavimento flexible y rígido.--	14
Figura 2-2.Cámara Triaxial con TLDV interiores y celda de carga -----	18
Figura 2-3. Modelo TMI –P200 para Bases Granulares -----	21
Figura 2-4. Modelo TMI-P200/wPI para Subrasantes -----	21
Figura 2-5. Componentes de la curva SWCC -----	22
Figura 2-6. Diagrama del equipo HYPROP-----	24
Figura 2-7. Curva característica de un suelo. -----	25
Figura 2-8. Posibles movimientos de la humedad en la carretera.-----	28
Figura 2-9. Gráfico de deformaciones bajo cargas repetidas y diagrama de esfuerzos principales.-----	29
Figura 2-10. Distribución de los esfuerzos en capas del pavimento flexible drenadas y saturadas.-----	30
Figura 5-1. Ubicación de la toma de los apiques (Escuela Colombiana de Ingeniería) ----	35
Figura 5-2 Esquema de Exploraciones de Campo -----	36
Figura 5-3 Ubicación y Registro Fotográfico-----	37
Figura 5-4 Ubicación y Registro Fotográfico-----	38
Figura 5-5 Ubicación y Registro Fotográfico-----	39
Figura 5-6 Ubicación y Registro Fotográfico-----	40
Figura 5-7 Ubicación y Registro Fotográfico-----	41
Figura 6-1. Curva de presiones de penetración -----	45
Figura 6-2. Montaje para realización del ensayo de Modulo Resiliente (Mr) -----	46
Figura 7-1. Estructura inicial para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante -----	50
Figura 8-1. Diagrama de cálculo del módulo resiliente modificado de acuerdo a las condiciones climáticas -----	53
Figura 8-2. Factor ambiental para diferentes modelos -----	74
Figura 8-3. Variación del factor ambiental según los modelos básicos -----	75

Figura 9-1. Determinación del coeficiente estructural de la carpeta asfáltica-----	83
Figura 9-2. Procedimiento general de diseño mecanístico - empírico para pavimentos asfálticos. -----	86
Figura 9-3. Proceso iterativo para el cálculo del módulo resiliente-----	88
Figura 10-1. Gráfico ensayo Proctor-----	90
Figura 10-2. Ensayo CBR -----	91
Figura 10-3. Gráfico de sensibilidad mensual utilizando CBR de 2% y 5%. -----	92
Figura 10-4. Gráfico de ensayo límite líquido y plástico mes de mayo-----	94
Figura 10-5. Gráfico de ensayo límite líquido y plástico mes de junio-----	94
Figura 10-6. Curva SWCC para los datos de entrada del suelo estudiado -----	99
Figura 10-7. Succión matricial para cada mes según los modelos de Cary y Zapata ----	101
Figura 10-8. Resultados Módulo Resiliente-----	104
Figura 10-9. Comparación de resultados de laboratorio y según los modelos propuestos -----	104

1 INTRODUCCIÓN

Es común en nuestro medio emplear condiciones de resistencia de los suelos de manera constante durante el período de diseño, sin tener en cuenta las variaciones estacionales o cambios en estado de esfuerzos de los materiales debido a los diferentes periodos climáticos.

A pesar de que Colombia no presenta ciclos de congelamiento y descongelamiento de sus suelos, las variaciones de temperatura y de humedad si son considerables a lo largo del año, lo cual hace que los suelos no siempre se comporten mecánicamente de la misma manera.

Actualmente existentes modelos que permiten determinar las variaciones del módulo resiliente de los suelos a través de información climática de la zona y propiedades del suelo tales como el índice de plasticidad, la granulometría o ensayos específicos a los materiales. Estas relaciones permiten estimar las condiciones mecánicas del suelo para realizar el análisis de diferentes áreas de la ingeniería geotécnica.

Los modelos evaluados en esta tesis fueron elaborados recientemente por Arizona State University, empleando la más extensa base de datos recopilada para estos estudios a nivel mundial. Es importante establecer la aplicabilidad de estos modelos a las condiciones de suelos de nuestro medio, por lo cual esta investigación se enfoca en la comparación entre los módulos resilientes determinados mediante ensayos directos y con el empleo de los modelos determinados en la investigación realizada en Arizona.

De acuerdo con los estudios mencionados, el Módulo Resiliente varía de acuerdo las variaciones en la saturación de los suelos. La variación en la saturación puede ser estimada como en función de las condiciones climáticas de la región. Adicionalmente se ha encontrado que la variación del Módulo Resiliente puede variar hasta 2,5 veces respecto a las condiciones óptimas ($M_{r_{opt}}$) del material (Cary & Zapata, 2010), por lo tanto, dicho cambio es analizado en periodos mensuales con el fin de obtener el perfil de la variación del Módulo Resiliente para un año de análisis. Cabe mencionar que el software AASHTOWare Pavement ME realiza el cálculo de la saturación del suelo de manera diaria para mejorar la precisión en la determinación de los posibles daños en el pavimento.

La variación de la respuesta mecánica de los suelos hace parte de los análisis involucrados en las nuevas prácticas de la ingeniería geotécnica. En el caso de la ingeniería de

pavimentos, estas prácticas están enfocadas en el cambio de la respuesta mecánica que presenta la subrasante del pavimento en los diferentes periodos climáticos.

Esta investigación pretende emplear los diferentes modelos para obtener el factor de ajuste del módulo resiliente, y su verificación a partir de ensayos directos empleando los equipos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, para determinar el módulo resiliente del suelo a diferentes condiciones de saturación y con esto establecer su aplicabilidad al diseño de pavimentos para Bogotá.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES DEL DESEMPEÑO DE LOS PAVIMENTOS

El pavimento es una estructura integrada por capas de diferentes materiales, con espesores definidos tales que puedan soportar las cargas vehiculares. Se dividen en dos tipos, los pavimentos flexibles y los pavimentos rígidos. En la figura 2-1 se presentan las secciones típicas según el tipo de pavimento.

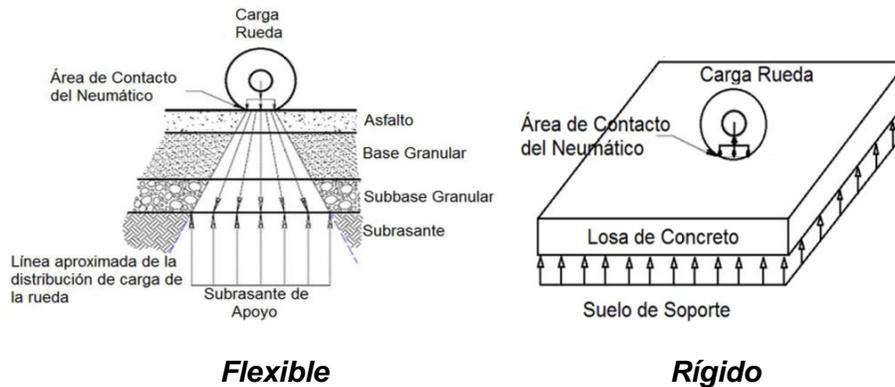


Figura 2-1. Estructura y distribución típica de esfuerzos del pavimento flexible y rígido.

Fuente: (Mena W. B., 2013).

Los pavimentos flexibles se caracterizan por su capacidad de deformación ante las cargas, esta capacidad es mayor en las capas superiores y disminuye con la profundidad. La capa de rodadura de este tipo de pavimentos está conformada por mezcla asfáltica. Los pavimentos rígidos son capaces de distribuir las cargas verticales en un área mayor dada su rigidez, reduciendo las presiones (Zárate, 2003). La Figura 2-1 presenta la distribución de esfuerzos para cada tipo de pavimento.

Los pavimentos más comunes en Colombia son los pavimentos flexibles (asfálticos). La capa asfáltica es la que se expone directamente a la intemperie, absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los esfuerzos verticales producidos por las cargas vehiculares. La base es la capa situada bajo la carpeta, su función es absorber la mayor parte de los esfuerzos verticales; por su importancia estructural, la rigidez y resistencia a la deformación de esta capa está relacionada con el tránsito de la vía, de forma que para tránsito bajo o medio se utilizan materiales granulares y para tránsito alto bases estabilizadas con cal o cemento. La subbase es la capa ubicada entre la base y la subrasante, tiene como función proveer un cimiento uniforme a la base y cumplir como una capa drenante (Zárate, 2003).

La función de los pavimentos es proveer una base de apoyo que permita disipar las cargas de tránsito de forma que al llegar a la subrasante no superen su capacidad mecánica. Además, proveen una superficie de rueda segura, estable y confortable para los usuarios.

Los pavimentos se evalúan generalmente por dos características, la funcional y la estructural. Para un usuario la utilidad o funcionalidad está enfocada a juzgar la rugosidad, resistencia al deslizamiento, visibilidad y emisión de ruido (Mena W. B., 2013). La capacidad funcional se determina por medio del Índice de Regularidad Internacional IRI, este índice mide las irregularidades de la superficie de rueda. El valor de IRI está directamente relacionado con la pérdida de serviciabilidad de una carretera, por lo que es un indicador del deterioro de la misma.

La capacidad estructural de un pavimento está en función de su capacidad de distribuir los esfuerzos y las deflexiones al aplicarse las cargas vehiculares. Involucra los materiales utilizados, los espesores de las capas y el tránsito vehicular esperado en la vía. Durante el periodo de diseño la estructura del pavimento debe ser capaz de resistir las cargas vehiculares sin deflexiones excesivas y de una manera funcional, segura y confortable para el usuario.

El pavimento experimenta una respuesta (esfuerzos, deformaciones, deflexiones) ante las cargas vehiculares y cuando entra en contacto con las condiciones ambientales. El desempeño de los pavimentos es una consecuencia de la respuesta y es la medida de las fallas desarrolladas durante su vida útil. A diferencia de la respuesta, el desempeño es mucho más difícil de cuantificar analíticamente debido a la variabilidad y la incertidumbre de los parámetros involucrados (Mena W. B., 2013). Las fallas más comunes son el ahuellamiento, fisuramiento, rugosidad y resistencia al deslizamiento.

Los deterioros en el pavimento pueden ocasionarse por distintos factores a los que se exponen durante su vida útil. Entre estos factores se encuentra sobrepasar los ESAL (ejes equivalentes de carga por sus siglas en inglés), las condiciones climáticas, mal diseño de las estructuras de evacuación de aguas, materiales de construcción de mala calidad, mal diseño de los espesores, falta de mantenimiento y preservación, y deficiencias en el proceso constructivo.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

En el ejercicio de la ingeniería geotécnica, los suelos son caracterizados mediante ensayos de laboratorio que permiten establecer sus propiedades y de esta manera mejorar la

comprensión del comportamiento a largo plazo del material al ser utilizado en diferentes aplicaciones ingenieriles. Estas pruebas sirven para determinar propiedades de los materiales tanto físicas, químicas, mineralógicas como de resistencia.

2.2.1 Propiedades de los Suelos

El comportamiento mecánico de los materiales pétreos depende principalmente de las propiedades mencionadas anteriormente, sin embargo, las propiedades que comúnmente se determinan en los proyectos de ingeniería son:

- Tamaño y forma de las partículas.
- Gravedad específica.
- Límites de Atterberg.
- Contenido de Humedad Natural.
- Contenido de Humedad en condición óptima.

2.3 RESPUESTA MECÁNICA DE LOS SUELOS

Para determinar la respuesta mecánica de los suelos, expresada en función del módulo resiliente, existen modelos que permiten realizar una estimación de dicho modulo mediante el empleo de diferentes parámetros. Este tipo de correlaciones son utilizadas por los ingenieros de pavimentos con tal de ahorrar tiempo y dinero al momento de realizar un diseño de pavimentos sin sacrificar exactitud en los cálculos.

2.3.1 Relación de Soporte de California

La relación de soporte de California o CBR por sus siglas en inglés (California Bearing Ratio) es un ensayo que determina la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo bajo condiciones controladas de humedad y densidad. Este índice se utiliza principalmente para caracterizar la calidad de los materiales no ligados del pavimento. El valor de CBR significa un porcentaje con respecto a una muestra patrón establecida en California. Es decir, un suelo con las mismas capacidades que este tipo de suelo contará con un CBR de 100.

EL ensayo se basa en la aplicación de carga axial a un espécimen por medio de un pistón de penetración. El espécimen deberá estar bajo condiciones saturadas por lo que se introduce en un baño de agua por cuatro días para alcanzar las condiciones menos favorables. Este periodo puede cambiar dependiendo de la granulometría del suelo. Finalmente se aplica una carga inicial de 5kg para que el espécimen asiente, se colocan

los medidores de deformación y carga en cero y se da inicio al proceso de penetración. Este se lleva a cabo por medio de una prensa aplicando una velocidad de deformación constante igual a 1,27mm (0,05") por minuto y se toman medidas de carga a diferentes deformaciones.

2.3.2 Módulo resiliente.

Este ensayo permite determinar el módulo elástico-dinámico de los suelos (Instituto Nacional de Vías, 2012). Para su determinación es necesario usar suelos no tratados y bajo condiciones físicas y de estados de esfuerzos representativas de la subrasante que estará ubicada bajo las capas de estructuras de pavimento flexible. El módulo resiliente permite determinar la relación básica de esfuerzo y deformación de la subrasante y las capas granulares de la estructura del pavimento y de esta manera usarlas en el análisis para el diseño de este mismo.

El ensayo se realiza con un esfuerzo axial desviador con magnitud, duración y frecuencias fijas; mientras esto sucede el espécimen se encuentra confinado, lo cual se logra por medio de un esfuerzo estático en su contorno, proporcionado por medio de una cámara de presión triaxial. El espécimen debe tener forma cilíndrica y debe ser acondicionado previo al ensayo. Con la respuesta a la deformación axial resiliente (recuperable) del espécimen se calculan los módulos resilientes dinámicos dependientes del esfuerzo aplicado (Instituto Nacional de Vías, 2012).

El ensayo se realiza en una cámara de compresión triaxial, la cual contiene la muestra y el fluido de confinamiento durante el ensayo. Puede utilizarse para el confinamiento tanto aire, agua o una mezcla de agua y alcohol. La presión de la cámara debe ser controlada con manómetros y el dispositivo de aplicación de carga debe ser capaz de ejercer cargas cíclicas semi senoidales de duración 0,1 s y duración de ciclos de 0,9 a 3 segundos en dispositivos neumáticos y 0,9 segundos en hidráulicos.

Se deben utilizar dos transformadores lineales de voltaje diferencial (LTD), conectados directamente a la muestra para medir la deformación axial debida a la carga.

La Figura 2-2 muestra la maquina triaxial y la configuración del ensayo.

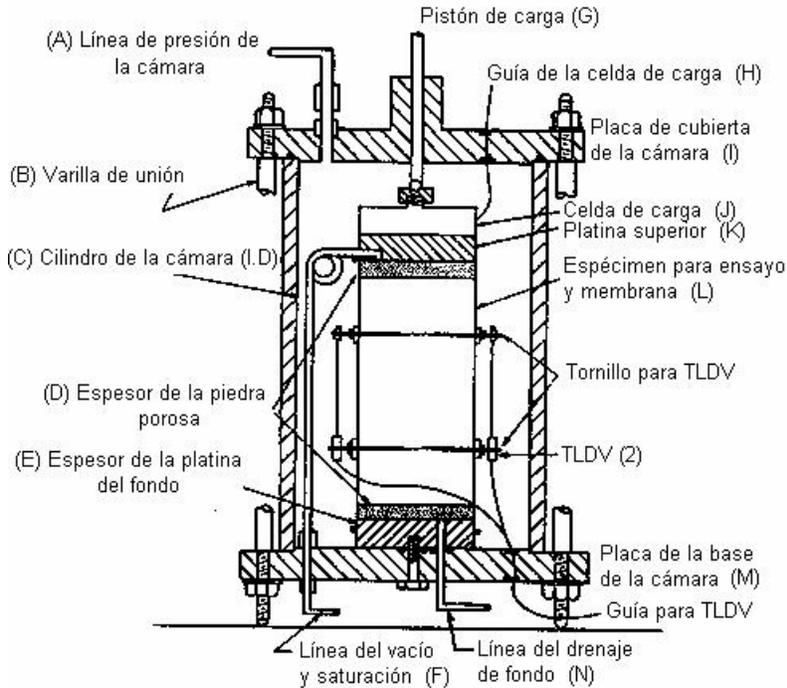


Figura 2-2. Cámara Triaxial con TLDV interiores y celda de carga

Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2012)

El espécimen debe tener una longitud no menor de dos veces el diámetro, con un diámetro entre 71 y 86 mm en suelos cohesivos. Para muestras inalteradas, como las utilizadas en este estudio son preparadas según la norma INV E-153.

El módulo resiliente es la relación básica constitutiva entre esfuerzo y deformación de los materiales de construcción de pavimentos flexibles, que es utilizada para el análisis de las capas del pavimento.

Las cargas son aplicadas por ciclos. En cada ciclo se aplica un esfuerzo desviador cíclico por aproximadamente 0,1 segundos. El ensayo calcula una deformación axial resiliente recuperada, la cual es debida al esfuerzo cíclico, el cual es el esfuerzo desviador menos el esfuerzo de contacto y una deformación axial total debida al esfuerzo desviador. El esfuerzo de contacto es el esfuerzo aplicado que asegura el contacto entre el cabezal y el espécimen, el cual es un 10% del esfuerzo desviador. Los pulsos aplicados a la muestra son semi sinusoidales.

Tanto el procedimiento como el análisis de datos se efectúa en concordancia con el método especificado en el NCHRP I-28A (NCHRP, 2012).

2.4 SATURACIÓN DE SUELOS DE SUBRASANTE

La relación entre el contenido de agua presente en los suelos y la succión que se encuentra en función de la diferencia de presiones entre la fase líquida y gaseosa de un suelo parcialmente saturado es un aspecto clave para determinar el comportamiento mecánico de dichos materiales. Esta relación puede ser definida mediante la Curva Característica de Succión en el Suelo (Soil Water Characteristic Curve - SWCC).

Existen suelos saturados, parcialmente saturados y secos, donde los saturados y secos están constituidos por partículas sólidas-agua y sólidas-aire. En los suelos parcialmente saturados, las fases involucradas son fases sólidas, agua y aire (Ochoa Meza, 2012). Los suelos saturados son los que se encuentran por debajo del nivel freático, por lo tanto, los vacíos están ocupados completamente por agua, ejerciendo una presión positiva en todas las direcciones.

Por encima de la línea del nivel freático se pueden encontrar los suelos secos o parcialmente saturados, siendo la zona más cercana a la superficie la zona de suelo seco (Ochoa Meza, 2012). Los suelos parcialmente saturados se encuentran entre el suelo seco y lo conocido como franja capilar. En la zona parcialmente saturada, los vacíos están llenos de agua y aire, con una presión de poros negativa, que se debe a la diferencia de fases (agua y aire) (Ochoa Meza, 2012).

2.4.1 Succión en Función de Parámetros Climáticos

El concepto de succión se origina del estudio de los suelos parcialmente saturados. Este se puede definir como la energía asociada a la capacidad del suelo para retener agua. Esta energía o succión total se divide en dos componentes: una asociada a la capilaridad del agua llamada Succión Matricial (Ψ_m) y una asociada a la presencia de sales en el agua, llamada succión osmótica π .

La succión matricial se expresa como la diferencia entre la presión del agua y la presión del aire en los poros. La presencia de sales en el agua reduce la presión de vapor que se encuentra sobre la interfaz agua-aire, por lo que se requiere mayor energía para remover una partícula de agua, esta energía se define como la succión osmótica y es independiente de la capilaridad. Finalmente, la succión total se calcula como la suma algebraica entre la succión matricial y la osmótica y puede ser expresada en unidades de presión.

La succión es una variable geotécnica de gran importancia, pues permite explicar los efectos de los cambios climáticos en los suelos, los cuales determinan el grado de saturación del suelo y dan paso a cambios en la succión matricial. Esta componente es significativa, por ende, los parámetros climáticos deben ser considerados para el cálculo de succión en el suelo. (Ochoa Meza, 2012)

En el presente documento los parámetros ambientales son considerados utilizando el siguiente método:

Para evaluar el impacto de la succión en función de clima, es necesario conocer el índice de humedad de Thornthwaite (TMI), el cual es un valor que puede obtenerse para cada región en función de la precipitación y evapotranspiración de la zona.

Además, debe conocerse el valor de P_{200} (valor pasando la malla #200 en decimales) y el valor de PI (índice de plasticidad en porcentaje) de los materiales utilizados. En este nivel debe de desarrollarse los ensayos necesarios para el cálculo de dichos valores. Con estos valores se calcula el valor de wPI (Witczak, Zapata, & Houston, 2006).

$$wPI = \frac{PI \cdot P_{200}}{100} \quad \text{Ecuación 1}$$

Luego de encontrar los valores de PI, P_{200} y WPI, se procede a utilizar las curvas en la Figura 2-3y la Figura 2-4, las cuales indican la matriz de succión en función del TMI y del valor de P_{200} o de wPI, respectivamente, dependiendo de si se está evaluando una base granular o la subrasante.

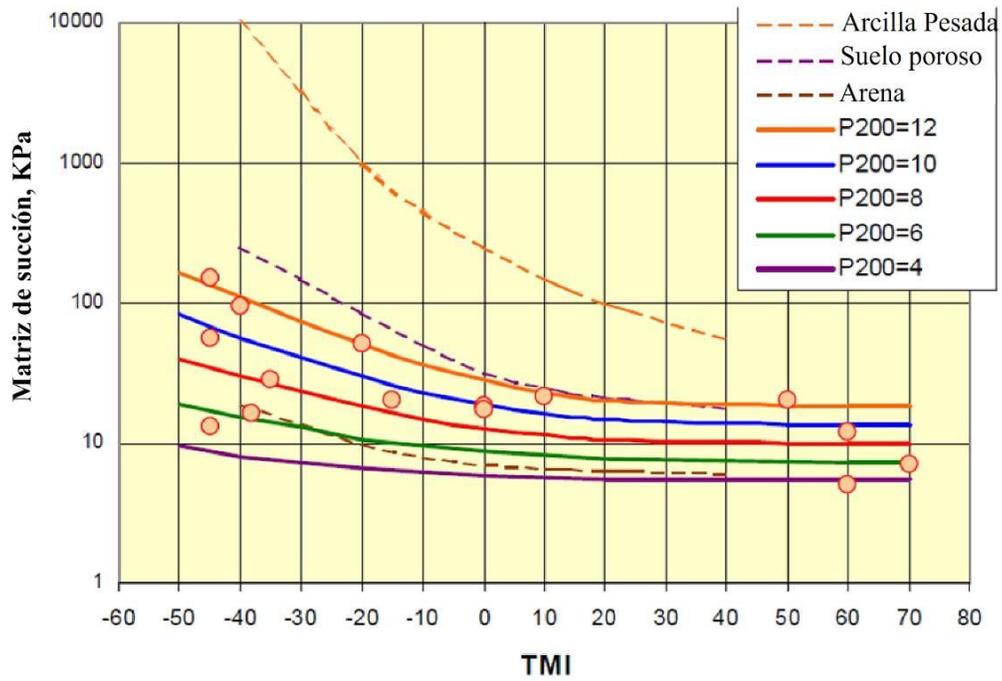


Figura 2-3. Modelo TMI-P200 para Bases Granulares
Fuente: (Witczak, Zapata, & Houston, 2006)

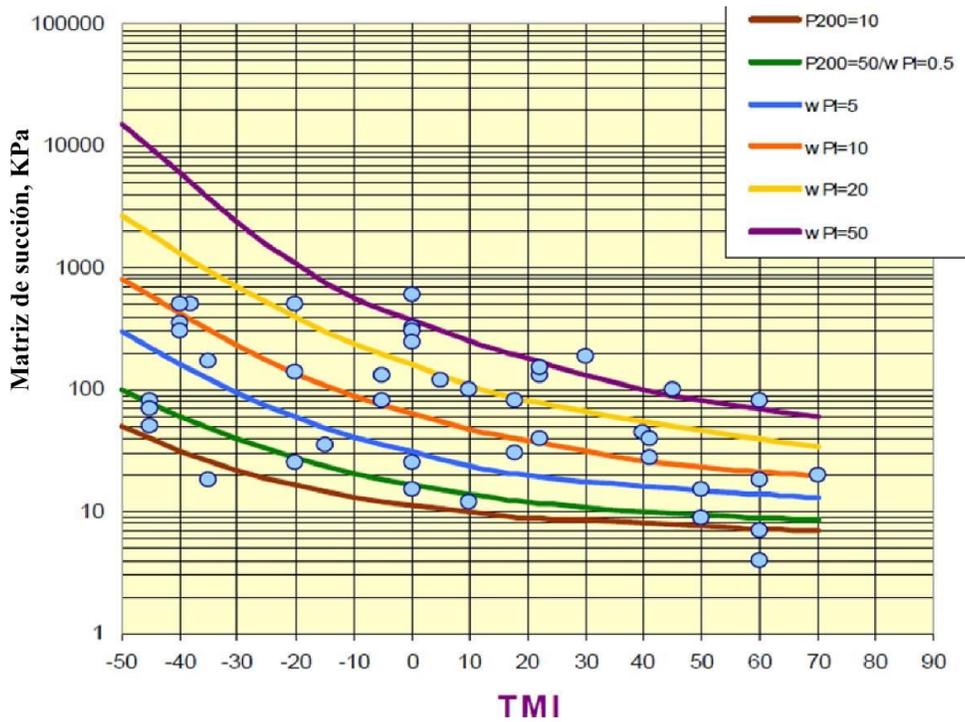


Figura 2-4. Modelo TMI-P200/wPI para Subrasantes
Fuente: (Witczak, Zapata, & Houston, 2006)

2.4.2 Relación entre Succión y Saturación

Esta relación se puede definir con la curva SWCC (Soil Water Characteristic Curve). Esta curva es importante para entender la mecánica de los suelos parcialmente saturados (Ochoa Meza, 2012). La cantidad de agua en el suelo se puede expresar en términos de saturación y es graficada en las ordenadas mientras que en las abscisas se grafica la succión total.

Esta curva no es única para un suelo debido a la histéresis, ya que la trayectoria de humedecimiento es distinta a la de secado (Zhai & Rahardjo, 2012). En la curva existen tres zonas, la zona de efecto de borde que indica que el suelo está saturado, de transición donde empieza una interfase de aire-agua y de saturación residual que es la etapa cuando la fase líquida deja de ser continua, tal como se muestra en la Figura 2-5. La relación de la succión y la saturación es influenciada por el tamaño de los poros, la variación en tamaños de partículas, densidad, contenido de arcilla y el tipo de suelo. Por lo tanto, en suelos gruesos la entrada de aires es menor.

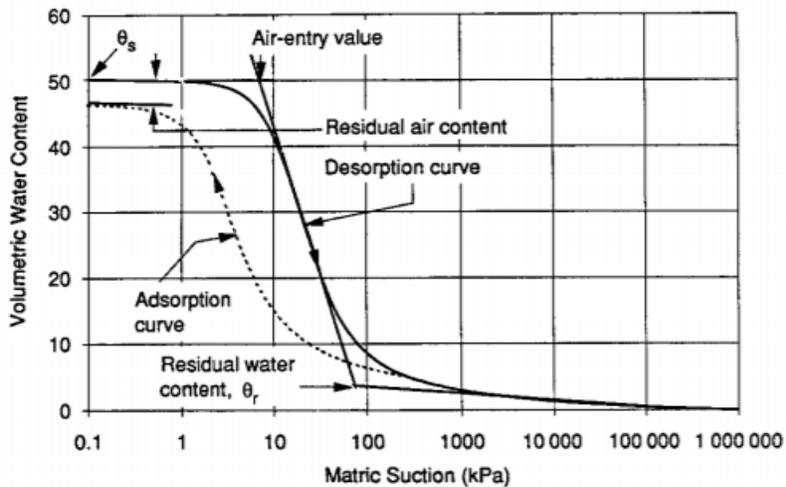


Figura 2-5. Componentes de la curva SWCC

La succión del suelo es comúnmente definida como la "el estado de energía libre de la humedad dentro del suelo y se relaciona con la condición de humedad del suelo con su comportamiento ingenieril (Sahin, Gu, & Lytton, 2014).

Existen diversos métodos para calcular la curva SWCC, ya sea el plato de presión, el papel filtro y/o el ensayo de la celda temperada basados en la normativa ASTM D6836, la cual

describe cinco métodos de medición de la succión del suelo y el contenido volumétrico de agua. Se describirán brevemente estos métodos a continuación.

El método de la columna colgante puede medir succiones en el rango de 0 a 80 KPa. La succión matricial se consigue decreciendo la presión de poro del agua y manteniendo la presión de gas en los poros a la condición atmosférica. El segundo método requiere una cámara de presión y sistema de medición volumétrica y es útil para succiones entre 0 y 1500 KPa. El tercer método es similar al segundo, con la excepción de que el contenido volumétrico de agua es medido de forma gravimétrica. En ambos métodos la presión de poro de agua se mantiene igual a la presión atmosférica y a presión de gas en los poros es incrementada con tal de aplicar succión. En todos estos métodos la muestra ha sido saturada y colocada en contacto con una placa o membrana saturada porosa y la succión es aplicada hasta que el agua deja de fluir de la muestra al tubo de capilaridad adjunto.

El método del higrómetro utiliza un potenciómetro de punto de condensación para medir la succión en el extremo seco de la curva SWCC. Mide a contenidos de agua más bajos y succiones mayores a 1000 KPa. Este método mide la succión de términos de succión total. Usa muestras muy pequeñas y es generalmente utilizado para medir puntos que serán combinados con una curva SWCC que ha sido medida por otros medios.

El último método es el de la centrífuga, el cual puede medir succiones de hasta 120 KPa. Este método es comúnmente usado con suelos más granulares.

Un aparato utilizado para la medición de la curva SWCC es el HYPROP, el cual utiliza el método de evaporación. El equipo se muestra en la Figura 2-6.

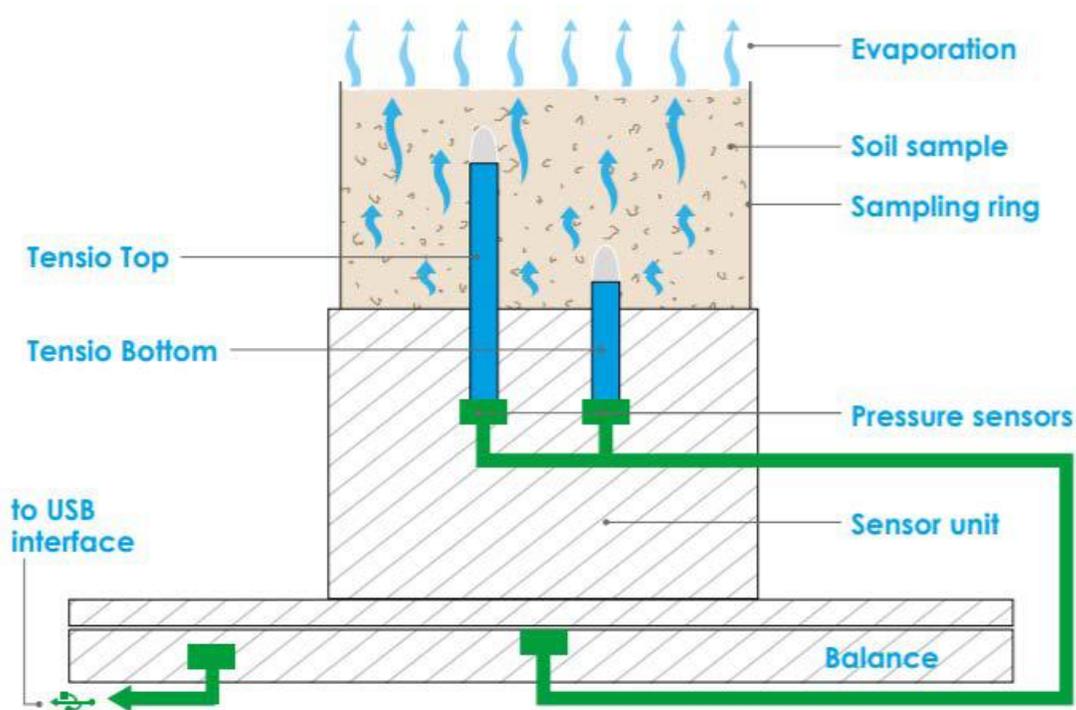


Figura 2-6. Diagrama del equipo HYPROP

Para este estudio se utilizaron las relaciones experimentales recomendadas en la guía estadounidense de diseño mecanístico empírico de pavimento flexibles (MEPDG)

Los parámetros de la curva SWCC se estiman por medio de los factores parámetro propuestos por Witczak et al. Estos factores son calculados de maneras diferentes dependiendo del tipo de material, ya sea material fino o granular.

En el caso de tener un material primordialmente fino con un índice de plasticidad (IP) mayor a cero es posible utilizar el modelo de curva SWCC propuesto por Fredlund y Xing (Fredlund & Xing, 1994).

Para cuantificar los daños por humedad es necesario conocer el contenido de humedad en las capas del pavimento, que no necesariamente tienen una correlación directa con la precipitación. La Curva Característica (Soil Water Characteristic Curve - SWCC) define la relación entre la succión y el contenido de humedad de un suelo (ver figura 2-7). Esta curva permite conocer la cantidad de agua retenida a diferentes esfuerzos, la disponibilidad de agua en el suelo y la capacidad total de retener agua. Según la geometría de los poros, la magnitud y composición mineralógica de la fracción fina así será la posición relativa, forma e inclinación de la curva.

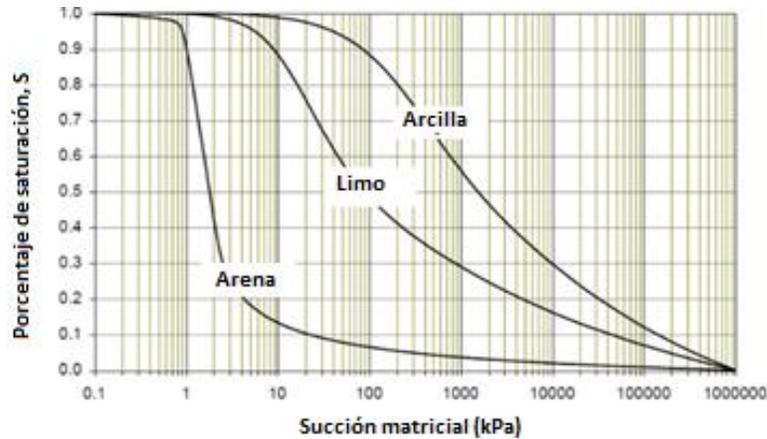


Figura 2-7. Curva característica de un suelo.

Fuente: NCHRP 1-40D Final Report Models incorporated into the current enhanced Integrated Climatic Model. Extraído de: (Mena W. B., 2013).

Por sus características, la Curva Característica SWCC resulta vital para modelar el flujo de la humedad en los suelos no saturados y por lo tanto predecir el contenido de humedad de las capas del pavimento. La succión es la diferencia entre la presión del aire y la presión del agua de los poros del suelo. Está directamente relacionada con la mayor o menor tendencia del suelo a absorber agua. Por encima del nivel freático y de la zona capilar las presiones de poro son negativas, generándose succión (Alfaro, 2008)

El potencial total de humedad del suelo (ϕ) es fundamentalmente una variable termodinámica. La siguiente ecuación muestra los componentes del potencial total (Witczak, Zapata, & Houston, 2006):

$$\phi = z + \varphi \tag{Ecuación 2}$$

Donde,

z : potencial gravitacional.

φ : succión total = $h_m + h_s$.

h_m : succión matricial = $u_a - u_w$.

h_s : succión osmótica.

u_w : presión del agua en los poros.

u_a : presión del aire en los poros.

Asumiendo que el potencial gravitacional es cero, el potencial total puede expresarse como:

$$\phi = \varphi = (u_a - u_w) + h_s \quad \text{Ecuación 3}$$

Es común asumir con fines ingenieriles que la succión osmótica es insignificante, por ello la ecuación anterior puede expresarse en términos de la succión matricial únicamente. Además, es común que la presión del aire de los poros sea igual a la presión atmosférica ($u_a = 0$), de forma que el potencial total depende solo de la presión de poro negativa:

$$\varphi = -u_w \quad \text{Ecuación 4}$$

Según (Garnica & Barrera, 2002) la succión matricial es la presión negativa de agua intersticial, está directamente relacionada con el estado de esfuerzo derivado de los fenómenos de la superficie y gravitatorios. Por otra parte, la succión osmótica es la relacionada con la presión osmótica derivada de la composición del agua.

Sin el efecto de la succión resulta imposible definir el estado de esfuerzo y entender la respuesta a deformación de un suelo parcialmente saturado. La componente matricial de la succión es reconocida por su influencia en estas propiedades del suelo, sin embargo, no existe evidencia clara sobre el efecto de la succión osmótica.

Numerosos estudios se han dedicado a determinar el papel de la succión. En su investigación Garnica & Barrera (2002) menciona que los suelos arcillosos compresibles experimentan cambios en su relación de vacíos como consecuencia de los cambios en la succión. Un aumento de la succión puede producir deformaciones permanentes (irrecuperables) en suelos arcillosos.

Así mismo, se ha demostrado que, para suelos colapsables y arcillas expansivas, un aumento de la succión contribuye a un incremento de la rigidez y del grado de sobre consolidación del suelo, ya que actúa en las uniones entre partículas, incrementando las fuerzas que las mantienen unidas.

2.5 EFECTOS AMBIENTALES EN EL DESEMPEÑO DE LOS PAVIMENTOS

Un pavimento idealmente diseñado y construido debe ser capaz de resistir las variaciones estacionales del clima. Los cambios de temperatura, las fuertes lluvias, aunadas a malos drenajes y poco mantenimiento, exponen la infraestructura vial del país a deterioros acelerados.

Para evitar una falla prematura de la estructura del pavimento, se debe considerar en el diseño todos los factores que afectan la variación de la temperatura del pavimento y el contenido de humedad de las capas granulares. La determinación de dicha variación requiere la utilización de modelos climáticos. Estos modelos serán descritos con mayor detalle a lo largo de la investigación. Estos incluyen los modelos de transferencia de calor para determinar la distribución espacial y temporal de temperaturas, los modelos de equilibrio para determinar la distribución final de humedades a nivel de la subrasante y los modelos de infiltración y drenaje para poder predecir el grado de saturación en capas granulares.

Los modelos climáticos requieren los parámetros climáticos y las propiedades térmicas de los materiales. Los datos climáticos incluyen las temperaturas del aire promedio, máximas y mínimas, la velocidad del viento, la precipitación y la radiación. Las propiedades térmicas incluyen la conductividad térmica, el calor específico y el punto de fusión de los materiales.

El clima y el tráfico son los factores externos más influyentes en el pavimento, pueden ocasionar un progresivo deterioro a lo largo de su vida útil. Los principales factores ambientales que influyen en el desempeño de la estructura se explican a continuación.

2.5.1 Afectaciones de la precipitación

El efecto de la humedad en el pavimento se determina según la precipitación, las condiciones geográficas, la saturación, la infiltración, las condiciones topográficas y las condiciones de drenaje. La cantidad y la intensidad de las precipitaciones, en forma de lluvia o nieve, afectan la profundidad del nivel freático y la cantidad del agua superficial que se infiltra en el subsuelo.

El agua puede ingresar a la estructura del pavimento por infiltración a través de grietas en la carpeta asfáltica, infiltración de agua a través de los hombros, zanjas laterales o cunetas sin pavimentar, filtración desde un terreno más alto que la carretera, por fluctuaciones del nivel freático y por la ascensión capilar desde el nivel freático (figura 2-8). En todos los casos estos aspectos contribuyen a la degradación de la capacidad soportante de la estructura.

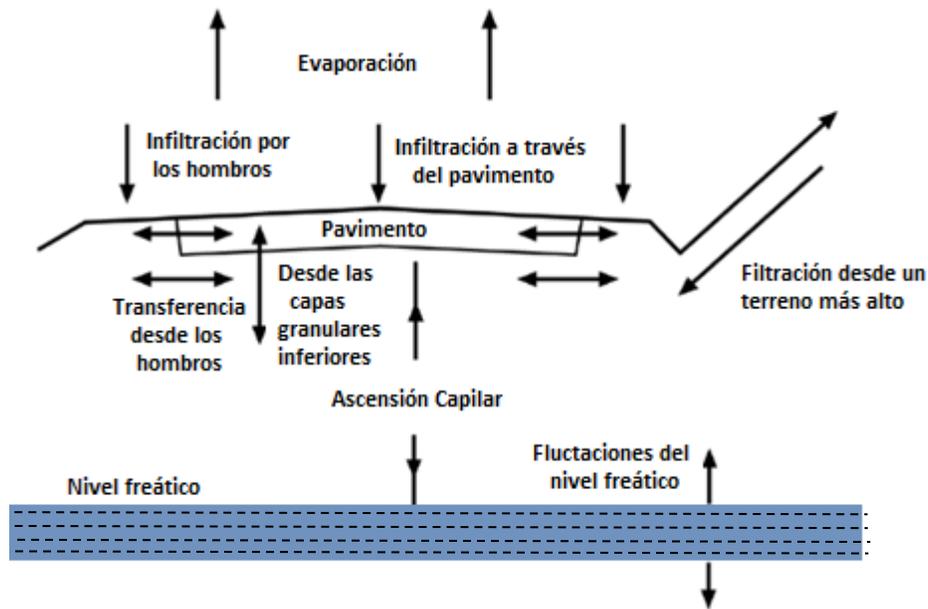


Figura 2-8. Posibles movimientos de la humedad en la carretera.

Fuente: (Austroads Ltd , 2012).

El agua afecta la estructura del pavimento modificando o alterando las propiedades de los materiales como el módulo resiliente, la resistencia al esfuerzo cortante, la cohesión, la susceptibilidad a la expansión y contracción, la erosión, el grado de compactación, el envejecimiento del asfalto y la adherencia entre los agregados y el asfalto.

Materiales granulares y suelos

El módulo resiliente (M_r) es una propiedad que sirve como dato de entrada para el diseño, la evaluación y el análisis de pavimentos. El módulo resiliente se mide en ensayos de carga cíclica y se define como el cociente entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación recuperable (elástica) medida.

Este módulo se refiere a la capacidad de un material de recuperar su forma original después de haber sido deformado, por lo que no es indicador de la resistencia de un material sino una medida de la rigidez del material y un indicador de su calidad o condición.

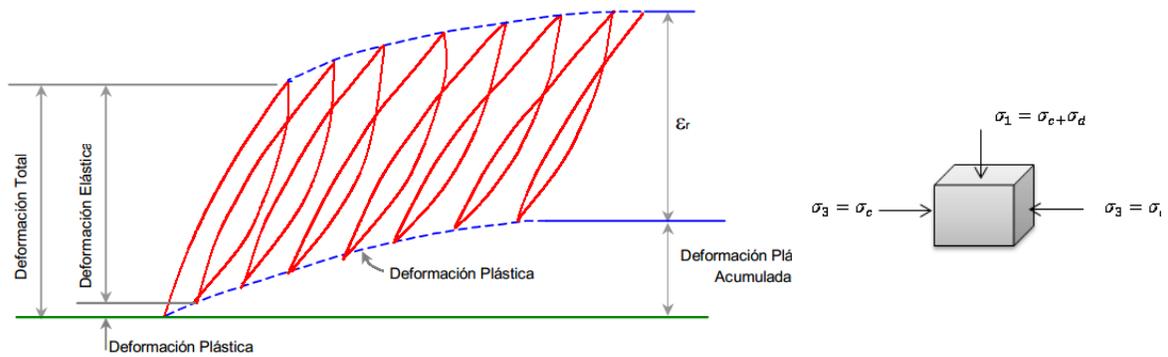


Figura 2-9. Gráfico de deformaciones bajo cargas repetidas y diagrama de esfuerzos principales.

Fuente: <http://www.cismid.uni.edu.pe>.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \text{ con } \sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde,

σ_1 : esfuerzo principal (esfuerzo desviador y esfuerzo confinante)

$\sigma_c = \sigma_3$: esfuerzo confinante.

σ_d : esfuerzo desviador.

En el Cuadro 2-1 se presentan los factores que modifican el módulo resiliente de los materiales cohesivos, así como la manera en que los modifica.

Cuadro 2-1. Factores que afectan el módulo resiliente de los materiales cohesivos y el efecto de aumentar el valor del factor.

Factor	Efecto en el M_r de incrementar el factor
Densidad	Crece
Humedad de compactación	Crece hasta el valor de humedad óptimo y luego decrece
Esfuerzo normal promedio	Crece
Esfuerzo cortante	Decrece
Contenido de humedad	Decrece
Años de servicio	Sin cambios directos
Temperatura	Sin cambios

El comportamiento mecánico de los suelos está condicionado por su humedad, la distribución de las cargas vehiculares en un suelo drenado y saturado son muy distintas (figura 2-10). Cuando el material está drenado los esfuerzos son absorbidos por las partículas del suelo, de manera que al llegar a la subrasante los esfuerzos han sido disipados. Cuando el suelo está saturado, es el agua de los poros la que absorbe los esfuerzos, transmitiendo a la subrasante la totalidad de los esfuerzos.

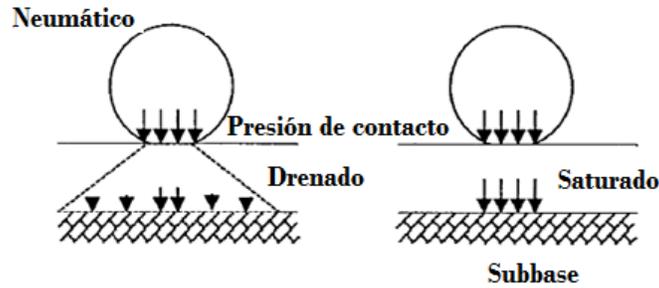


Figura 2-10. Distribución de los esfuerzos en capas del pavimento flexible drenadas y saturadas.

Fuente: (Papagiannakis & Masad, 2008).

2.6 METODOLOGÍA PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS

La metodología de diseño MEPDG, se basa en principios mecánico-empíricos para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones influenciadas por diferentes factores, que son utilizados como variables (Matiz Flórez, 2015). Estas variables son el tránsito el cual es calculado con espectro de carga de cada eje específico, el clima que es de gran importancia en el deterioro del pavimento ya que las propiedades tanto de la mezcla como capas granulares pueden variar, la subrasante es otra variable importante ya que es base para la determinación de espesor de la estructura de pavimento y por último la caracterización de los materiales que se pretenden usar en la estructura.

Esta metodología emplea tres diferentes niveles que categoriza que tan exactos son los datos ingresados. Existe el nivel I el cual quiere decir que todos los datos de entrada son conocidos con exactitud (Matiz Flórez, 2015). El nivel II es para los casos en que los parámetros de entrada son calculados a través de correlaciones o valores regionales. El último nivel, el nivel III los parámetros de entrada usados, son los valores por defecto (Matiz Flórez, 2015). Con este método de diseño es posible tener una relación directa entre ensayos de caracterización de materiales, datos de tráfico y clima y el comportamiento de los materiales frente a estos factores. Esto permite que el uso de materiales no sea limitado

siempre y cuando se tenga información básica de estos y permite determinar la influencia de los materiales granulares en la estructura dependiendo del tráfico y de las temporadas climáticas.

Existen diversas variables necesarias para el desarrollo del diseño de un pavimento flexible. Algunas de estas variables sirven para caracterizar los materiales granulares que compondrán la estructura de pavimento flexible. Es fundamental conocer el módulo resiliente (MR) de estas capas, ya sea por correlación de alguna otra propiedad del suelo o medición directa a través del ensayo de modulo resiliente. Dependiendo de la forma en que se obtenga este valor el nivel de entrada sería I o II. Sin embargo, es importante saber que este valor puede variar dependiendo del estado de saturación del suelo, lo que es influenciado por factores climáticos. Es por esto por lo que es de gran importancia conocer estas variaciones, ya que los cambios de propiedades de estas capas pueden afectar notablemente el desempeño del pavimento.

Para la aplicación del modelo se supondrá que los materiales utilizados son granulares, pues el modelo del AASHTO realizó una mayor cantidad de ensayos para este tipo de materiales, por lo cual se tiene una mayor confiabilidad de los coeficientes obtenidos bajo esta suposición.

El modelo anterior reemplaza al modelo utilizado en la guía de diseño empírica AASHTO 93 para tomar en cuenta las variaciones del módulo de la subrasante debido a los cambios de estación.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar el módulo resiliente de la subrasante en función de la saturación mediante una verificación con mediciones directas para arcillas blandas del norte de la ciudad de Bogotá, con el fin de determinar su aplicabilidad en el diseño de pavimentos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el módulo resiliente mensual mediante mediciones directas realizadas en laboratorio.
- Estimar el módulo resiliente a partir de las propiedades índices empleando modelos actuales de predicción.
- Establecer la relación entre los módulos obtenidos en laboratorio y los calculados empleando modelos, con el fin de verificar su aplicabilidad en el diseño de pavimentos.

4 METODOLOGÍA

4.1 FASE 1 - RELACIÓN ENTRE MÓDULOS

- Realizar exploraciones de campo y ensayos de laboratorio con el fin de determinar las propiedades índices del suelo.
- Realizar ensayos de módulo resiliente a muestras inalteradas, empleando los equipos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Estimación del módulo resiliente con base en los modelos recomendados por las recientes investigaciones de la Arizona State University.

4.2 FASE 2 – APLICABILIDAD AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

- Emplear el modelo de Thornthwaite para estimar la succión de los suelos de subrasante en función de las precipitaciones y temperaturas de la ciudad de Bogotá.
- Emplear los modelos recomendados para estimar las curvas SWCC mediante las propiedades índices de los suelos.
- Presentar una metodología, basada en los datos obtenidos por esta investigación, para determinar el módulo resiliente de arcillas blandas en el norte de la ciudad de Bogotá, que permita realizar diseños de pavimentos que involucren la mecánica de suelos parcialmente saturados.

4.3 FASE 3 – DOCUMENTO DE PRESENTACIÓN

- Elaboración de un documento técnico para revisión y aprobación por parte del comité evaluador de la Universidad.

5 EXPLORACIÓN DE CAMPO

Para este trabajo de tesis, la exploración de campo consistió en realizar apiques a una profundidad de 2 a 3 metros en las arcillas blandas de la ciudad de Bogotá, específicamente las encontradas en la Escuela Colombiana de Ingeniería (norte de la ciudad).

El Cuadro 5-1 muestra las profundidades de cada una de las muestras utilizadas en el estudio.

Cuadro 5-1. Profundidades de las muestras

Mes	Profundidad, m
Enero	2,4-2,55
Febrero	2,56
Marzo	2,4
Abril	-
Mayo	1,8-2,4
Junio	2,7-2,87
Julio	2,87
Agosto	1,98-2,27
Setiembre	2,87
Octubre	2,73-2,87
Noviembre	2,65-2,55
Diciembre	2,19-2,37

La ubicación en que se realizaron los apiques se muestra en la Figura 5-1.



Figura 5-1. Ubicación de la toma de los apiques (Escuela Colombiana de Ingeniería)

Fuente: Google Earth

Dicha exploración fue orientada a la recuperación de muestras inalteradas para la ejecución tanto de ensayos de módulo resiliente como de CBR y a la vez obtener material para establecer propiedades índices de dichos suelos mediante ensayos convencionales de clasificación.

Las exploraciones de campo fueron realizadas mensualmente durante un periodo de tiempo de un (1) año, donde se esperaba obtener las diferencias en el comportamiento mecánico de los suelos de subrasante en función las diferentes épocas del año. Para realizar el ejercicio y obtener una mínima variación en los suelos encontrados, se realizó una delimitación del terreno como se muestra en el siguiente esquema.

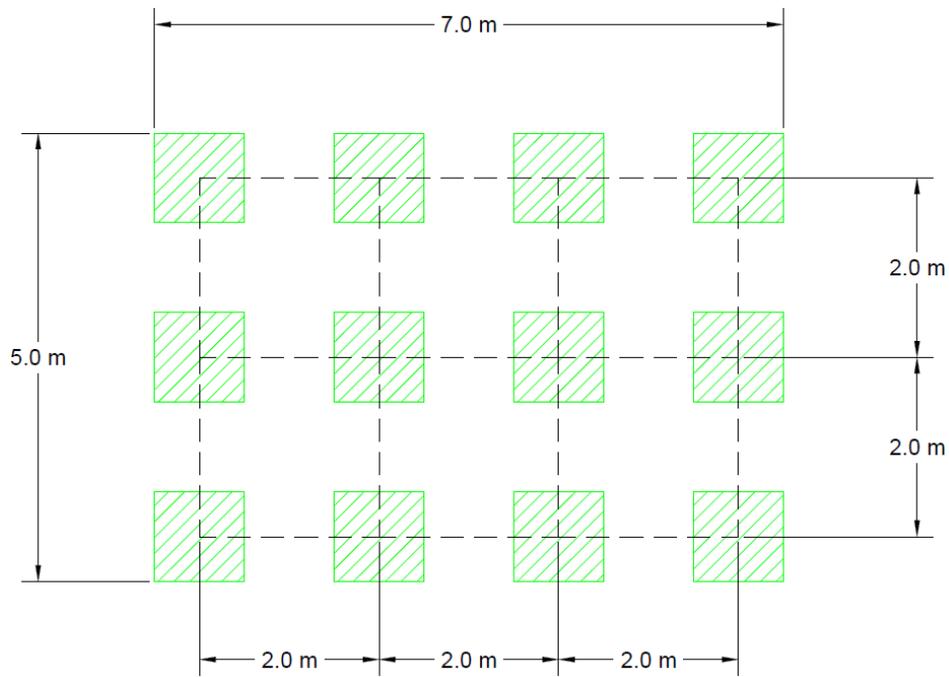


Figura 5-2 Esquema de Exploraciones de Campo

La exploración de campo se realizó en la Escuela Colombiana de Ingeniería, siguiendo el esquema presentado en la Figura 5-2. En las figuras Figura 5-3 a Figura 5-7 se muestran los apiques con los cuales se realizaron los ensayos mediante el registro fotográfico realizado en campo al momento de realizar las exploraciones.



Figura 5-3 Ubicación y Registro Fotográfico



Figura 5-4 Ubicación y Registro Fotográfico



Figura 5-5 Ubicación y Registro Fotográfico



Figura 5-6 Ubicación y Registro Fotográfico



Figura 5-7 Ubicación y Registro Fotográfico

6 ENSAYOS DE LABORATORIO

6.1 GRANULOMETRÍA

La determinación de distribución de tamaños en los suelos explorados se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma de Determinación de los Tamaños de las Partículas de los Suelos INV E-123-13. Para este ensayo se necesita una balanza, un grupo de tamices que cubran gran mayoría de los tamaños de partículas y un horno.

Dependiendo del material, el análisis granulométrico puede ser realizado con o sin lavado previo. El lavado permite determinar la cantidad de pasa 200 de la muestra. La muestra para este ensayo dependerá del tamaño máximo de las partículas para tamaños retenidos por el tamiz No.10 para los tamaños que pasen este tamiz los pesos deben ser de 115 g para suelos arenosos y 56 g para suelos arcillosos (Instituto Nacional de Vías).

6.2 HUMEDAD NATURAL

Para determinar el contenido de agua en condición natural, se realizó el procedimiento descrito mediante la norma de ensayo INV E-122-07. Este contenido puede ser determinado conociendo la masa de la muestra y luego se seca a temperatura constante hasta que el peso este constante. Para la realización de este ensayo es necesario tener horno, balanza y recipientes.

La determinación de humedad se debe hacer lo más pronto posible después de haber tomado la muestra, para evitar condensación. El tamaño de la muestra depende del tamaño máximo de las partículas.

6.3 LÍMITES DE ATTERBERG

Los siguientes ensayos se realizaron con base en las normas INV E-125-07 y E-126-07.

6.3.1 Límite Líquido

El límite líquido se puede determinar por dos métodos. El primero es con aproximadamente 100 gramos de muestra para colocarla en una vasija de evaporación y es mezclada inicialmente con aproximadamente 20 ml de agua y de ser necesario se agrega más hasta crear una pasta uniforme y dura (Instituto Nacional de Vías, 2019). Al tener esta pasta, se debe extender en la cazuela con la espátula hasta dejarla de 10 mm de espesor. Luego, a esta capa se le hace una ranura en el centro para dividir la pasta en dos. Seguido este procedimiento se le dan golpes a la cazuela con una velocidad de 2 revoluciones por segundo hasta que la ranura se cierre a lo largo de una distancia de 13 mm (Instituto

Nacional de Vías, 2019). Se debe anotar el número de golpes necesario para que esto suceda. Se toma una porción del suelo que contenga parte de la ranura donde el suelo se unió y de las dos porciones del suelo y se toma su peso. Se pone en el horno a 110°C hasta obtener una masa constante (Instituto Nacional de Vías, 2019). Se repite el procedimiento con el suelo restante dos veces adicionales, la oscilación de los 3 ensayos debe ser de por lo menos 10 golpes. El límite líquido se determina con la intersección entre el contenido de humedad y el número de golpes.

6.3.2 Límite Plástico

El límite plástico se determinó mediante el siguiente procedimiento, el cual está acorde con la respectiva norma de ensayo INV E-126-07. Este límite es el contenido más bajo de agua donde el suelo permanece en estado plástico. Para determinarlo es necesario tomar una muestra de 20g que pase por el tamiz No.40 (Instituto Nacional de Vías, 2019). El material es amasado con agua destilada hasta que se pueda formar una esfera con el suelo. De este material amasado se toman aproximadamente 6g y se divide en porciones de 1.5 a 2g. Con estas muestras de suelo se deben formar rollos de suelo de 3mm de diámetro. Estos se hacen de manera manual rodando la masa con la palma de la mano sobre una superficie lisa sin aplicar mucha presión (Instituto Nacional de Vías, 2019). Cuando se logren los rollos de 3mm, estos se dividen en ocho trozos, los cuales luego se juntan y se aprietan entre los dedos y se vuelven a hacer los rollos.

Este procedimiento se realiza las veces que sea necesario hasta que se desmorone el suelo. Se unen estas porciones y se colocan en un recipiente con tapa (Instituto Nacional de Vías, 2019). Este procedimiento debe realizarse hasta que la totalidad de la muestra quede ensayada. Al suelo en los recipientes se les toma el contenido de humedad. El límite plástico será la razón entre la masa de agua y la masa de suelo seco. El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

6.4 COMPACTACIÓN DE SUELOS MEDIANTE ENSAYO PROCTOR

Este ensayo de laboratorio se realizó siguiendo la metodología propuesta por el Invías mediante su norma INV E-142-07. Este ensayo sirve para determinar la relación de humedad y masa unitaria. Dependiendo del tipo de suelo el molde utilizado varía. Los moldes son cilíndricos y metálicos, con collares ajustables de 60 mm de altura (Instituto Nacional de Vías, 2019). También se utiliza un martillo de operación manual o mecánica

que tenga una altura de caída libre de 475 mm. La muestra es mezclada con agua para humedecerla a un nivel 4% debajo del contenido óptimo de humedad. Luego el espécimen es preparado compactándolo dentro de los moldes en tres capas iguales y que den una altura total de 125mm. Las capas deberán compactarse con 25 golpes cada una (Instituto Nacional de Vías, 2019).

Luego se pesa el molde y se determina la masa unitaria del suelo húmedo. Seguido a esto se extrae la muestra del molde y se corta verticalmente. Se toma el peso de una de estas muestras y se procede a secar en un horno (Instituto Nacional de Vías, 2019). La porción restante se rompe para que logre pasar por el tamiz No.4. Se humedece nuevamente y se repite el procedimiento hasta que no haya cambio en la masa unitaria (Instituto Nacional de Vías, 2019).

Luego se determina el porcentaje de humedad y la masa unitaria seca. La masa unitaria será la ordenada de la gráfica y las humedades las abscisas (Instituto Nacional de Vías, 2019). En la gráfica, el pico será la humedad óptima y su masa unitaria seca máxima (Instituto Nacional de Vías, 2019).

6.5 CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO MEDIANTE ENSAYO DE CBR

La capacidad de soporte del suelo o valor de la relación de soporte (índice CBR), corresponde al tanto por ciento de la presión ejercida por el pistón sobre el suelo para obtener una penetración determinada, respecto a la presión dada para una muestra patrón. El ensayo fue desarrollado siguiendo la norma de ensayos INV E-148-07. Las características de la muestra patrón indican que a 0,1 pulgadas (2,54 mm) la presión es de 1,0 psi (6,90 MPa) y a 0,2 pulgadas (5,08 mm) la presión es de 1,5 psi. (10,35 MPa).

Para calcular el índice CBR, se grafican las presiones (ordenadas) y las penetraciones (abscisas) y se busca un punto de inflexión. Si no está presente, se toman los valores a 2,54 mm y 5,08 mm de penetración. Si la curva presenta punto de inflexión, la tangente a la curva en ese punto cortará el eje de las abscisas en otro punto, el cual será el nuevo origen para la determinación de las presiones a 2,54 y 5,08 mm. La Figura 6-1 muestra un ejemplo de lo descrito anteriormente.

Con estos valores se calculan los valores de Relación de Soporte dividiendo las presiones correspondientes por los esfuerzos de referencia y se multiplica por 100 con tal de representarlos como un porcentaje.

Basándose en los tres especímenes ensayados aplicando un número diferente de golpes a la muestra, se traza la curva densidad seca-CBR. A partir de esta curva se determina el CBR al porcentaje deseado de la densidad seca máxima. La cantidad de golpes de compactación recomendados son 10, 30 y 65 golpes por capa en caso de no realizarse en una muestra inalterada, tal como se realizó en esta investigación. Más de 56 golpes por capa son requeridos para moldear especímenes de CBR al 100% de la máxima densidad seca, determinado según la norma INV E-141. También es posible realizar un solo ensayo a la densidad seca máxima y con el contenido óptimo de humedad, tal como se indica en las normas INV E-141 o INV E-142.

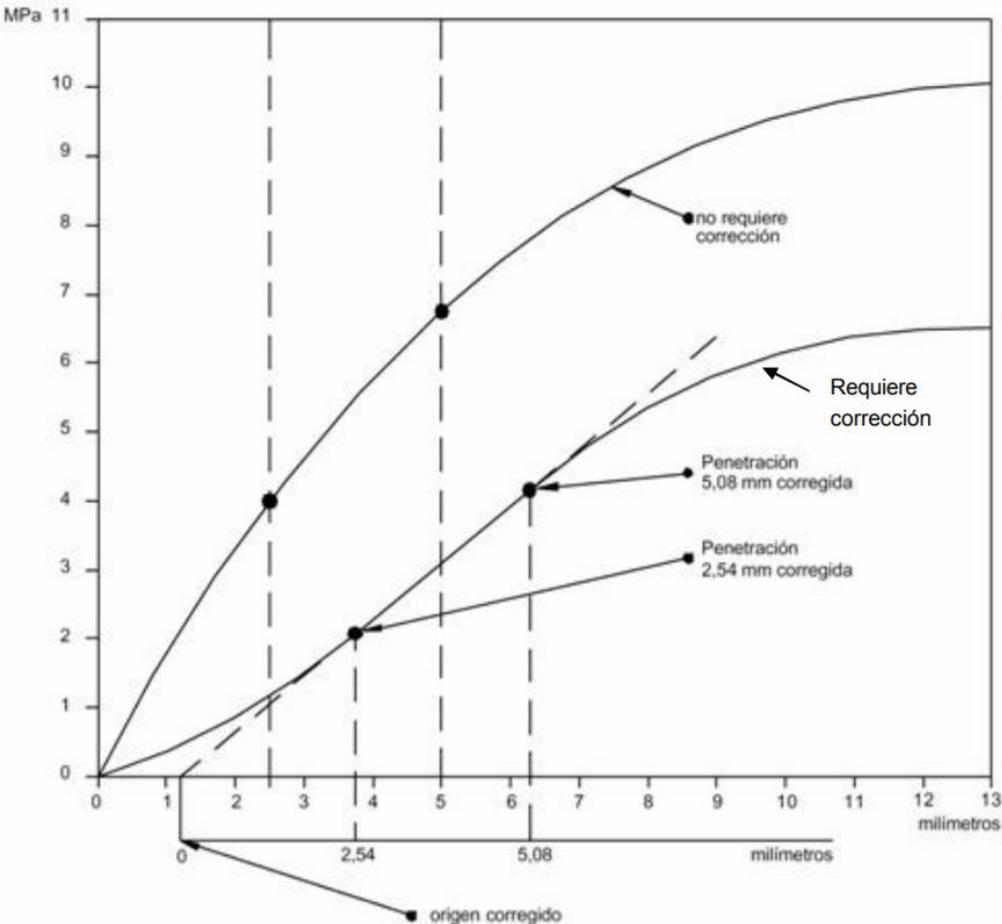


Figura 6-1. Curva de presiones de penetración

6.6 ENSAYO DE MODULO RESILIENTE

El ensayo de modulo resiliente se realizó utilizando la metodología descrita en el Procedimiento II de la norma internacional NCHRP I-28A como se mencionó en la Sección 2.3.2. Se seleccionaron las ubicaciones ya mencionadas para obtener especímenes durante cada mes del año. Estos especímenes fueron ensayados con el fin de conocer el módulo resiliente teniendo en cuenta las condiciones climáticas de cada mes.

La Figura 6-2 muestra en detalle el ensamblaje utilizado para someter los especímenes de suelo a carga cíclica axial con el fin de obtener el módulo resiliente. Estos ensayos fueron realizados en el laboratorio del departamento de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingenieros.

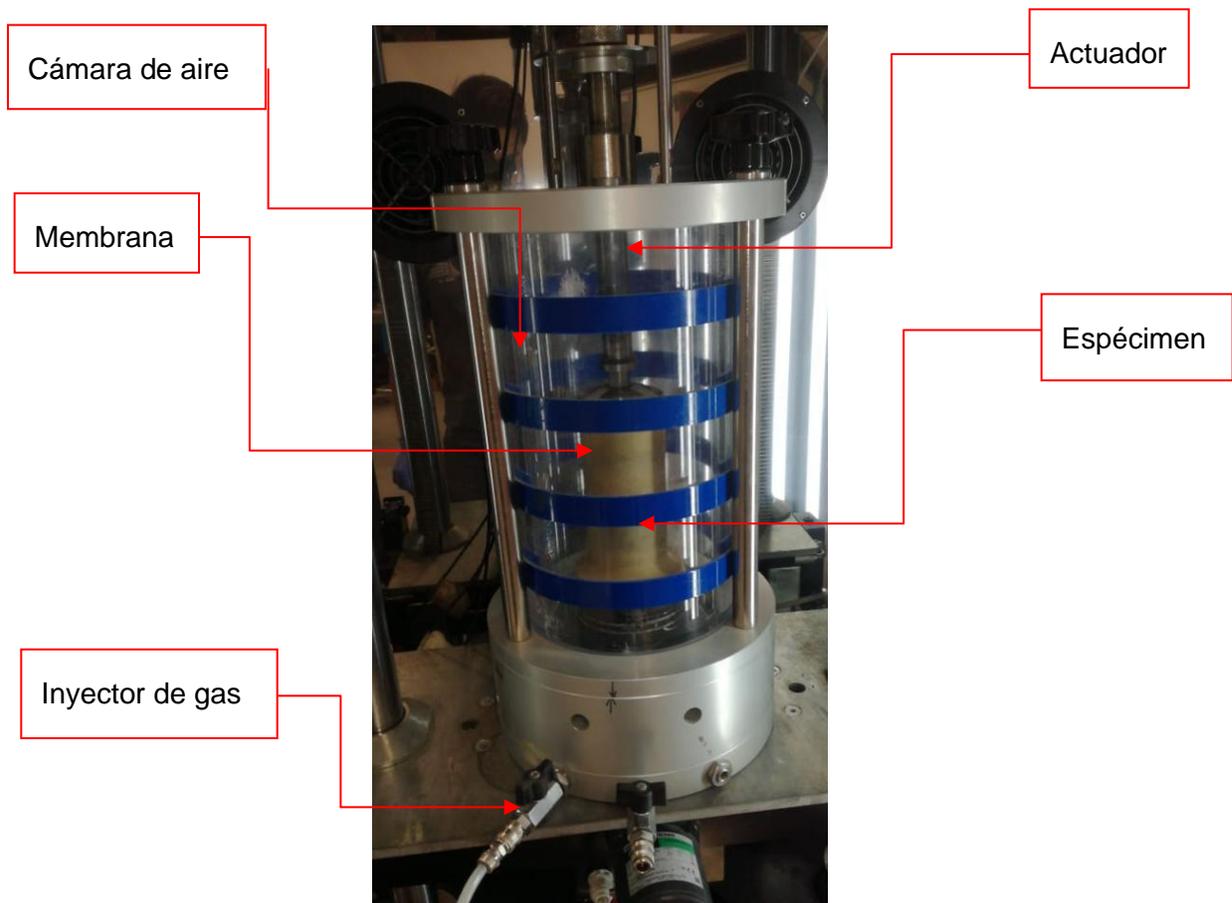


Figura 6-2. Montaje para realización del ensayo de Modulo Resiliente (Mr)

7 RESULTADOS DE MODULO RESILIENTE POR MEDIO DE ENSAYO

El procedimiento para el cálculo del módulo resiliente (M_r) se realizó siguiendo las especificaciones estipuladas en la metodología NCHRP I-28A.

7.1 PROPIEDADES ESFUERZO DEPENDIENTES DE SUELOS

Las propiedades mecánicas de suelos finos cambian en función de los esfuerzos aplicados al mismo.

Usando el modelo universal de Witczak mostrado en la Ecuación 6, es posible tener en cuenta estas propiedades y así obtener un módulo resiliente más cercano al real bajo condiciones de tráfico reales. Este modelo permite calcular el módulo resiliente producto de la condición de esfuerzos a los que está sometido el material.

$$M_R = k_1 \times Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{k_3} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

M_R : Modulo resiliente

Pa : Presión atmosférica

θ : Esfuerzo invariante

τ_{oct} : Esfuerzo de corte octaédrico

Con $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ y $\tau_{oct} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{3}$.

Donde, σ_1, σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales.

k_1, k_2 y k_3 son parámetros de regresión lineal.

De los datos del ensayo se obtienen el esfuerzo de confinamiento σ_{conf} , el esfuerzo desviador σ_d y el módulo resiliente M_r .

Las ecuaciones Ecuación 7 y Ecuación 8 muestran la relación utilizada a partir de los datos del ensayo para calcular θ y τ_{oct} .

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_{conf} + \sigma_d \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{3} = \frac{\sqrt{2\sigma_d^2}}{3} = \frac{\sigma_d\sqrt{2}}{3} \quad \text{Ecuación 8}$$

Los parámetros k_1, k_2 y k_3 son obtenidos al aplicar logaritmo en cualquier base a los módulos resilientes, $a\theta/Pa$ y $\tau_{oct}/Pa + 1$. Se realiza una regresión lineal múltiple con los logaritmos de los módulos resilientes como los valores dependientes.

El modelo tendrá la forma que se muestra en la Ecuación 9. De esta forma, $k_1 = a^{m_1}$, $k_2 = m_2$ y $k_3 = m_3$.

$$\log_a M_r = m_1 + m_2 \log_a \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + m_3 \log_a \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

Para cada uno de los meses se encuentran los parámetros correspondientes del modelo universal, utilizando la humedad inalterada encontrada al extraer el espécimen.

De esta manera, se logra evaluar de manera efectiva la precisión de los modelos de variación del módulo resiliente en función de la humedad de los suelos, comparando el módulo resiliente de los suelos medido directamente y el estimado por medio de los modelos. El estado de esfuerzos en la muestra varía en cada ciclo.

Se deben realizar 1000 ciclos de condicionamiento y 100 por cada una de las 16 secuencias. Para cada mes se evaluaron dos muestras. Se toma el promedio de los últimos cinco datos de cada secuencia.

Este procedimiento se debe realizar pues el módulo resiliente de las bases, subbases y subrasantes es esfuerzo dependiente, es decir que para que cada valor de carga del espectro de carga se tendrá un valor distinto de módulo resiliente para cada una de las capas.

De acuerdo con la tesis para obtención del grado de Doctor en Ingeniería Civil Método de dimensionamiento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos, de Proença, Franco, una cantidad de 4 iteraciones es suficiente para encontrar un valor de módulo ante una carga específica (de Proença Franco, 2007). Este proceso iterativo es explicado con mayor

detenimiento posteriormente. El proceso consiste en colocar un módulo resiliente en el modelo de multicapa elástico y obtener los esfuerzos en la parte superior de la subrasante, con estos esfuerzos y la Ecuación del modelo Universal se estima un nuevo módulo resiliente de la subrasante. El proceso se itera hasta que la diferencia entre dos módulos resilientes consecutivos sea menor que la tolerancia.

7.2 CÁLCULO DE MÓDULO RESILIENTE POR MEDIO DE LA TEORÍA DE MULTICAPA ELÁSTICA

La teoría de multicapa elástica permite calcular esfuerzos y deformaciones en cualquier punto de un sistema multicapa de cualquier material que ha sido sujeto de una carga aplicada en la superficie. Los supuestos de la teoría se enlistan a continuación:

- Cada capa debe estar representada por dos propiedades: Módulo y relación de Poisson.
- Cada capa cuenta con propiedades homogéneas e isotrópicas.
- Cada capa es finita en la dirección vertical, infinita en la dirección horizontal y la última capa cuenta con profundidad infinita.
- La carga aplicada es uniforme y tiene un área circular.

Para este estudio, se asumió la estructura base mostrada en la Figura 7-1. La elección de la estructura es simplemente con fines comparativos, por lo cual se asumió una estructura común recomendada para un tráfico medio según la guía colombiana de diseño de pavimentos. Se asumió espesores, módulo resiliente, relación de Poisson y densidad seca máxima para la carpeta asfáltica, la base granular, la subbase y la subrasante. Se asume la mitad de un eje simple estándar de 80 KN y una presión de inflado de 750 KPa.

Se calculan los esfuerzos verticales en la parte superior de la subrasante producto del eje de diseño, utilizando la teoría de multicapa elástica y se suman los esfuerzos producidos por el peso propio de las capas superiores.

Para realizar los cálculos de los esfuerzos, se utilizó el software OpenPave, creado por Jeremy Leah, de la Universidad de California en Davis (Leah, 2019). El programa es de uso libre para tesis e investigaciones académicas y fue introducido en la aplicación realizada como parte de este trabajo de investigación, de manera que los cálculos son realizados internamente por el programa al recurrir a la función de multicapa elástica desarrollada en el software OpenPave como una librería y de este modo obtener los esfuerzos necesarios.

Con los valores obtenidos de esfuerzos, se calculan θ y τ_{oct} , con lo cual se estima el valor de módulo resiliente, utilizando el modelo universal específico de dicho mes para el suelo estudiado. Se realiza un proceso iterativo sustituyendo el valor obtenido de módulo resiliente hasta que la diferencia entre módulos resilientes de la subrasante en dos procesos consecutivos sea menor a 1 MPa.

Cabe resaltar que las condiciones del pavimento supuestas y las cargas del vehículo influyen en los valores de módulo resiliente obtenido, lo cual puede influir en la comparación con los modelos de variación de módulo resiliente en función de las condiciones climáticas. Es por este motivo que se realizará un análisis de sensibilidad de espesor y módulos resilientes con tal de verificar que tan confiables son los valores obtenidos.

El valor de módulo resiliente inicial de la capa subrasante fue estimado utilizando el valor de CBR característico de la zona en estudio, el cual es de 2%, basado en estudios previos del suelo estudiado. Las ecuaciones utilizadas para predecir el módulo resiliente en función del CBR se muestran a continuación (National Cooperative Highway Research Program, 2004).

$$M_R = 2555 \cdot CBR^{0,64} / 145,04 \quad \text{Ecuación 10}$$

$$M_R = 1500 \cdot CBR / 145,04 \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

M_R : Módulo resiliente, MPa.

CBR: California Bearing Ratio.

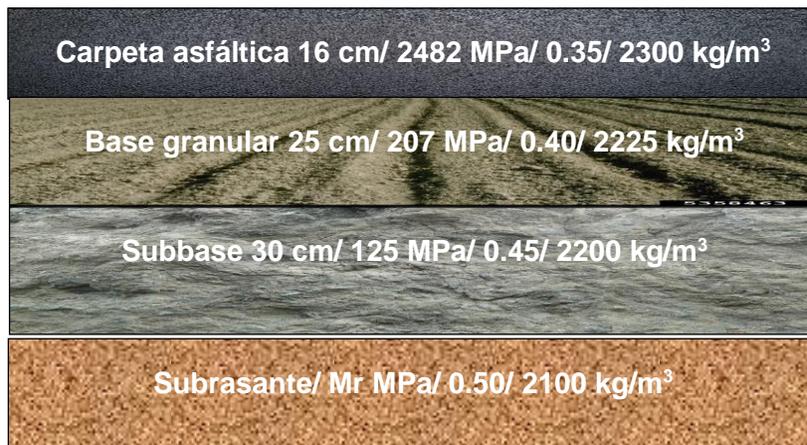


Figura 7-1. Estructura inicial para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante

8 RELACIÓN ENTRE MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DE MÓDULOS RESILIENTES

La estimación del módulo resiliente se realiza por medio de modelos de predicción en función de los factores climáticos y propiedades granulométricas del suelo. Es necesario determinar valores de saturación y succión en función del clima como se menciona en el capítulo 2. El objetivo de este modelo es el cálculo del factor ambiental para ajustar el módulo resiliente de la subrasante por factores climáticos para cada mes (Cary & Zapata, 2010).

$$F_{env} = \frac{M_r}{M_{r,\acute{o}pt}} = 10^{a + \frac{b-a}{1 + e^{\beta + k_s(S - S_{\acute{o}pt})}}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

M_r = módulo resiliente en las condiciones deseadas, KPa.

$M_{r,\acute{o}pt}$ = módulo resiliente con la humedad y densidad óptimas de laboratorio, KPa.

S = grado de saturación a evaluar

$S_{\acute{o}pt}$ = grado de saturación con la humedad y densidad óptimas de laboratorio.

$$a = \min\left(\log\left(\frac{M_r}{M_{r,\acute{o}pt}}\right)\right)$$

$$b = \max\left(\log\left(\frac{M_r}{M_{r,\acute{o}pt}}\right)\right)$$

k_s = parámetro de regresión.

$$\beta = \ln\left(-\frac{b}{a}\right)$$

Para la obtención de los valores de los parámetros a, b y k_s , debido a que no se tienen datos de ensayos realizados en Colombia, se utilizan los valores obtenidos en la investigación de Claudia Zapata, los cuales se enuncian en el Cuadro 8-1.

Cuadro 8-1. Valores de los parámetros de regresión para el modelo de ajuste del Módulo Resiliente por clima

Parámetro	Materiales granulares finos	Materiales granulares gruesos
a	-0,3123	-0,5934
b	0,3	0,4
k _s	6,8157	6,1324

Fuente: (Zapata, 2012)

Esta metodología calcula un factor ambiental con el cual es posible estimar el módulo resiliente para los meses de interés utilizando el valor de módulo resiliente con un contenido de humedad óptima. Esta metodología permite tener mayor precisión durante el diseño de pavimentos al considerar la capacidad de soporte del suelo durante diferentes estados de saturación del suelo a lo largo del año. Es necesario tener en cuenta que este modelo fue realizado en condiciones climáticas distintas, por lo que este estudio se enfoca en evaluar su validez para materiales en la zona norte de Bogotá.

Esta metodología se lleva a cabo de acuerdo con el proceso mostrado en el diagrama de la Figura 8-1. Utilizando los datos climáticos de la región, en este caso la precipitación y la temperatura, se calcula el índice de Thornthwaite, el cual es un índice principalmente utilizado en agricultura que representa la humedad de una región. Este índice puede ser estimado de manera más exacta utilizando diferentes ecuaciones que consideran el brillo solar, la velocidad del viento y la humedad de la zona.

Una vez se cuenta con este índice se utilizan las ecuaciones que relacionan el índice de Thornthwaite con la succión matricial del suelo. Utilizando la curva SWCC estimada con los modelos basados en las propiedades del suelo, se estima el grado saturación como función de la succión matricial.

La saturación del suelo es utilizada para reducir o incrementar el módulo resiliente del suelo a partir del módulo resiliente en las condiciones de humedad óptima.

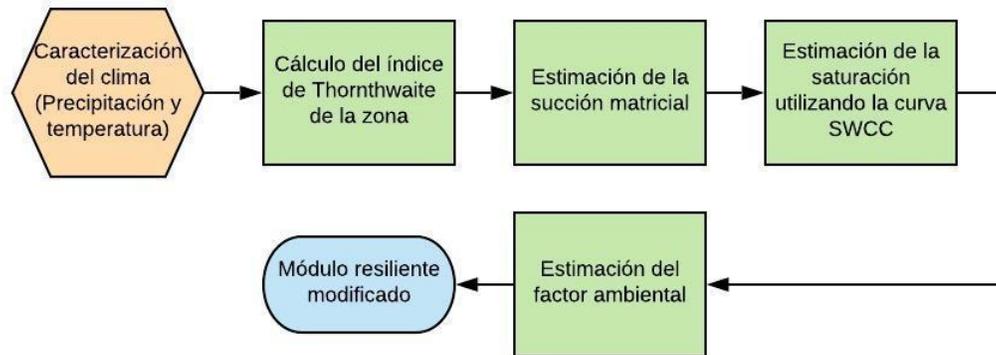


Figura 8-1. Diagrama de cálculo del módulo resiliente modificado de acuerdo a las condiciones climáticas

El estudio se basa en comparar los módulos resilientes obtenidos para cada mes de acuerdo con el ensayo de módulo resiliente y utilizando el modelo universal de Witczak, con los valores obtenidos para cada mes utilizando los modelos de variación del módulo resiliente según las condiciones climáticas de cada mes con tal de verificar que los modelos son aplicables para las arcillas blandas de Bogotá.

8.1 DATOS PARA EL CÁLCULO DEL MÓDULO DE DISEÑO POR AFECTACIÓN CLIMÁTICA

Los datos climatológicos necesarios de entrada: Temperatura (T) y Precipitación (P), pueden ser obtenidos directamente de la información suministrada por la red de estaciones meteorológicas del IDEAM. Adicionalmente, se requiere el dato de localización de la estación (Latitud) el cual es obtenido al consultar la estación meteorológica.

Se entiende como estación meteorológica el sitio donde se hacen observaciones y mediciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológicos usando instrumentos apropiados, con el fin de establecer el comportamiento atmosférico en las diferentes zonas de un territorio (IDEAM, 2005). El tipo y localización de las estaciones meteorológicas del IDEAM son las siguientes:

- **Estación Pluviométrica (PM)**– Es una estación meteorológica dotada de un pluviómetro o recipiente que permite medir la cantidad de lluvia caída entre dos observaciones consecutivas (IDEAM, 2005).

- **Estación Pluviográfica (PG)** –Registra en forma mecánica y continua la precipitación, en una gráfica que permite conocer la cantidad, duración, intensidad y periodo en que ha ocurrido la lluvia. Actualmente se utilizan los pluviógrafos de registro diario (IDEAM, 2005).
- **Estación Climatológica Principal (CP)** –Es aquella en la cual se hacen observaciones de visibilidad, tiempo atmosférico presente, cantidad, tipo y altura de las nubes, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, humedad, viento, radiación, solar, brillo solar, evaporación y fenómenos especiales. Gran parte de estos parámetros se obtienen de instrumentos registradores. Por lo general se efectúan tres observaciones diarias (IDEAM, 2005).
- **Estación Climatológica Ordinaria (CO)** –Este tipo de estaciones poseen obligatoriamente un pluviómetro, pluviógrafo y psicrómetro. Es decir, miden lluvias y temperaturas extremas e instantáneas (IDEAM, 2005).
- **Estación Sinóptica Principal (SP)** –En este tipo de estación se efectúan observaciones de los principales elementos meteorológicos en horas convenidas internacionalmente. Los datos se toman horariamente y corresponden a nubosidad, dirección y velocidad de los vientos, presión atmosférica, temperatura del aire, tipo y altura de las nubes, visibilidad, fenómenos especiales, características de humedad, precipitación, temperaturas extremas, capas significativas de nubes, recorrido del viento y secuencia de los fenómenos atmosféricos. Esta información se codifica y se intercambia a través de los centros mundiales con el fin de alimentar los modelos globales y locales de pronóstico y para el servicio de la aviación (IDEAM, 2005).
- **Estación Sinóptica Suplementaria (SS)** –Al igual que en la estación anterior, las observaciones se realizan a horas convenidas internacionalmente y los datos corresponden comúnmente a visibilidad, fenómenos especiales, tiempo atmosférico, nubosidad, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, humedad del aire y viento (IDEAM, 2005).
- **Estación Agrometeorológica (AM)** –En esta estación se realizan observaciones meteorológicas y biológicas, incluyendo fenológicas y otras observaciones que ayuden a determinar las relaciones entre el tiempo y el clima, por una parte y la vida de las plantas y los animales, por la otra. Incluye el mismo programa de observaciones de la estación CP, más registros de temperatura a varias profundidades (hasta un metro) y en la capa cercana al suelo (0, 10 y 20 cm sobre el suelo) (IDEAM, 2005).

- **Estación de Radiosonda (RS)** –La estación de radiosonda tiene por finalidad la observación de temperaturas, presión, humedad y viento en las capas altas de la atmósfera (tropósfera y baja estratósfera), mediante el rastreo, por medios electrónicos o de radar, de la trayectoria de un globo meteorológico que asciende libremente (IDEAM, 2005).

- **Estación mareográfica (MM)** –Estaciones para observación del estado del mar. Mide nivel, temperatura y salinidad de las aguas marinas. Se incluyen en la categoría de estaciones meteorológicas especiales (IDEAM, 2005).

8.1.1 Datos para la subrasante

Para realizar los cálculos para obtener el módulo de resiliente de diseño, se debe contar con los resultados de los ensayos de laboratorio realizados según lo descrito en el Capítulo 6.

El Cuadro 8-2 presenta los ensayos de laboratorio para obtener las variables de entrada a utilizar en esta metodología.

Cuadro 8-2. Ensayos de laboratorio necesarios

Ensayos de laboratorio		
Ensayos de laboratorio	Referencia	Referencia
Límites de consistencia de Atterberg	LL, LP, IP	INV E-125 INV E-126
Granulometría	P200	INV E-213
Gravedad específica	G _s	INV E-128 INV E-223
Densidad máxima seca y humedad óptima	P _{d,max} , W _{opt}	INV E-141 ó INV E-142

IP: Índice de plasticidad [%]
P200: Porcentaje del material que pasa por la malla N°200, [%]
G_s: Gravedad específica, adimensional [-].
W_{opt}: Contenido de humedad óptimo, adimensional [-].
P_{d,max}: Masa unitaria máxima seca, [kg.m-3]

Nota: Los valores que se toman en el Cuadro 8-2 son los valores obtenidos para un tramo o unidad homogénea.

8.1.2 Cálculo del índice de Thornthwaite para la clasificación climática

En 1948, Thornthwaite propuso una clasificación climática cuya principal característica fue la utilización de la evapotranspiración potencial como parámetro fundamental para la delimitación de los distintos tipos de clima, la categorización se basa en los resultados del balance hídrico del suelo y utiliza la evapotranspiración potencial anual, la precipitación media anual, el exceso de agua anual y el déficit de agua anual.

La evapotranspiración potencial (ETP), se determina a partir de la temperatura media mensual, corregida según la duración del día; y el exceso o déficit se calcula a partir del balance de vapor de agua, considerando el índice de humedad (I_h), que junto con la ETP permite definir los tipos de clima, así Colombia está dividido según el IDEAM, 2015 en nueve regiones clasificadas por el Índice de Thornthwaite (ver cuadro 8-4).

El Índice de Thornthwaite es una combinación del índice de humedad y del Índice de aridez, calculados de acuerdo con las expresiones consignadas en la Cuadro 8-3.

El Cuadro 8-3 presenta las fórmulas para calcular el índice de Thornthwaite (TMI, 1948).

Cuadro 8-3. Formulas Índice de Thornthwaite

Nombre	Fórmula
Índice de humedad	$I_h = \frac{EXC}{ETP} \times 100$
índice de aridez	$I_a = \frac{DEF}{ETP} \times 100$
índice de Thornthwaite	$TMI = I_h - 0.6 \times I_a$

Dónde:

ETP: Evapotranspiración Potencial anual, en mm.

$$ETP = \sum_i^{12} ETP_i \quad \text{Ecuación 13}$$

EXC: Exceso de agua anual, en mm.

$$EXC = \sum_i^{12} EXC_i \quad \text{Ecuación 14}$$

DEF: Déficit de agua anual, en mm

$$EF = \sum_i^{12} DEF_i \quad \text{Ecuación 15}$$

El Cuadro 8-4 se presentan las categorías de clima por humedad con base en el Índice de Thornthwaite.

Cuadro 8-4. Clasificación climática de Thornthwaite

TMI	Símbolo	Tipo Climático
>100	A	Excesivamente húmedo
80 a 100	B4	Muy húmedo
60 a 80	B3	Húmedo
40 a 60	B2	Moderadamente húmedo
20 a 40	B1	Ligeramente húmedo
0 a 20	C2	Subhúmedo-húmedo
-20 a 0	C1	Subhúmedo-seco
-40 a -20	D	Semiárido
<-40	E	Árido

8.1.3 Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP)

Los cálculos de Thornthwaite se basan en determinar la evapotranspiración potencial en función de la latitud (representativa de las horas-sol por día) y la temperatura media. La relación entre la temperatura media mensual y la evapotranspiración potencial se calcula de la siguiente manera:

8.1.3.1 Cálculo de “Índice de calor mensual” (i)

Se obtiene a partir de la temperatura media mensual (t):

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \quad \text{Ecuación 16}$$

Dónde:

i=Índice de calor mensual, [-] .

t= Temperatura media mensual, °C.

8.1.4.2 Cálculo de “Índice de calor anual”

Es la suma de los 12 valores que se calcularon de (i):

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

Ecuación 17

Dónde:

I=Índice de calor anual, [-]

i_j = Índice de calor del mes j

8.1.3.3 Cálculo de la ETP mensual “sin corregir”

$$ETP_{\text{sin corregir}} = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a$$

Ecuación 18

Dónde:

$ETP_{\text{sin corregir}}$: ETP mensual para meses de 30 días y 12 horas de sol, [mm/mes].

t: Temperatura media mensual, [°C]

I: Índice de calor anual, [-].

$$a = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0,49239$$

Ecuación 19

8.1.3.4 Cálculo de la ETP mensual corregido para el número de días del mes y el número de horas de sol

Para el cálculo de la ETP de un mes determinado se debe corregir la $ETP_{\text{sin corregir}}$ mediante un coeficiente que tenga en cuenta el número de días del mes y horas de sol de cada día, en función de la latitud. Para lo cual se introduce el índice de iluminación mensual en unidades de 12 horas, que deberá multiplicar a la $ETP_{\text{sin corregir}}$ para obtener la ETP mensual final según Thornthwaite.

$$ETP_{\text{corregida}} = ETP_{\text{sin corregir}} \cdot \frac{N}{12} \cdot \frac{d}{30}$$

Ecuación 20

Dónde:

N: Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud [horas].

d: Número de días del mes, [días].

8.1.3.5 Cálculo del Exceso (EXC) y del Déficit de humedad (DEF)

Para el cálculo del exceso y déficit, es necesario introducir los términos de “reserva” y “reserva máxima” del suelo, variables de las cuales depende la determinación de éstos. La reserva es la capacidad de almacenamiento (A) que tienen los suelos. Cuando en un mes se produzcan más entradas que salidas (Precipitación > ETP) el agua sobrante se almacenará en el suelo; por el contrario, cuando las salidas sean mayores que las entradas la reserva del suelo se reducirá.

La capacidad de almacenamiento del suelo no es ilimitada y cuando se alcanza su capacidad de retención, el agua añadida en “exceso” escurrirá superficialmente o en profundidad. Por tanto, es importante conocer el concepto de “reserva máxima (A_{\max})” o cantidad de agua por unidad de superficie [mm] que el suelo es capaz de almacenar en su perfil. Se toma el valor de cien milímetros (100 mm \approx 100 litros/m²) para reserva máxima como referencia climática.

El Índice de Thornthwite es útil para comparaciones climáticas entre distintas zonas (independientemente del tipo de suelo y vegetación). El cálculo de la reserva o almacenamiento del suelo se realiza teniendo en cuenta las siguientes expresiones:

$A_i = A_{i-1} + (P_i - ETP_i)$	si $0 < A_{i-1} + (P_i - ETP_i) < A_{\max}$
$A_i = A_{\max}$	si $A_{i-1} + (P_i - ETP_i) \geq A_{\max}$
$A_i = 0$	si $A_{i-1} + (P_i - ETP_i) \leq 0$

Ecuación 21

Dónde:

i: Mes para el cual se está efectuando el cálculo

A_i : Almacenamiento o reserva del mes, [mm]

A_{i-1} : Almacenamiento o reserva del mes anterior, [mm]

P_i : Precipitación del mes, (se obtiene de las estaciones meteorológicas), [mm/mes]

ETP_i : Evapotranspiración potencial mensual del mes, ya calculada, [mm/mes]

A_{\max} : Reserva máxima del suelo (100 mm \approx 100 litros/m²)

Utilizando el resultado de la formulación anterior, se calcula el exceso (EXC_i) y déficit (DFE_i) en mm, de la siguiente manera:

$EXC_i = A_{i-1} + P_i - ETP_i - A_{max}$	si $A_{i-1} + P_i - ETP_i > A_{max}$
$EXC_i = 0$	si $A_{i-1} + P_i - ETP_i \leq A_{max}$

Ecuación 22

$DEF_i = A_{i-1} + P_i - ETP_i$	si $A_{i-1} + P_i - ETP_i \leq 0$
$DEF_i = 0$	si $A_{i-1} + P_i - ETP_i > 0$

Ecuación 23

Será necesario hacer un cálculo cíclico en el año base para determinar los valores de almacenamiento (A_i), exceso (EXC_i) y déficit (DEF_i) de cada mes, hasta que los cálculos permanezcan constantes. Se podrá iniciar con A_{i-1}=0 en el primer ciclo del primer mes. El año base es el resultado del promedio de todos los años que se hayan utilizado como datos de entrada.

Estos registros deberán ser mínimo de los últimos cinco años, aunque es recomendable utilizar datos de al menos 10 años de la estación meteorológica de influencia al tramo de diseño homogéneo. En el caso que a criterio y responsabilidad del diseñador se cuantifique la variable clima con los dos últimos años de información, esta también será aceptada.

8.2 INCIDENCIA DE LA VARIABLE CLIMA EN EL CÁLCULO DEL MÓDULO RESILIENTE DE DISEÑO, DEL SUELO DE LA SUBRASANTE

Para observar la incidencia del clima sobre el módulo resiliente de diseño se debe determinar primero la clasificación de los suelos de subrasante que intervienen en el proyecto con el fin de determinar su plasticidad, de esta forma se puede clasificar el suelo como plástico o no plástico. A continuación, se aplican los modelos matemáticos para diferentes clasificaciones del suelo de subrasante de acuerdo con los datos escogidos de entrada según los numerales 8.1 y 8.1.1.

8.2.1 Suelos de subrasante considerados como plásticos ($P_{200} \geq 10\%$ ó $wPI \geq 2.0$)

8.2.1.1 Cálculo de succión a partir del Índice de Thornthwaite

La succión matricial se define como la diferencia entre presión de aire de los poros y presión de agua. El valor de esta succión matricial de poros depende de la tensión superficial y el radio de curvatura del menisco. Debido a que los poros son pequeños en suelos más finos lo cual afecta el radio de curvatura del menisco, se desarrollan succiones matriciales más altas en suelos arcillosos que en los suelos granulares.

La succión matricial se puede medir por diferentes métodos de los cuales pueden ser directos o indirectos, uno de los métodos directos conocido en nuestro medio es a través del ensayo de laboratorio de papel filtro (INV E-159). Un método indirecto usado es por medio de las curvas típicas que correlacionan las características del suelo de subrasante y el Índice de Thornthwaite (TMI) con la succión matricial (h).

Para este caso donde se utiliza suelo de subrasante se debe utilizar el modelo “TMI – P_{200}/wPI ” (Witczak, Zapata, & Houston, 2006), este modelo está descrito por la siguiente ecuación:

$$h = \alpha \left[e^{\left[\frac{\beta}{TMI + \gamma} \right]} + \delta \right] \quad \text{Ecuación 24}$$

Dónde:

h: Succión matricial [KPa].

α : Constante de regresión en función del P_{200} y wPI , Cuadro 8-5, [-].

β : Constante de regresión, Cuadro 8-5, [-].

γ : Constante de regresión, Cuadro 8-5, [-].

δ : Constante de regresión, Cuadro 8-5, [-].

TMI: Índice de Thornthwaite, [-].

wPI : Índice de plasticidad ponderado, [-]. (Se define para mayor claridad este parámetro en la Ecuación 25).

$$wPI = \frac{P_{200}}{100} IP$$

Ecuación 25

En el Cuadro 8-5 se presentan los valores que se recomiendan utilizar para las variables del modelo.

Cuadro 8-5. Valores para el modelo "TMI-P200/wPI"

P200 o wPI	α	β	γ	δ
P200=10 (wPI=0)	0.300	419.07	133.45	15.00
P200=50 (wPI=0)	0.300	521.50	137.30	16.00
wPI=0.5 ó menos	0.300	521.50	137.30	16.00
wPI=5	0.300	663.50	142.50	17.50
wPI=10	0.300	801.00	147.60	25.00
wPI=20	0.300	975.00	152.50	32.00
wPI=50	0.300	1171.50	157.50	27.80

Para usar el modelo "TMI-P₂₀₀/wPI" es necesario considerar que:

- a) Si el valor wPI es inferior a 0.5, se asume por defecto el valor de wPI=0.5.
- b) Si wPI = 0, compruebe P₂₀₀.
- c) Si P₂₀₀ para la subrasante es mayor o igual al 50%, es posible usar por defecto la curva P₂₀₀= 50.
- d) Si P₂₀₀ es menos de 10%, la succión debe ser calculada usando el modelo para subrasantes consideradas no plásticas.

La gráfica de las curvas obtenidas del modelo "TMI-P200/wPI", a partir de diversos valores para los parámetros de la Ecuación 24 se muestran en las Figura 2-3 y Figura 2-4.

8.2.1.2 Cálculo de la saturación

Para realizar el cálculo de la saturación se debe primero obtener los parámetros en condición compactada de la subrasante los cuales se obtienen a partir de los resultados de laboratorio Proctor estándar o modificado, mencionados en el numeral 8.1.

Con estos dos parámetros (w_{opt} , $P_{d, max}$) y la densidad del agua (P_w) es posible calcular las siguientes ecuaciones:

$$\theta_{opt} = \frac{\omega_{opt} \times \rho_{d,max}}{\rho_w} \quad \text{Ecuación 26}$$

Dónde:

θ_{opt} : Contenido de humedad optimo volumétrico, adimensional [-].

ρ_w : Densidad del agua [1000 kg /m3].

ω_{opt} : Contenido de humedad optimo, adimensional [-].

$\rho_{d,max}$: Masa unitaria máxima seca, [kg/m3].

$$S_{opt} = \frac{\theta_{opt}}{1 - \frac{\rho_{d,max}}{\rho_w \times G_s}} \quad \text{Ecuación 27}$$

Dónde:

S_{opt} : Saturación optima, adimensional [-]

G_s : Gravedad específica, adimensional [-]

$$\theta_{sat} = \frac{\theta_{opt}}{S_{opt}} \quad \text{Ecuación 28}$$

Dónde:

θ_{sat} : Contenido de humedad volumétrico en condiciones saturadas, adimensional [-].

Después de calcular los parámetros de materiales compactos y de obtener la succión matricial para el suelo de subrasante para cada mes, se procede a obtener el grado de saturación por medio de la curva característica del suelo (SWCC, Soil Water Característica Curve).

Una de las opciones para formalizar matemáticamente la SWCC de las capas no ligadas del pavimento obedece a las siguientes ecuaciones propuestas por Fredlund y Xing en 1994, en términos del contenido volumétrico de agua, las cuales serán usadas para calcular el grado de saturación del suelo de subrasante para cada mes.

$$\theta_w = C(h) \times \left[\frac{\theta_{sat}}{\left[\ln \left[\exp(1) + \left(\frac{h}{a_f} \right)^{b_f} \right] \right]^{c_f}} \right] \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

h : Succión matricial [kPa].

θ_w : Contenido de humedad volumétrico [%].

$C(h)$: Función de corrección.

θ_{sat} : Contenido de humedad volumétrico en condiciones saturadas [%].

a_f : Parámetro de ajuste de la SWCC, el cual es principalmente una función del valor de entrada de aire en el suelo [kPa].

b_f : Parámetro de ajuste de la SWCC, el cual es principalmente una función de la velocidad de extracción de agua desde el suelo una vez el valor de entrada de aire ha sido excedido, adimensional [-].

c_f : Parámetro de ajuste de la SWCC, el cual es principalmente una función del contenido de agua residual, adimensional [-].

h_r : Parámetro de ajuste de la SWCC, el cual es la succión correspondiente al contenido de agua residual [kPa].

La función de corrección $C(h)$ obliga que la curva pase por una succión de 10^6 kPa, cuando el contenido de agua es nulo. Este comportamiento es común a todos los suelos (Fredlund, 1964). La función de corrección está definida por la siguiente ecuación:

$$C(h) = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \quad \text{Ecuación 30}$$

Con todos los parámetros definidos anteriormente se calcula el grado de saturación (S) para cada mes, utilizando la relación presentada a continuación:

$$S = \frac{\theta_w}{\theta_{sat}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Dónde:

S : Grado de saturación, adimensional [-].

θ_w : Contenido de humedad volumétrico [%]

θ_{sat} : Contenido de humedad volumétrico en condiciones saturadas [%]

A nivel de referencia se presenta un ejemplo de curva característica SWCC en la Figura 2-7 la cual es la relación entre succión matricial y grado de saturación para suelos de arcilla, limo y arena

Cabe destacar que por definición:

$$\theta_w = \frac{V_w}{V_T} * 100$$

Ecuación 32

Dónde:

V_w : volumen de agua en los vacíos.

V_T : volumen total de la muestra.

Los laboratorios geotécnicos de Colombia aún carecen de la experiencia para llevar a cabo los procedimientos necesarios para calcular los parámetros de la curva SWCC, razón por la cual se utilizan correlaciones recomendadas en diversas investigaciones a nivel mundial.

Dichas correlaciones utilizan propiedades del suelo que condicionan las respuestas del suelo ante los cambios de humedad. Algunos de estos parámetros necesarios para la adecuada caracterización de los suelos son: porcentaje pasando la malla No. 200 (p200), límite líquido (LL), límite plástico (LP), diámetro de agregado correspondiente al 10%, 20%, 30%, 60% y 90% pasando por peso en mm (D_{10} , D_{20} , D_{30} , D_{60} , y D_{90} , respectivamente).

La curva característica suelo-agua (SWCC), puede ser caracterizada tal como se propone en la investigación de Fredlund y Xing, tal como se muestra en la Ecuación 29.

Se proponen diferentes formas de calcular los parámetros de ajuste de la curva SWCC. Se muestran las propuestas dadas en la guía MEPDG (National Cooperative Highway Research Program, 2004), en la actualización con el proyecto NCHRP 9-23 (National Cooperative Highway Research Program, 2006) y los parámetros recomendados por la investigación realizada en Arizona por Torres y Zapata (Torres, 2011).

El cálculo de los parámetros de ajuste de acuerdo con la guía MEPDG para el nivel 1, el cual equivale al nivel más avanzado de ingreso de las variables necesarios para la caracterización del suelo, es necesario realizar un ensayo de plato, de papel filtro, y/o el

ensayo de placa termosensible con el propósito de obtener los parámetros a_f , b_f , c_f y d_f de la curva SWCC.

Los procedimientos necesarios para llevar a cabo dichos ensayos son: AASHTO T180, AASHTO T99 (Ensayo Proctor modificado) para obtener la densidad seca máxima ($\gamma_{d,max}$) y la humedad óptima (ω_{opt}), y el ensayo AASHTO T100 para obtener la gravedad específica del suelo (G_s). Con estos ensayos se determina la succión h y el contenido volumétrico de agua. Posteriormente, se calculan θ_{opt} , S_{opt} y θ_{sat} . Luego con un análisis de regresión lineal se calculan los parámetros del modelo SWCC.

Debido a la falta de experiencia de los laboratorios de Bogotá para realizar los ensayos AASHTO T180, para la ingeniería de Colombia es más viable utilizar las correlaciones especificadas para el nivel 2 de entrada de datos.

Los ensayos necesarios para obtener los parámetros de la curva SWCC son el AASHTO T99 (Proctor modificado), AASHTO T100 para obtener G_s , AASHTO T27 para obtener p_{200} y D_{60} y AASHTO T90 para obtener el índice de plasticidad (IP).

Las correlaciones propuestas se enuncian en las siguientes ecuaciones:

Si $wPI > 0$, entonces:

$$a_f = \frac{0,00364(wPI)^{3,35} + 4(wPI) + 11}{6,895} \quad \text{Ecuación 33}$$

$$\frac{b_f}{c_f} = -2,313(wPI)^{0,14} + 5 \quad \text{Ecuación 34}$$

$$c_f = 0,0514(wPI)^{0,465} + 0,5 \quad \text{Ecuación 35}$$

$$\frac{h_r}{a_f} = 32,44e^{0,0186wPI} \quad \text{Ecuación 36}$$

Si $wPI = 0$ entonces:

$$a_f = \frac{0,8627(D_{60})^{-0,751}}{6,895} \quad \text{Ecuación 37}$$

$$b_f = 7,5 \quad \text{Ecuación 38}$$

$$c_f = 0,1722 \ln D_{60} + 0,7734 \quad \text{Ecuación 39}$$

$$\frac{h_r}{a_f} = \frac{1}{D_{60} + 9,7e^{-4}} \quad \text{Ecuación 40}$$

Las correlaciones propuestas fueron optimizadas posteriormente con el proyecto NCHRP 9-23 con tal de mejorar la guía MEPDG y el diseño de pavimentos.

Además, se proponen correlaciones para simplificar la cantidad de ensayos necesarios, tales como las enunciadas a continuación para calcular la gravedad específica del suelo y la saturación óptima. Para este estudio la gravedad específica del suelo fue ensayado, sin embargo, se enuncian las correlaciones.

$$G_s = 0,041(wPI)^{0,29} + 2,65 \quad \text{Ecuación 41}$$

$$S_{opt} = 6,752(wPI)^{0,147} + 78 \quad \text{Ecuación 42}$$

También se propone una correlación para calcular la humedad óptima (w_{opt}) sin tener que llevar a cabo el ensayo AASHTO T99. Dicha correlación se muestra en la siguiente ecuación. La humedad óptima fue obtenida por medio del ensayo de Proctor, sin embargo, se muestran las correlaciones como referencia.

$$\text{Si } wPI > 0 \text{ entonces } w_{opt} = 1,3wPI^{0,73} + 11 \quad \text{Ecuación 43}$$

$$\text{Si } wPI = 0 \text{ entonces } w_{opt} = 8,6425(D_{60})^{-0,1038} \quad \text{Ecuación 44}$$

Las nuevas correlaciones para calcular los parámetros de la curva SWCC se muestran a continuación en el caso en que $wPI = 0$.

Cálculo de a_f :

$$a_f = 1,14a - 0,5 \quad \text{Ecuación 45}$$

$$a = -2,79 - 14,1 \log D_{20} - 1,9 \times 10^{-6} p 200^{4,34} + 7 \log D_{30} + 0,055 D_{100} \quad \text{Ecuación 46}$$

Donde:

$$D_{100} = 10^{\left(\frac{40}{m_1} + \log D_{60}\right)} \quad \text{Ecuación 47}$$

$$m_1 = \frac{30}{\log D_{90} - \log D_{60}} \quad \text{Ecuación 48}$$

En el caso en que $a_f < 1$, entonces $a_f = 2,25p200^{0,5} + 5$.

Cálculo de b_f :

$$b_f = -0,936b - 3,8 \quad \text{Ecuación 49}$$

$$b = m_1^{0,1} \left\{ 5,39 - 0,29 \ln \left[p200 \left(\frac{D_{90}}{D_{10}} \right) \right] + 3D_0^{0,57} + 0,021p200^{1,19} \right\} \quad \text{Ecuación 50}$$

Donde:

$$D_0 = 10^{\left(\frac{-30}{m_2} + \log D_{30} \right)} \quad \text{Ecuación 51}$$

$$m_2 = \frac{20}{\log D_{30} - D_{10}} \quad \text{Ecuación 52}$$

Debe cumplirse que $0,3 < b_f < 4$.

Cálculo de c_f :

$$c_f = 0,26e^{0,58c} + 1,4D_{10} \quad \text{Ecuación 53}$$

$$c = \log(m_2^{1,15}) - \left(1 - \frac{1}{b_f} \right) \quad \text{Ecuación 54}$$

Por último, $h_r = 100$.

El cálculo de los parámetros de ajuste de la SWCC en el caso en que $wPI > 0$, se presentan a continuación.

Cálculo de a_f :

$$a_f = 32,835 \ln(wPI) + 32,438 \quad \text{Ecuación 55}$$

Cálculo de b_f :

$$b_f = 1,421(wPI)^{-0,3185} \quad \text{Ecuación 56}$$

Cálculo de c_f :

$$c_f = 0,2154 \ln(wPI) + 0,7145 \quad \text{Ecuación 57}$$

Valor de h_r :

$$h_r = 500 \quad \text{Ecuación 58}$$

Restricciones:

Si $a_f < 5$, entonces:

$$a_f = 5 \quad \text{Ecuación 59}$$

Si $c_f < 0.01$, entonces:

$$c_f = 0,03 \quad \text{Ecuación 60}$$

Con el propósito de mejorar el cálculo de la curva SWCC, Torres desarrolló una investigación con la cual obtuvo parámetros de ajuste correlacionados con nuevas variables, con lo cual la estimación se hace más precisa.

Para un material con $wPI > 0$, las relaciones obtenidas con la investigación son las siguientes:

Parámetro a_f , kPa $a_f = 10^{0.69 - \frac{2.7}{1 + e^{4 - 0.14GI}}}$

Parámetro b_f $b_f = 10^{\left(\frac{0.78}{1 + e^{6.75 - 0.19GI}}\right)}$

Parámetro c_f $c_f = 0.03 + 0.62e^{(-0.82(\log a_f - 0.57)^2)}$

Parámetro h_r $h_r = 494 + \frac{660}{1 + e^{(4 - 0.19GI)}}$

GI = Grupo índice

En el caso de tener un material primordialmente granular con un índice de plasticidad (PI) igual a cero, se modifican los parámetros a_f , b_f , c_f y h_r .

Parámetro a_f , kPa $a_f = -967.21 D_{10}^2 + 218.37 D_{10} - 2.7$, sí $D_{10} < 0.020$, $a_f = 1.28$

Parámetro b_f $b_f = 10^{(-0.0075a_f^3 + 0.1133a_f^2 - 0.3577a_f + 0.3061)}$

Parámetro c_f $c_f = 0.0058a_f^3 - 0.0933a_f^2 + 0.4069a_f + 0.3481$

Parámetro h_r $h_r = 100$

Existen diversas investigaciones que calculan los factores para los suelos de diferentes regiones del mundo para poder ser utilizados en el software de diseño de pavimentos AASHTOWare Pavement ME basado en la guía MEPDG de los Estados Unidos.

La Universidad de Nevada, Reno en los Estados Unidos, realizó ensayos en tres tipos de bases a lo largo del estado de Nevada. El ensayo realizado para obtener los valores de la curva SWCC según el modelo de Fredlund y Xing consistió en saturar las muestras utilizando equipo igual al utilizado para obtener la gravedad máxima de una mezcla asfáltica. Luego de que la muestra es saturada se coloca en un tensiómetro, el cual se conecta a un sensor balanza con tal de medir la succión matricial y cambio de peso como función de la evaporación del agua de la muestra. El ensayo finaliza cuando la succión matricial alcanza su máximo y luego cae a un valor cercano a 0. Los resultados obtenidos en los ensayos se resumen en el Cuadro 8-6 (Hajj, Stolte, Thavathurairaja, Sebaaly, & Piratheepan, 2018).

Cuadro 8-6. Parámetros Curva SWCC Ensayos realizados en el estado de Nevada, Estados Unidos

Parámetro SWCC	Distrito 1	Distrito 2 (Lockwood, NV)	Distrito 3 (Elko, NV)
a_f	1,650	0,374	39,468
b_f	0,996	1,337	0,649
c_f	2,968	0,478	12,717
h_r	6,665	2,599	1 500

8.2.2 Cálculo del Factor Ambiental mensual de la subrasante

El factor ambiental realiza un ajuste al módulo resiliente debido a los cambios climáticos que sufre el suelo de subrasante, este modelo fue desarrollado por la NCHRP (ARA Inc., 2004).

El factor ambiental (F_{amb}) se determina después de obtener el grado de saturación para cada mes, relacionándolo así con otros parámetros tal como se muestra en la función sigmoïdal mostrada en la Ecuación 61.

$$\log \frac{M_R}{M_{R_{opt}}} = a + \frac{b - a}{1 + e^{\left(\ln \frac{-b}{a} + km(S - S_{opt})\right)}} \quad \text{Ecuación 61}$$

Dónde:

M_R : Módulo Resiliente en el periodo de diseño

$M_{R_{opt}}$: Módulo Resiliente en condiciones óptimas.

a: Mínimo de la relación, adimensional [-]

b: Máximo de la relación, adimensional [-]

K_m : Parámetro de regresión, adimensional [-]

S: Saturación para cada mes, adimensional [-]

S_{opt} : Saturación en condiciones óptimas, adimensional [-], ver Ecuación 27, numeral 8.2.1.2

Para una mayor comprensión se presenta el factor ambiental (F_{amb}) que finalmente se evalúa de una forma más explícita según la Ecuación 62

$$F_{amb} = \frac{M_R}{M_{R_{opt}}} = 10^{\left[a + \frac{b - a}{1 + e^{\left(\ln \frac{-b}{a} + km(S - S_{opt})\right)}} \right]} \quad \text{Ecuación 62}$$

Este factor (F_{amb}) que es de carácter mensual, es el que finalmente afectara al módulo resiliente al estado de humedad óptimo de cada mes.

Según el modelo desarrollado por la NCHRP los valores de a, b y k_m fueron seleccionados teniendo en cuenta la base de datos a disposición cuando se desarrolló el modelo (ARA Inc., 2004). Luego, estos valores fueron asumidos de forma conservadora y corresponden

a proporciones máximas de módulo de 2 y 2,5 para materiales de grano grueso y materiales de grano fino, respectivamente. Sólo una relación fue desarrollada para todos los materiales de grano fino. Cabe destacar que estos modelos no aplican completamente a los suelos estudiados, pues se trabaja con suelos arcillosos, sin embargo, con el propósito de poder comparar los nuevos modelos de Cary y Zapata, se muestra el cálculo utilizando estos valores como referencia.

Existen otros modelos para el cálculo de los parámetros del modelo de factor ambiental propuestos por Cary y Zapata (Cary & Zapata, 2010). Las ecuaciones utilizadas consideran el nivel de humedad en el suelo utilizando el wPI del suelo. El coeficiente de determinación ajustado R^2_{ajus} del modelo es de 0,581 y se obtuvo un S_e/S_y de 0,650. A pesar de que el valor de R^2_{ajus} es aceptable para una predicción global, el modelo utilizó un factor de corrección $m=1,002$ para correlacionar los valores predichos de $\log F_u$.

Cuadro 8-7. Valores de a, b y k_m para el cálculo del factor ambiental según Cary y Zapata

Parámetro	Fórmula
a	$(-0,6 - 1,87194 \cdot e^{-wPI})^{-1}$
b	$0,8 + 0,08 \cdot wPI^{0,5}$
k_m	$(11,96518 - 10,19111 \cdot e^{-wPI})^{0,5}$

Cary y Zapata también proponen un factor que ayuda a considerar el nivel de compactación. Este factor está dado por la siguiente ecuación.

$$F = 10^{0,03223(PC-100)} \quad \text{Ecuación 63}$$

Donde:

PC: porcentaje de compactación definido como el porcentaje de densidad estándar seca.

Este factor de ajuste por compactación no será utilizado en la investigación debido a que este dato no se conoce en los ensayos realizados. Se calcula la saturación óptima utilizando la Ecuación 27.

El gráfico de la Figura 8-2 muestra los diferentes modelos disponibles para estimar la afectación climática en los suelos y materiales granulares. Los modelos de Cary y Zapata consideran el wPI para estimar la afectación del material debido a la humedad.

Del gráfico se puede observar cómo los modelos consideran que los materiales granulares se ven afectados de menor manera por los cambios climáticos que los materiales con mayores plasticidades. Entre mayor sea el valor de wPI y por ende la plasticidad y cantidad de finos del material, se verá mayormente afectado su módulo al estar lejos de la humedad óptima, de esta manera, si el material tiene una humedad menor que la óptima, su módulo resiliente será mayor y si la humedad del material es mayor a la óptima, su módulo resiliente se verá disminuido.

Sin embargo, el modelo del MEPDG considera la asíntota horizontal del modelo sigmoideal utilizado para modelar la variación del factor ambiental como función de la diferencia de la saturación del material y su saturación óptima a un valor menor que el obtenido con los modelos que consideran el wPI, los cuales crecen de manera más acelerada, considerando una mayor afectación del material por las condiciones climáticas.

En el estudio se consideran ambos modelos con tal de concluir cuál se asemeja mejor a las condiciones presentes en los suelos arcillosos de Bogotá.

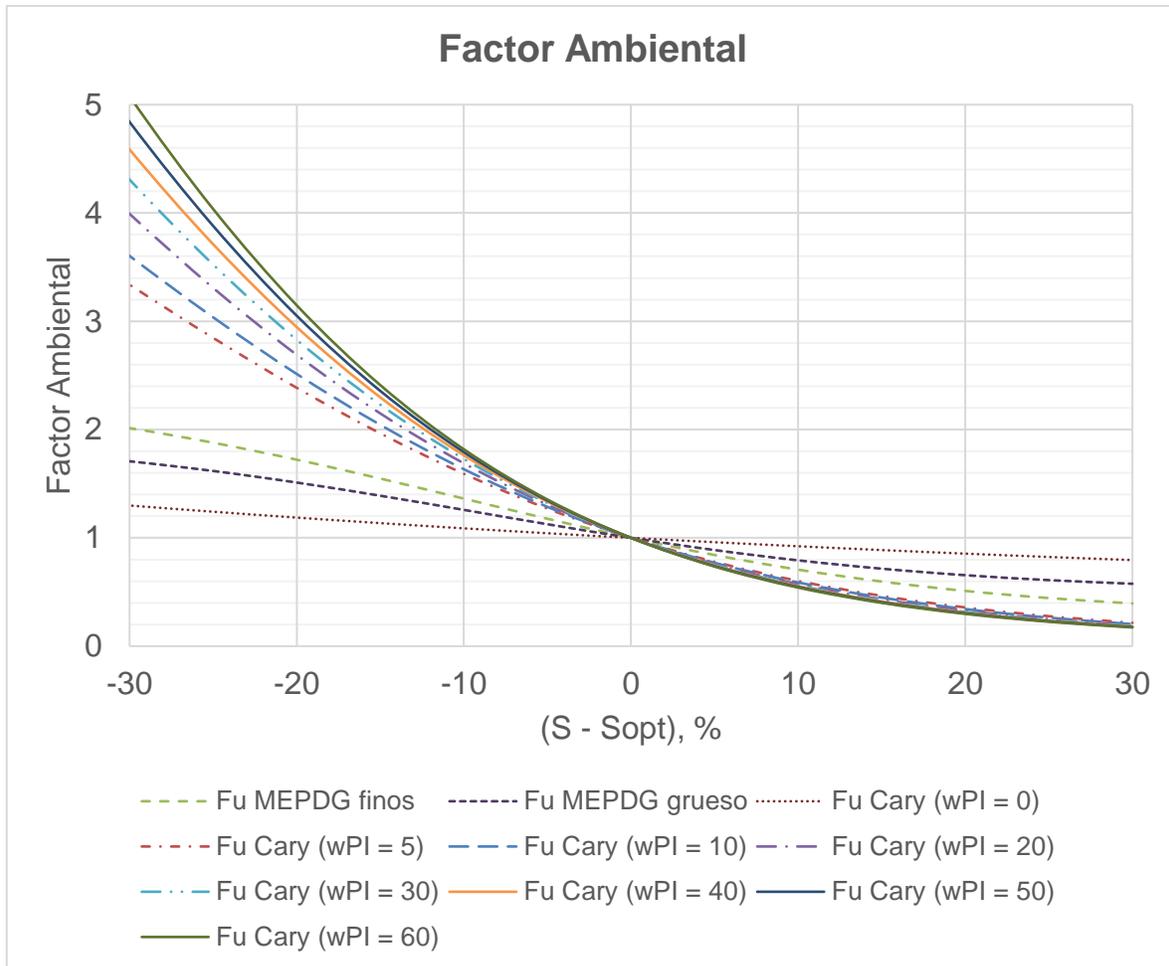


Figura 8-2. Factor ambiental para diferentes modelos

8.2.3 Cálculo del módulo resiliente de la subrasante

Durante el año se presentan variaciones en el contenido de humedad de la subrasante, las cuales producen alteraciones en la resistencia del suelo, para evaluar esta situación es necesario establecer los cambios que produce la humedad en el módulo resiliente, sin embargo, es importante mencionar que los materiales con mayor cantidad de partículas finas son los que se ven más afectados al experimentar una variación en su contenido de agua.

Para poder determinar el módulo resiliente de la subrasante afectado por los factores ambientales para cada mes, se debe multiplicar el factor ambiental que se calculó en el paso anterior para cada mes por el módulo resiliente óptimo, la ecuación se presenta a continuación:

$$M_R = F_{amb} \cdot M_{R_{opt}}$$

Ecuación 64

Dónde:

M_R : Módulo resiliente de la subrasante para un mes dado.

F_{amb} : Factor ambiental para el mes correspondiente.

$M_{R_{opt}}$: Módulo Resiliente en condiciones óptimas.

En la Figura 8-3 se presenta la variación del factor ambiental (F_{amb}) según el modelo MEPDG en función de la diferencia del grado de saturación con respecto a la saturación óptima del material de subrasante. En la gráfica se puede cuantificar la variación del factor ambiental (F_{amb}) en función de los cambios de saturación debido a las variaciones climáticas.

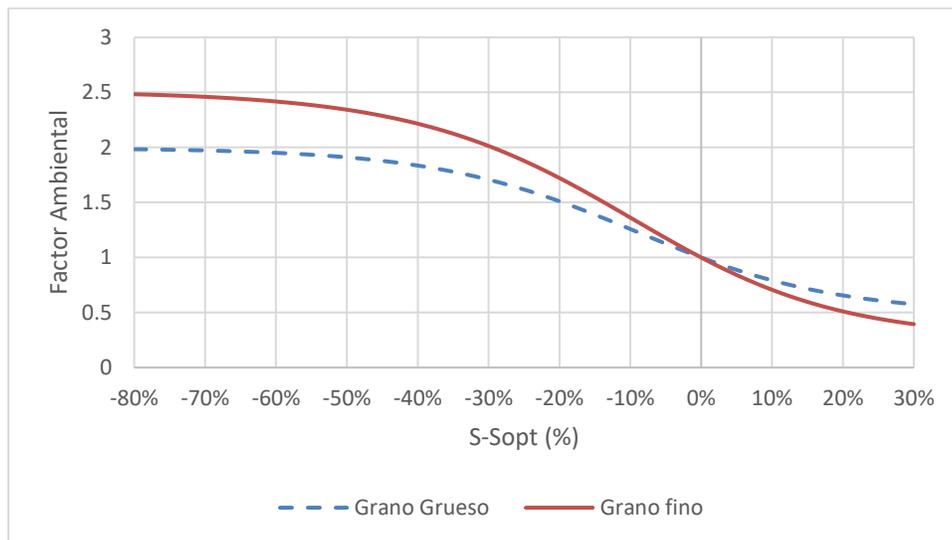


Figura 8-3. Variación del factor ambiental según los modelos básicos

8.2.4 Cálculo del daño relativo promedio y el Módulo Resiliente de Diseño

El daño relativo es un valor determinado para analizar el efecto que ocasiona el factor ambiental en la subrasante en términos de módulo resiliente, teniendo en cuenta que el módulo resiliente puede variar de acuerdo con los cambios climáticos que se tengan en la zona del proyecto.

La metodología por utilizar para realizar el cálculo es aplicada por la Guía para el diseño de pavimentos flexibles según la AASHTO 1993, el cual estima el módulo resiliente de diseño de la subrasante usando el criterio de serviciabilidad.

Tal como lo determina la metodología para el cálculo del daño relativo para cada mes (U_f) se aplica la siguiente ecuación:

$$U_f = 1.18 \cdot 10^8 M_R^{-2.32} \quad \text{Ecuación 65}$$

Donde:

M_R : Módulo resiliente de la subrasante para un mes dado o periodo considerado afectado por el factor ambiental de acuerdo con la Ecuación 64.

Después de obtener los valores de daños relativos para cada mes, se debe determinar el daño promedio relativo ponderado ($u_{f \text{ ponderado}}$), de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$U_{f \text{ ponderado}} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{fi}}{n} \quad \text{Ecuación 66}$$

Donde:

u_{fi} : Es el daño relativo mensual o para el periodo considerado, ver Ecuación 65.

n : Es el número de periodos analizados, en el caso de análisis mensual $n=12$.

Con el daño relativo ponderado ($u_{f \text{ ponderado}}$), se calcula el módulo resiliente de diseño ($M_{R \text{ Diseño}}$), de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$M_{R \text{ Diseño}} = 3015 * U_{f \text{ ponderado}}^{-0.431} \quad \text{Ecuación 67}$$

Este valor de módulo resiliente de diseño obtenido se empleará para realizar el diseño de la estructura del pavimento.

8.3 INCIDENCIA DE LA TEMPERATURA PARA EL CÁLCULO DEL MÓDULO DINÁMICO DE LA CARPETA ASFÁLTICA

Las variaciones diarias de temperatura no presentan una influencia significativa en los módulos resilientes de las capas no ligadas, pero estos cambios son muy importantes para las propiedades del asfalto, pues es un producto susceptible térmicamente y por lo tanto las mezclas asfálticas presentan un módulo dinámico diferente según el clima del lugar donde se construirá la obra.

El comportamiento de una mezcla es diferente para cada tipo de clima, a fin de considerar este efecto, el método a desarrollar propuesto por Shell Ltda. 1978, es un procedimiento para estimar una temperatura media anual ponderada del aire (TMAP) en la región del proyecto a partir de las temperaturas medias mensuales del aire (TMMA) y con ellos obtener unos factores de ponderación.

Para el desarrollo del método de ponderación, se debe tener como dato de entrada la temperatura promedio del aire para cada mes del año a evaluar, con estos valores se inicia la aplicación del método realizando los siguientes cálculos:

- a) Se obtiene los factores de ponderación (WF) mensuales a partir de la temperatura promedio del aire para cada mes del año.

$$WF = 0.0719 e^{0.1299 - TMMA} \quad \text{Ecuación 68}$$

- b) Después de obtener los factores de ponderación para cada mes estudiado, estos se promedian para ese periodo respectivo (mWF).

$$mWF = \frac{\sum_{i=1}^{12} WF}{12} \quad \text{Ecuación 69}$$

- c) Se calcula el valor de la temperatura media anual ponderada (TMAP) de acuerdo con la ecuación:

$$TMAP = \frac{1}{0.1299} \ln \left(\frac{mWF}{0.0719} \right) \quad \text{Ecuación 70}$$

La temperatura media anual ponderada (TMAP) es un dato con el cual se obtiene el módulo resiliente utilizando la curva maestra del material asfáltico.

8.3.1 Cálculo de la temperatura de la mezcla asfáltica para determinar el módulo dinámico

El módulo dinámico define las propiedades elásticas de la mezcla asfáltica, este valor se utiliza para el diseño de esta en la estructura del pavimento, así mismo se puede emplear para el diseño del espesor de la carpeta asfáltica.

Para el cálculo del módulo dinámico de la mezcla asfáltica, se tiene que calcular primero la temperatura de la mezcla asfáltica utilizando el modelo del Instituto Norteamericano del Asfalto (Huang, 2004), el cual tiene en cuenta la temperatura de la mezcla con respecto a la profundidad. Para aplicar este modelo se utiliza la temperatura media anual ponderada anteriormente. El modelo se da por la ecuación:

$$TAF = TMAP \left(1 + \frac{1}{z + 4} \right) - \frac{34}{z + 4} + 6 \quad \text{Ecuación 71}$$

Dónde:

TAF: Temperatura de la mezcla asfáltica a una profundidad dada, [°F].

TMAP: Temperatura media anual ponderada del aire, [°F].

z: Profundidad por debajo de la superficie de la mezcla asfáltica [pulgadas].

El módulo dinámico varía en función de la temperatura de acuerdo con las curvas maestras determinadas para el tipo de mezcla del diseño. De este modo la temperatura calculada, que será la temperatura de la mezcla asfáltica a una profundidad de un tercio del espesor de la capa medida desde la superficie (TMA13, [°C]) se empleará en el diseño para realizar la determinación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica.

9 APLICACIONAL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Como parte del presente trabajo, se realizó una aplicación de diseño de pavimentos, la cual pretende introducir las capacidades mecánicas de los materiales presentes en la estructura de pavimento y su desempeño durante la vida útil del pavimento.

9.1 METODOLOGÍA CONVENCIONAL

Siguiendo el método tradicional de diseño de pavimentos flexibles, empleado normalmente en el ejercicio de la ingeniería de pavimentos colombiana, la metodología convencional utilizada para el diseño de pavimentos se basa en la metodología AASHTO1993, método desarrollado durante los años 60 en el estado de Illinois en Estados Unidos. Este método fue desarrollado por medio de ensayos a escala real utilizando diferentes distribuciones de carga sobre diferentes combinaciones de estructuras de pavimentos. Los resultados fueron utilizados para desarrollar un modelo empírico de diseño para pavimentos flexibles y rígidos.

Actualmente en Colombia se utilizan estructuras previamente diseñadas por Invías para soportar las cargas demandadas teniendo en cuenta variables de tráfico, clasificación de la vía, periodo de diseño, región climática y calidad de la subrasante. Finalmente, se evalúa la estructura diseñada por medio del cálculo de esfuerzos y deformaciones y modelos de desempeño con el fin de predecir fallas de fatiga en la vida útil de la estructura. A continuación, se resume el método convencional de diseño de pavimentos.

La manera en que esta metodología considera el efecto de las condiciones climáticas es con el concepto de daño relativo, el cual es explicado en los siguientes párrafos.

9.1.1 Predimensionado de La Estructura De Pavimento

9.1.1.1 Localización de la Estructura de Pavimento.

La localización de la estructura de pavimentos determina las condiciones climáticas a las que los materiales estarán sujetos. La temperatura tiene un impacto directo en el desempeño de la mezcla asfáltica dado a sus propiedades visco elásticas. Igualmente, las condiciones de humedad tienen influencia en las propiedades de los materiales ligados y no ligados.

9.1.1.2 Tránsito para el diseño de la Estructura de Pavimento.

El tránsito determina las cargas a las que será sometida la estructura de pavimentos. El tránsito lo define la categoría de la vía, el periodo de diseño y la distribución de los vehículos.

Para llevar a cabo el cálculo de la totalidad de carga a la cual la estructura de pavimento será sometida es necesario convertir el número de vehículos a ejes equivalentes de 8.2 toneladas. Este proceso se realiza con el fin de obtener un número estándar para ser usado en el cálculo del número estructural de la estructura posteriormente.

El primer paso es definir el tráfico promedio diario de vehículos incluyendo vehículos livianos y pesados. Posteriormente es necesario conocer la distribución y cantidad de vehículos pesados durante el año de diseño, de esta manera es posible convertir los diferentes tipos de vehículos pesados a ejes equivalentes por medio del factor de ejes equivalentes de cada vehículo. Estos se pueden encontrar en la guía de diseño (AASHTO, 1993).

Se utiliza la distribución y el factor de ejes equivalentes de cada tipo de vehículo pesado es posible calcular el Factor Camión como una ponderación.

Se debe conocer el crecimiento del tráfico promedio anual para así poder proyectar el tráfico promedio diario al tiempo final del periodo de diseño. De esta manera se puede calcular el factor de crecimiento total (GxY) como:

$$G \times Y = \frac{(1 + r)^Y - 1}{r} \quad \text{Ecuación 72}$$

Donde:

r=tasa de crecimiento, %

Y=Periodo de diseño, años

Finalmente, es posible calcular el total de ejes equivalente en el periodo de diseño con la siguiente ecuación.

$$W_{18 \text{ kips}} = ADT \times T \times T_f \times G \times D \times L \times 365 \times Y \quad \text{Ecuación 73}$$

Donde:

ADT=Tráfico promedio diario.

T=Porcentaje de camiones/100

Tf=Factor camión.

G=Factor de crecimiento.

D=Distribución direccional (ver guía de diseño).

L=Tráfico en el carril de diseño (ver guía de diseño).

Y=Periodo de diseño.

9.1.1.3 Parámetros de Predimensionamiento.

Existen parámetros de predimensionamiento que se deben tener en cuenta debido a la condición final esperada del pavimento, confiabilidad del diseño y desviación estándar del modelo de diseño.

La condición del pavimento se calcula por medio del factor PSI (present serviceability index), por sus siglas en inglés, este índice de serviciabilidad representa la calidad del pavimento con un valor de 1 a 5. Es necesario seleccionar la condición inicial y final de este índice para tener en cuenta durante el diseño. Usualmente para pavimentos flexibles, el índice inicial tiene un valor de 4,2 para pavimentos nuevos y el índice final varía dependiendo de la categoría de la vía entre 2,0; 2,5 y 3,0.

La confiabilidad también depende de la categoría de la vía y si es rural o urbana. El Cuadro 9-1 resume los valores de confiabilidad contenido en la guía de diseño. La desviación estándar recomendada para pavimentos flexibles es de 0,49.

Cuadro 9-1. Nivel de confiabilidad para el diseño de pavimentos según la metodología AASHTO 93

Nivel de Confiabilidad Recomendado	Clasificación por Función	
	Urbana	Rural
Autopistas	85-99.9	80-99.9
Arteriales principales	80-99	75-95
Locales	50-80	50-80

9.1.1.4 Espesores Obtenidos.

La metodología de diseño empírica AASHTO93 se basa en el cálculo del número estructural (SN). Este valor cuantifica la capacidad estructural de cada capa de la estructura de pavimento y en general de toda la estructura. El número estructural se calcula por medio del coeficiente estructural de cada capa. Normalmente las agencias estatales cuentan con un coeficiente estructural para cada tipo de material usado generalmente por la industria. Sin embargo, la guía de diseño presenta diferentes modelos para calcular el coeficiente de capas ligadas y no ligadas conociendo el módulo, CBR o valor R del material.

Es posible calcular el número estructural necesario para soportar las solicitaciones a las que se verá sometida la estructura durante el periodo de diseño. La relación obtenida producto de los ensayos realizados en Illinois se muestra en la Ecuación 74. Esta relación empírica permite calcular el número estructural necesario para proteger una capa del pavimento en función de diferentes variables afectando el desempeño de la estructura, como lo son el tránsito y el módulo resiliente de las capas.

$$\log W_{t18} = Z_r S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_r - 8.07 \quad \text{Ecuación 74}$$

Donde:

W_{t18} : número de aplicaciones de carga equivalentes de 80 KN (18 kips) acumuladas en el período de diseño (n).

Z_r : Área bajo una curva de distribución normal estandarizada, función de la confiabilidad del diseño R, es decir el grado de confianza en que las cargas de diseño no serán superadas por las cargas reales aplicadas sobre el pavimento.

S_0 : Desviación estándar del sistema,

ΔPSI : Pérdida de Serviciabilidad o Condición de Servicio,

M_r : Módulo Resiliente de la capa a diseñar, y

SN : Número estructural o capacidad de la estructura para soportar las cargas bajo las condiciones de diseño.

La fórmula general que relaciona el número estructural (SN) con los espesores de cada capase muestra en la Ecuación 75.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3$$

Ecuación 75

Donde:

a_1 , a_2 y a_3 son los coeficientes estructurales o de capa de la superficie de rodadura, de la base y la subbase, respectivamente.

m_2 y m_3 son los coeficientes de drenaje para base y subbase.

D_1 , D_2 y D_3 son los espesores de capa en pulgadas para la carpeta asfáltica, base y subbase.

El coeficiente para la carpeta asfáltica, con una temperatura de 68°F, se puede calcular como se muestra en el gráfico de la Figura 9-1.

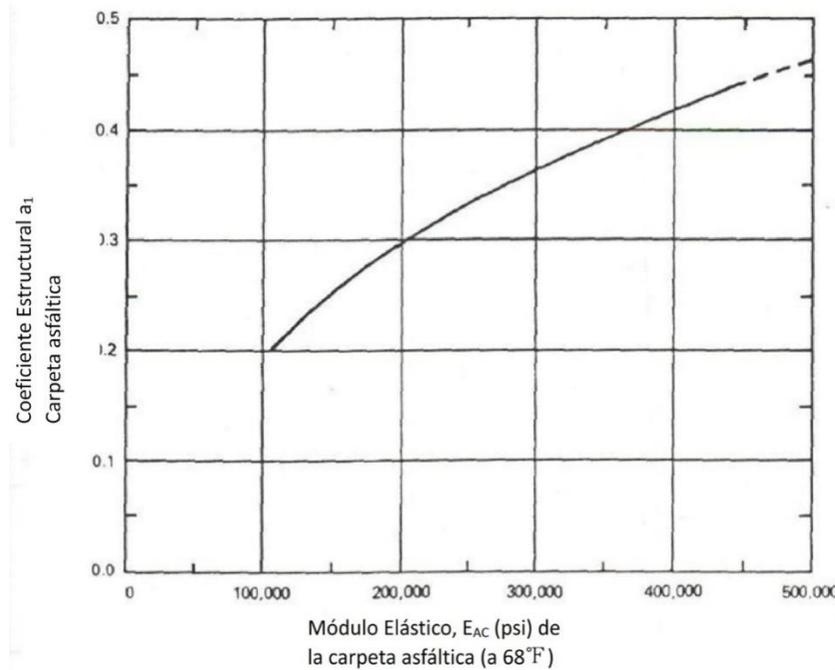


Figura 9-1. Determinación del coeficiente estructural de la carpeta asfáltica

Fuente: (Corredor, 2010)

Para el cálculo del coeficiente estructural de la base, debe utilizarse la fórmula en la Ecuación 76 (Corredor, 2010).

$$a_{BG} = 0.249 \log(E_{BG}) - 0.977$$

Ecuación 76

Para el cálculo del coeficiente estructural de la subbase, debe utilizarse la fórmula en la Ecuación 77 (Corredor, 2010).

$$a_{SB} = 0.227 \log(E_{SB}) - 0.839 \quad \text{Ecuación 77}$$

También es necesario conocer el tipo y tiempo de drenaje, esto influye en la capacidad de la capa a largo plazo y repercute en la capacidad estructural del material y de la estructura como un todo. El coeficiente de drenaje (m) depende de la capacidad de los drenajes y el tiempo de exposición del material al agua tal como se muestra en el Cuadro 9-2.

Cuadro 9-2. Coeficiente de drenaje para diseño empírico de pavimentos

Calidad del drenaje	P= % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	< 1%	1% - 5%	5% - 25%	> 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

9.1.2 Revisión de La Estructura Mediante Método Mecánico Empírico

9.1.2.1 Cálculo de Esfuerzos y Deformaciones.

Una vez los espesores de la estructura de pavimentos han sido definidos por medio de una metodología empírica tal como AASHTO 93, es necesario calcular esfuerzos y deformaciones en la parte inferior de la capa asfáltica. Con estos esfuerzos se estiman la cantidad de repeticiones de una carga de un eje equivalente o del espectro de carga podrán transitar por la vía sin producir una falla estructural. La carga de análisis usualmente se basa en un eje equivalente de 8.2 Ton (1 ESAL).

Este análisis se puede realizar utilizando diferentes tipos de métodos para estimar esfuerzos y deformaciones en sistemas multicapa. Algunos ejemplos de este son:

- Multicapa elástica.
- Método de espesores equivalentes y Boussinesq (sistema de una capa).
- Sistemas de dos y tres capas por medio de teoría de Burmister.

- Sistemas de elementos finitos.

9.1.2.2 Consumo por Fatiga.

El objetivo de realizar un análisis mecánico-empírico es poder usar propiedades mecánicas del material para, en conjunto con ensayos de desempeño y resultados de desempeño real, predecir el comportamiento de la estructura de pavimento en términos de severidad de la falla.

Para esto existen modelos diseñados específicamente para predecir la severidad de fallas determinadas, en este caso fatiga, a lo largo de la vida útil de la estructura de pavimentos. Estos modelos se crean en función de las propiedades y la respuesta del material bajo cargas repetitivas.

Es necesario resaltar que el desempeño del material varía significativamente dependiendo del tipo de material. En este caso, para fatiga se debe analizar el desempeño de la mezcla asfáltica, este depende de variables como la calidad de los agregados, las propiedades volumétricas de la mezcla (% de vacíos, % asfalto, gradación), el tipo de asfalto, entre otras. Lo cual determina variaciones considerables en el desempeño frente a las fallas de fatiga, la forma de abordar este desafío es realizar ensayos de fatiga para cada tipo de mezcla y así realizar modelos de desempeño específicos para cada mezcla. A esto es necesario agregarle la variabilidad entre ensayos de laboratorio y el desempeño real en campo, la cual puede determinar variaciones considerables en el momento del diseño. Es sabido que el tiempo prudente para poder relacionar los modelos obtenidos del laboratorio con los resultados reales puede tomar mínimo 10 años de toma de datos después de puesta la mezcla.

A continuación, se presentan los modelos más comunes utilizados para predecir el desempeño de la mezcla asfáltica frente a la fatiga.

9.2 METODOLOGÍA PROPUESTA

A continuación, se presenta la metodología propuesta para determinar los espesores de las capas de la estructura de pavimentos mediante un enfoque mecanicista, es decir, partiendo de las propiedades mecánicas de los materiales para determinar esfuerzos y deformaciones admisibles a lo largo de la vida útil.

El objetivo de estas metodologías es incorporar la predicción del estado de esfuerzo y deformación en la estructura del pavimento (componente mecánico) y las correlacionarlos con el comportamiento observado del pavimento (componente empírico). El proceso de diseño de pavimentos empírico-mecanicista se describe en la figura 9-2.

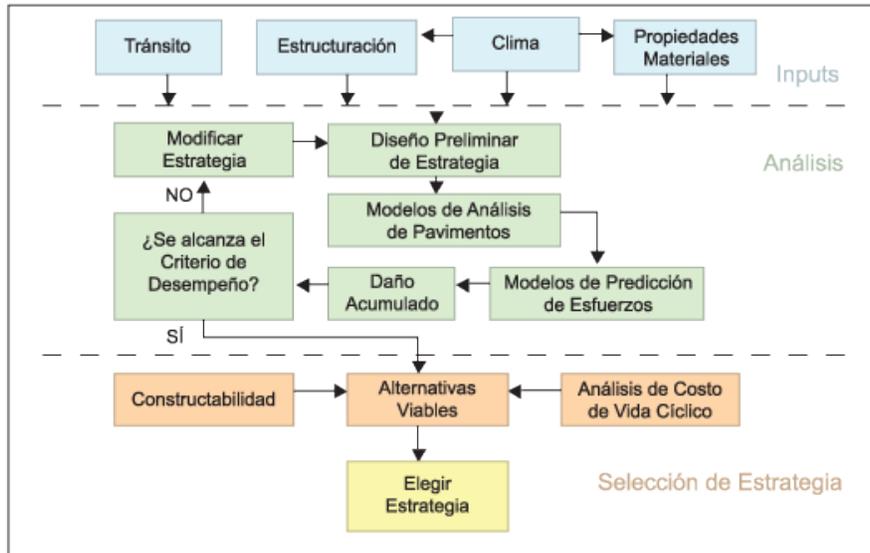


Figura 9-2. Procedimiento general de diseño mecanístico - empírico para pavimentos asfálticos.

Fuente: (Montenegro & Wahr, 2007).

Los componentes mecanicistas permiten determinar la respuesta del pavimento ante cargas de tránsito y condiciones ambientales, como lo son los esfuerzos, las deformaciones y las deflexiones. Lo anterior se realiza por medio de modelos matemáticos que acumulan el daño producido durante el periodo de diseño. Este daño acumulado se compara con los límites aceptables y confiabilidad, definidos para cada indicador.

Los componentes empíricos relacionan, a través de modelos de regresión, el daño en el tiempo del pavimento con deterioros típicos, como agrietamiento por fatiga, agrietamiento por temperatura, ahuellamiento y modificaciones del Índice de Regularidad Internacional (IRI).

Los beneficios de este tipo de metodologías son (Vásquez, 2013):

- a) Mejor confiabilidad para el diseño, ya que se basan en la respuesta de la estructura y por tanto permiten su aplicación para materiales no convencionales o novedosos.
- b) Habilidad para predecir tipos específicos de daño, como agrietamiento (de abajo-arriba y de arriba-abajo), ahuellamiento e incremento de la rugosidad.

- c) Habilidad para extrapolar resultados parciales de campo y laboratorio, lo que permite menor inversión en proyectos de escala real con largos periodos de tiempo para obtener resultados (por ejemplo, la pista de prueba AASHO).
- d) Permite la evaluación de nuevas condiciones de carga, en términos de tipo de ejes, ruedas y presión de inflado.
- e) Mejor empleo de los materiales disponibles para la construcción.
- f) Modelación de los efectos de envejecimiento del asfalto (oxidación).
- g) Modelación de los efectos ambientales y la calidad del drenaje.

Entre las desventajas de los métodos mecanístico -empíricos son los requisitos y datos que se incluyen en los diferentes modelos, como el caso del módulo climático que para una adopción completa se necesita de muchos insumos que por lo general no se poseen, son de difícil acceso o requieren una inversión alta para determinarlos.

A manera de ejemplo, la MEPDG requiere información horaria de la temperatura del aire, precipitación, velocidad del viento, porcentaje de los rayos del sol, humedad relativa y la profundidad promedio del nivel freático como variables climáticas de entrada para realizar un diseño nivel 3 (nivel más básico o para el cual se permite mayor grado de incertidumbre).

Otra desventaja de los métodos mecanístico-empíricos es que inicialmente se requiere de ensayos a escala natural para calibrar los modelos de deterioro.

9.2.1 Succión de Materiales no Ligados en Función de la Precipitación

Como se mencionó anteriormente, la presencia de agua en los materiales no ligados repercute significativamente en el desempeño de los mismos. Esta tiene un mayor impacto en suelos principalmente cohesivos, como suelen presentarse en la zona norte de Bogotá, y es determinante en la selección de un valor lógico de Modulo Resiliente para la capa de la subrasante. Es de esperarse que dichas propiedades fluctúen a través del año debido a factores ambientales los cuales, por consiguiente, causan variaciones en las propiedades mecánicas del suelo.

Para conocer el impacto de la succión en función del clima es necesario conocer la humedad de Thornthwaite (TMI) y wPI. Finalmente, se determina la relación entre succión y saturación por medio la curva SWCC (Soil Water Characteristic Curve) (refiérase al Capítulo 2).

9.2.2 Estimación del Módulo Resiliente

Es necesario conocer el módulo resiliente de la subrasante para determinar la capacidad estructural de la estructura de pavimento. Esta metodología propone estimar el Módulo Resiliente en función de las respuestas en los materiales de la estructura de pavimento.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo en donde se resume la metodología propuesta:

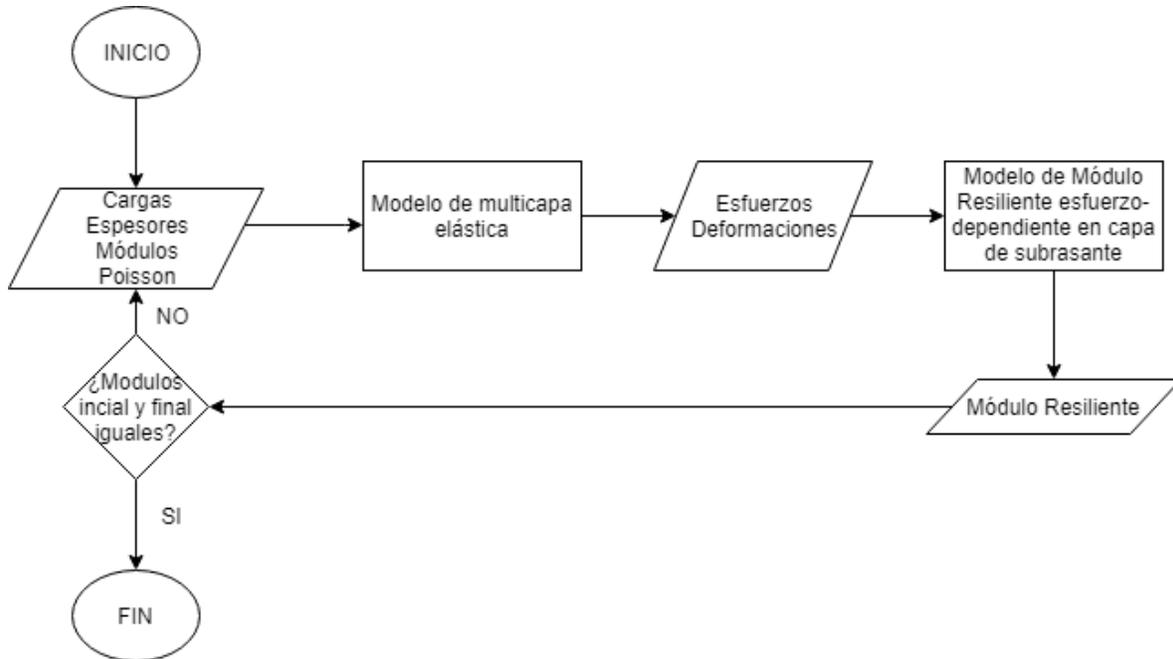


Figura 9-3. Proceso iterativo para el cálculo del módulo resiliente

9.2.3 Revisión de la Estructura de Pavimentos Mediante Método Mecanicista

Es necesario verificar que las propiedades y los espesores de los materiales cumplan con el desempeño necesario a lo largo de la vida útil. Para esto se utilizan modelos de desempeño diseñados para predecir la aparición de fallas como fatiga, ahuellamiento en cualquier capa, agrietamiento longitudinal y transversal, entre otros. (Refiérase a la Sección 9.1.2).

De esta manera es posible realizar un proceso iterativo con el fin de encontrar los espesores y materiales óptimos que puedan soportar tanto las cargas aplicadas durante la vida útil como las condiciones climáticas.

10 RESULTADOS

En el siguiente apartado se presentan los resultados de los ensayos llevados a cabo como parte de la investigación, la cual busca determinar la viabilidad de utilizar los modelos de afectación del módulo resiliente desarrollados en diversas investigaciones en los suelos blandos de Bogotá. El apéndice B muestra el código VBA desarrollado como parte de esta investigación.

10.1.1 Resultados ensayos geotécnicos

10.1.1.1 Módulo Resiliente

Los cuadros en el Apéndice A muestran los datos de los ensayos de módulo resiliente para cada uno de los meses desde mayo 2018 hasta abril 2019. También se muestran las dimensiones de las muestras ensayadas (diámetro y altura).

Los resultados de las regresiones lineales múltiples realizadas para obtener los modelos universales de cada muestra se muestran en el Cuadro 10-1.

Cuadro 10-1. Parámetros de la regresión lineal múltiple para cada mes

Mes	k1		k2		k3	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Enero	0.052	0.184	-0.493	-0.007	4.845	-0.954
Febrero	0.192	0.240	-0.051	0.081	-3.166	-1.544
Marzo	0.268		0.312		-1.524	
Abril	0.093	0.018	0.053	-0.141	4.040	8.332
Mayo	0.387	0.377	-0.005	0.173	-1.157	-1.738
Junio	0.701	0.257	0.459	0.026	-3.772	-1.738
Julio	0.139	0.157	-0.341	0.204	0.834	-1.708
Agosto	0.169	0.139	-0.047	-0.341	-0.705	0.834
Setiembre	0.275	0.255	0.156	0.326	-3.293	-4.419
Octubre	0.319	0.269	0.233	0.095	-4.442	-3.130
Noviembre	0.210	0.288	-0.040	0.043	-1.203	-3.075
Diciembre	0.364	0.339	0.133	0.220	-5.577	-4.503

10.1.1.2 Proctor Modificado

Se tomó una muestra representativa para obtener las propiedades de humedad óptima y densidad seca del suelo. Los resultados del ensayo Proctor Modificado se muestran en el Cuadro 10-2.

Cuadro 10-2. Resultados ensayo Proctor

MUESTRA	1	2	3	4
Wm+molde(g)	5275	5412	5396	5404
Wmuestra(g)	1555.2	1698.2	1682.2	1684.2
γ_T (g/cm ³)	1.65	1.8	1.83	1.78
γ_d (g/cm ³)	1.28	1.36	1.37	1.29
γ_d (KN/m ³)	12.58	13.33	13.4	12.62
W recipiente(g)	118	119.8	90.3	123.1
W m+r seca(g)	1330.4	1404.2	1346.7	1339.2
W m seca(g)	1212.4	1284.4	1256.4	1216.1
Humedad, %	28	32	34	38
w saturado	40.77	36.41	36	40.53

De acuerdo con los datos del ensayo Proctor Modificado se obtiene el gráfico mostrado en la Figura 10-1.

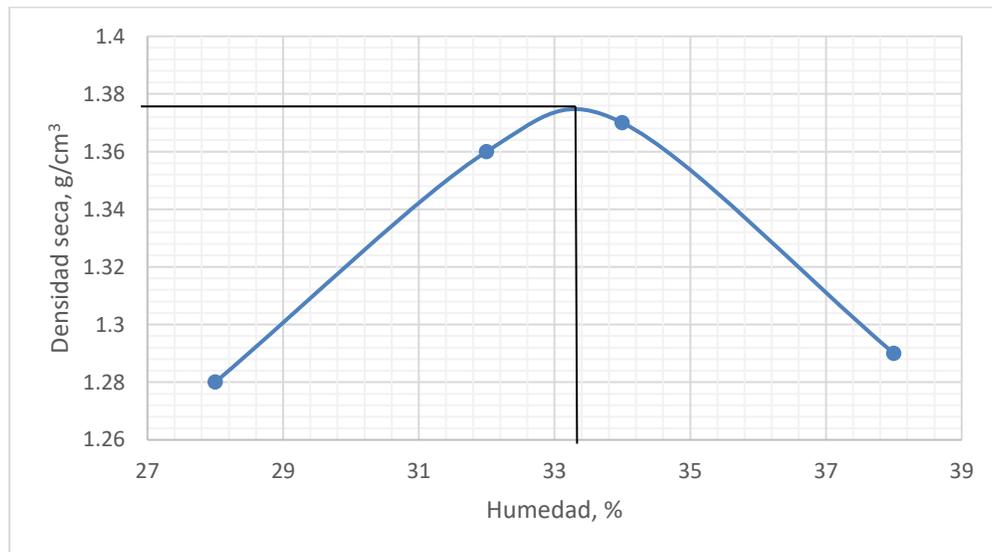


Figura 10-1. Gráfico ensayo Proctor

De los datos del ensayo, se puede obtener que la densidad seca máxima es de 1,376 g/cm³ para una humedad óptima de 33,4%.

10.1.1.3 Ensayo CBR

Se realizó el ensayo de CBR con las condiciones inalteradas, las humedades de los especímenes 1 y 2 son de 63% y 58%, respectivamente. El resumen de los resultados obtenidos en el ensayo se muestra en el Cuadro 10-3 y en la Figura 10-2.

Cuadro 10-3. Resultados ensayo CBR

Penetración	Muestra 1		Muestra 2	
	Carga, kg	Esfuerzo, MPa	Carga, kg	Esfuerzo, MPa
0,025 in	43	0,2181	49	0,2485
0,05 in	52	0,2637	62	0,3144
0,075 in	57	0,2890	69	0,3499
0,1 in	60	0,3043	72	0,3651
0,125 in	63	0,3195	74	0,3753
0,15 in	65	0,3296	75	0,3803
0,175 in	66	0,3347	75	0,3803
0,2 in	67	0,3398	75	0,3803
0,3 in	68	0,3448	75	0,3803
0,4 in	68	0,3448	75	0,3803
0,5 in	68	0,3448	75	0,3803

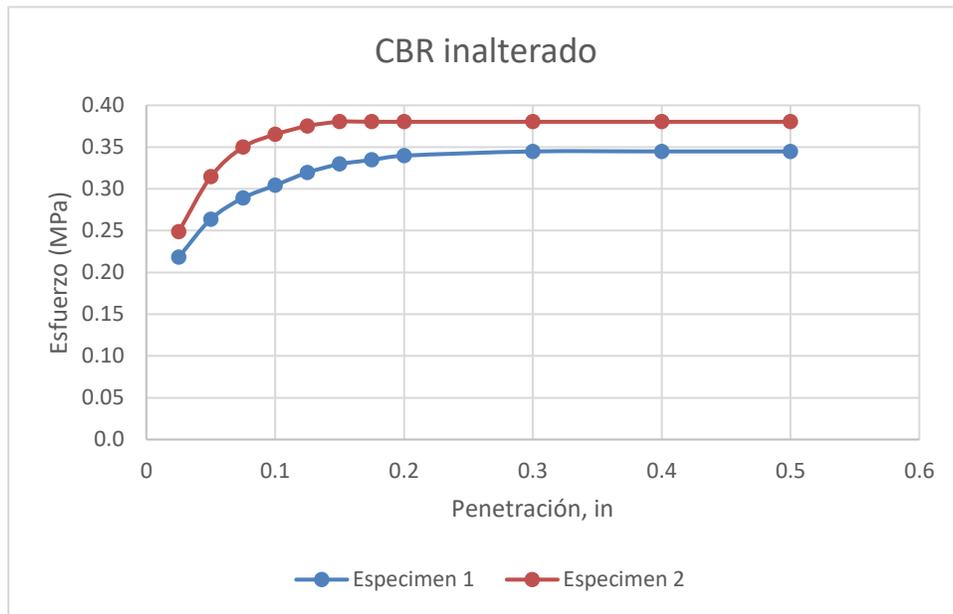


Figura 10-2. Ensayo CBR

Cuadro 10-4. Análisis de Resultados Ensayo CBR

	Muestra 1	Muestra 2
Esfuerzo/Esfuerzo referencia, 0,1 in (%)	4,41	5,29
Esfuerzo/Esfuerzo referencia, 0,2 in (%)	3,28	3,67

El valor de esfuerzo de referencia para la muestra patrón es de 6,90 MPa para una penetración de 0,1 in, mientras que el valor a 0,2 in es de 10,35 MPa. Debido a que no hay un punto de inflexión en los gráficos, se utilizan los valores de presión a 0,1 in y 0,2 in sin

necesidad de realizar una corrección. Ya que el valor de CBR a 0,2 in es menor al valor obtenido para una penetración de 0,1 in, se reporta la presión a 0,1 in como el valor de CBR del suelo. En este caso el CBR de las muestras 1 y 2 es 4,41 y 5,29 respectivamente.

Cabe destacar que estas humedades son superiores a la humedad óptima de 33,4%. Se decidió utilizar los valores característicos de CBR a un contenido de humedad óptimo obtenidos en investigaciones previas en la universidad con tal de ser más consistentes. Para verificar la precisión del valor recomendado por el laboratorio se realizó un análisis de sensibilidad para conocer cuál valor de CBR es el más adecuado como valor semilla en las iteraciones del modelo elaborado en este estudio. En la Figura 10-3, se muestra el análisis de sensibilidad realizado con los valores de CBR de 2% y 5%.

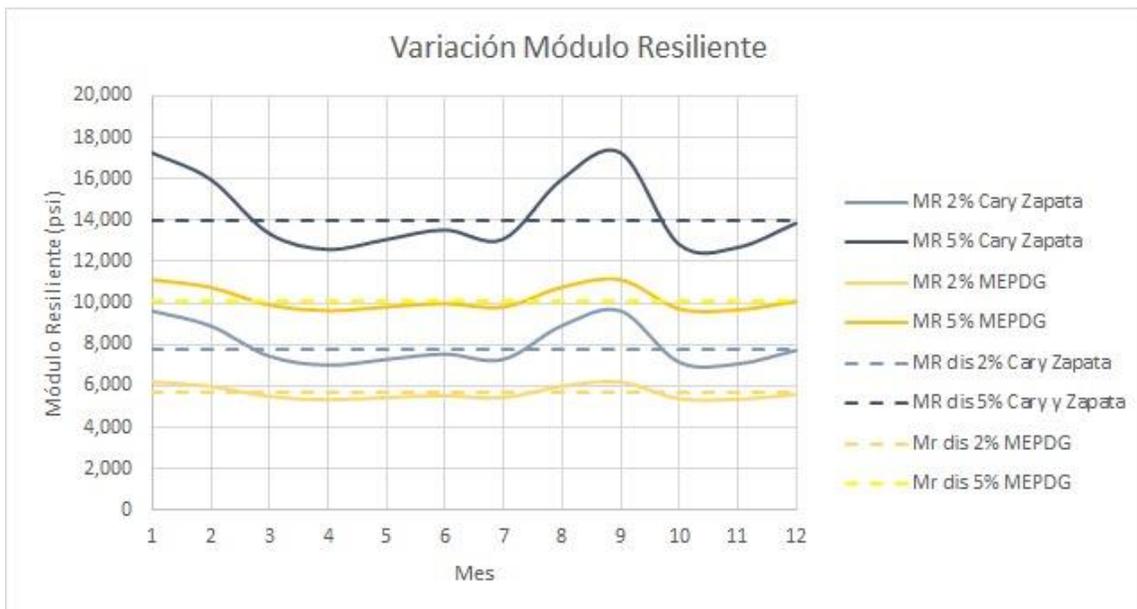


Figura 10-3. Gráfico de sensibilidad mensual utilizando CBR de 2% y 5%.

El valor de CBR utilizado en esta tesis será de un 2% debido a las recomendaciones y el análisis de sensibilidad realizado. Cabe destacar que el valor de CBR es utilizado con las correlaciones para obtener un valor de módulo resiliente que sirva de valor inicial en el proceso iterativo del modelo universal y como comparativo de los resultados obtenidos con el modelo.

10.1.1.4 Humedad de las muestras

Las humedades de las muestras ensayadas fueron obtenidas como la razón entre el peso de agua y el peso de la muestra seca. El suelo ensayado posee valores muy altos de humedad tal como se muestra en el Cuadro 10-5, conteniendo más de un 50% de peso en agua. Esto representa una limitación, pues los modelos no fueron calibrados para condiciones de saturación altas.

Cuadro 10-5. Humedad de las muestras ensayadas

Mes	Humedad 1, %	Humedad 2, %	Humedad promedio, %	COV, %
Mayo	50%	48%	49%	3%
Junio	73%	63%	68%	10%
Setiembre	69%	70%	70%	1%
Octubre	60%	68%	64%	9%
Noviembre	64%	65%	65%	1%
Diciembre	63%	65%	64%	1%

10.1.1.5 Límites y gravedad específica

Para el cálculo de la gravedad específica del suelo utilizado en el estudio, los resultados se muestran en el Cuadro 10-6. La gravedad específica del suelo (G_s) promediando los dos meses ensayados es de 2,6.

Cuadro 10-6. Resultados ensayo Gravedad específica

Mayo		Junio	
Calibración Picnómetro		Calibración Picnómetro	
M picnómetro (g)	174	M picnómetro (g)	162,8
M picnómetro + agua (g)	671	M picnómetro + agua (g)	660
T° picnómetro + agua (°C)	22,8	T° picnómetro + agua (°C)	21,6
ρ agua a la temperatura (g/cm ³)	0,9976	ρ agua a la temperatura (g/cm ³)	0,9979
V picnómetro (cm ³)	498,2	V picnómetro (cm ³)	498,3
Ensayo		Ensayo	
M picnómetro + agua (g)	671	M picnómetro + agua (g)	660
M picnómetro + agua + suelo (g)	702	M picnómetro + agua + suelo (g)	690,8
T ensayo (°C)	22,2	T ensayo (°C)	20,4
M platón (g)	106,4	M platón (g)	100,6
M platón + suelo seco (g)	156	M platón + suelo seco (g)	151,4
M suelo seco (g)	49,6	M suelo seco (g)	50,8
G_s temperatura de ensayo	2,67	G_s temperatura de ensayo	2,54
K coeficiente de corrección	0,9994	K coeficiente de corrección	0,9981
G_s 20°C	2,67	G_s 20°C	2,54

El valor promedio de la gravedad específica del suelo es de 2,60. Este valor será el utilizado en esta investigación en los cálculos necesarios en los modelos.

Se desarrollaron los ensayos de obtención de límite líquido y plástico del suelo en estudio. Los ensayos se realizaron en las muestras de los meses de mayo y junio. El valor promedio de límite líquido a utilizar es de 86% y el límite plástico de 31%. Los datos de los ensayos se muestran en el Cuadro 10-7 y los gráficos con los que se obtienen los límites se muestran en la Figura 10-4 y Figura 10-5. El valor de índice de plasticidad es de 55 y el wPI es 46,75.



Figura 10-4. Gráfico de ensayo límite líquido y plástico mes de mayo

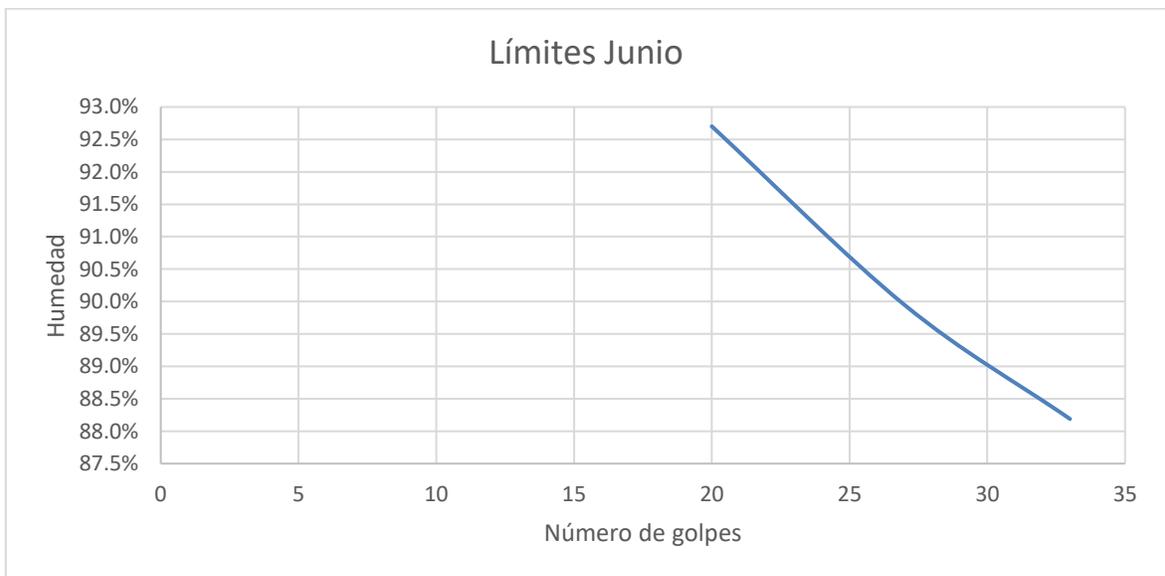


Figura 10-5. Gráfico de ensayo límite líquido y plástico mes de junio

Cuadro 10-7. Datos ensayo límite líquido y plástico

Datos	Mayo					Junio				
	Límite Líquido			Límite Plástico		Límite Líquido			Límite Plástico	
	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2
No. Recipiente	64	68	70	60	59	52	61	53	71	73
M. Recipiente	11,0	11,1	11,3	11,2	11,3	10,88	10,54	10,8	11,48	10,81
No. Golpes	33	24	14			33	27	20		
M. Recipiente + Suelo Húmedo	26,7	27,2	27,9	19,4	18,5	25,2	24,5	23,2	19,0	19,1
M. Recipiente + Suelo Seco	19,8	19,9	20,1	17,8	16,7	18,5	17,9	17,2	17,1	17,0
M. Suelo Seco	8,8	8,8	8,9	6,6	5,4	7,6	7,4	6,4	5,6	6,1
M. Agua	6,92	7,28	7,82	1,6	1,76	6,72	6,62	5,97	1,9	2,15
Humedad, %	78,6	82,5	88,2	24,2	32,4	88,2	89,9	92,7	33,9	35,0

10.1.1.6 Resumen de resultados

Se resumen los resultados de los ensayos de laboratorio en el siguiente cuadro.

Cuadro 10-8. Resumen de datos de ensayo

Variable	Medición por ensayo o ecuación	Muestra 1	Muestra 2	Promedio	Unidad
Humedad óptima	Ensayo Proctor modificado	33,4			%
Densidad seca máxima	Ensayo Proctor modificado	1,376			g/cm ³
CBR	Ensayo	4.41	5.29	4.85	%
Humedad muestras	Ensayo	63%	63%	63%	%
Gravedad Especifica	Ensayo	2,67	2,54	2,61	
Límite líquido	Ensayo	86			%
Límite plástico	Ensayo	31			%
IP	Ecuación	55			%
wPI	Ecuación	46,75			%
Saturación optima	Ecuación	96			%

10.1.2 Condiciones climáticas Bogotá

Para obtener las condiciones climáticas promedio de Bogotá, se consideraron un total de 282 estaciones climáticas. Estas estaciones cuentan con datos de precipitación y

temperatura. Con estos datos es posible calcular el índice de Thornthwaite según el método de índice de calor descrito anteriormente en el Capítulo 8.1.2.

De igual manera estas estaciones contienen datos de brillo solar, velocidad del viento y humedad relativa. Estos valores pueden utilizarse para obtener un valor de índice de Thornthwaite según el modelo de Penman y Monteith. Este modelo es utilizado principalmente en aplicaciones de ingeniería agronómica y utiliza todas las variables que afectan las condiciones climáticas de una región para obtener el estimado. También se calculan las horas de sol promedio del mes, para esto se utiliza un modelo sinusoidal que considera la latitud de la zona en estudio. En el caso de Bogotá por estar cerca del ecuador, las horas de sol promedio diarias van de 11,74 en diciembre a un máximo de 12,26 en junio.

Los valores de las variables climáticas promedios mensuales para las 282 estaciones utilizadas en el estudio de Bogotá se muestran en el Cuadro 10-9. El análisis se puede realizar incluso con una estimación diaria, sin embargo, el alcance de este proyecto se limita a comparar los modelos mensualmente con los valores reales obtenidos en campo. Para el estudio se consideran los últimos 10 años de cada estación. El análisis se realizó con el software Clima, adjunto a la guía de diseño de pavimentos flexibles de bajo volumen.

Algunas de las estaciones consideradas son: puente Cundinamarca, Avenida Américas, Santa Rosa, Pozo Llanitos, Alto Caicedo, Avenida 30 Calle 68, Canal Embalse, Kennedy, entre otras. Estos datos son obtenidos de datos de la red de estaciones meteorológicas del IDEAM.

Cuadro 10-9. Variables climáticas promedio Bogotá

Mes	Precip, mm	Temp Media, °C	Temp Mín, °C	Temp Máx, °C	Vel Viento (m/s)	Brillo Solar (horas)	Humedad Relativa (%)
Enero	42,4	14,2	7,4	20,6	2,4	171,6	75,9
Febrero	71,2	14,5	8,6	20,4	2,6	129,2	77,2
Marzo	94,9	14,5	9,4	19,9	2,3	100,6	79,4
Abril	153,4	14,4	9,6	19,6	2,4	80,1	80,8
Mayo	110,5	14,6	9,7	19,4	2,5	85,0	79,9
Junio	87,9	14,3	9,3	19,0	3,0	113,2	77,8
Julio	103,4	13,9	9,0	18,6	2,7	112,5	78,3
Agosto	62,9	14,1	9,2	19,1	2,9	116,4	77,1
Setiembre	53,9	14,2	8,9	19,3	3,0	114,2	75,4
Octubre	122,0	14,3	8,9	19,6	2,7	105,4	78,2
Noviembre	132,6	14,3	9,2	19,9	2,4	93,0	80,6
Diciembre	79,3	14,2	8,3	19,8	2,2	138,3	77,1

En el cuadro se muestran los valores obtenidos de horas de sol, evapotranspiración (A), índice de calor (B), almacenamiento (C), exceso (D), déficit (E) e índice de Thornthwaite (F) se muestran en el Cuadro 10-10. Puede observarse que el déficit es 0 durante todo el año, lo cual indica los altos índices de humedad presentes en Bogotá. La temperatura media de los 7 días consecutivos más calientes es de 14,91 °C. Bogotá se clasifica según su temperatura como una región de clima templado y según el índice de Thornthwaite como una región B3, húmeda, con lluvia moderada o lluvia fuertemente estacional, debido a su índice de Thornthwaite promedio anual de 62,03.

En el Cuadro 10-11 se muestran los valores obtenidos de índice de humedad de Thornthwaite utilizando el modelo de Penman-Monteith. De acuerdo con esta estimación, los excesos son mucho menores a la estimación con índice de calor, lo cual no parece adecuado según las condiciones de Bogotá. El índice de humedad de Thornthwaite de acuerdo con este método es de 12,47. La clasificación según este índice es C2. Subhúmedo-Húmedo.

Cuadro 10-10. Cálculo del índice de humedad de Thornthwaite por el método del índice de calor

Mes	Horas de Sol	Evapotranspiración, mm	Índice de calor	Almacenamiento, mm	Exceso, mm	Déficit, mm	TMI
Enero	11,77	56,37	4,84	86,02	0,00	0,00	0,00
Febrero	11,86	54,70	4,99	100,00	2,53	0,00	4,62
Marzo	11,98	59,06	4,99	100,00	35,87	0,00	60,74
Abril	12,11	57,56	4,97	100,00	95,88	0,00	166,58
Mayo	12,21	60,82	5,05	100,00	49,67	0,00	81,67
Junio	12,26	57,52	4,90	100,00	30,33	0,00	52,72
Julio	12,23	57,22	4,72	100,00	46,17	0,00	80,69
Agosto	12,14	57,94	4,82	100,00	4,94	0,00	8,53
Setiembre	12,02	55,65	4,83	98,26	0,00	0,00	0,00
Octubre	11,89	57,54	4,89	100,00	62,75	0,00	109,06
Noviembre	11,79	55,50	4,92	100,00	77,09	0,00	138,90
Diciembre	11,74	56,29	4,84	100,00	22,99	0,00	40,83

Cuadro 10-11. Cálculo del índice de humedad de Thornthwaite por el método de Penman y Monteith

Mes	Radiación Solar (MJ/m ² /día)	Evapotranspiración, mm	Almacenamiento, mm	Exceso, mm	Déficit, mm	TMI
Enero	312,15	92,17	53,21	0	0	0
Febrero	287,55	85,2	19,23	0	0	0
Marzo	291,18	85,33	20,62	0	0	0
Abril	265,94	77,61	67,85	0,07	0	2,82
Mayo	264,82	78,69	99,36	1,03	0	40,87
Junio	269,11	80,7	98,8	0,3	0	10,82
Julio	278,37	81,88	98,73	0,66	0	26,01
Agosto	292,76	87,1	87,63	0	0	0
Setiembre	289,84	87,56	61,43	0	0	0
Octubre	283,17	84,08	59,77	0	0	0
Noviembre	253,79	74,83	94,87	1,23	0	50,52
Diciembre	281,33	83,54	95,18	0,49	0	18,57

Para este estudio se utilizará el índice de Thornthwaite calculado con el índice de calor pues representa de mejor manera las condiciones encontradas en Bogotá a lo largo del año en estudio. Esto se puede dar debido a que no todas las estaciones utilizadas para el cálculo de la evapotranspiración cuentan con todos los datos necesarios para el cálculo completo, lo cual afecta considerablemente la estimación.

10.1.3 Aplicación de la Curva SWCC

Tal como se comentó en el Capítulo 2.4, existen tres modelos para el cálculo de los parámetros de la curva SWCC. La Figura 10-6 muestra la comparación para los tres modelos para los datos.

Como puede visualizarse las diferencias entre las curvas son mínimas y se dan principalmente para la curva propuesta en la tesis de Torres y Zapata para valores de succión matricial bajas. A diferencia de las demás curvas no se asume una saturación del 100% a succiones matriciales bajas.

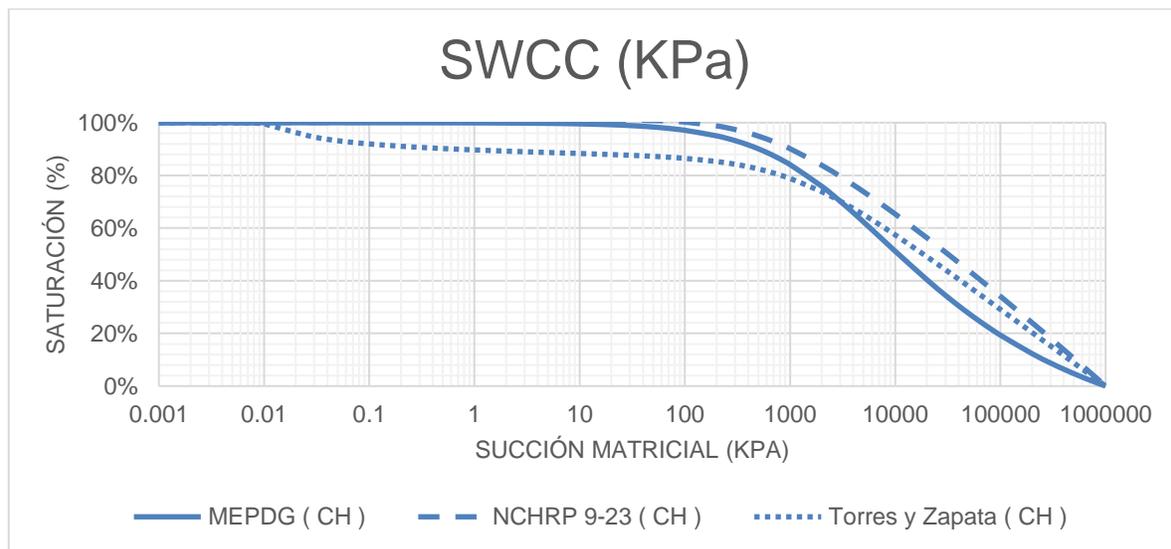


Figura 10-6. Curva SWCC para los datos de entrada del suelo estudiado

Los valores de los parámetros de curva SWCC utilizados en la investigación se muestran en la Cuadro 10-12. Estos valores son los del modelo de Torres y Zapata, el cual es el modelo de curva SWCC más actualizado y el que se utiliza en la investigación.

Cuadro 10-12. Valores utilizados en el estudio curva SWCC

Valores de la Curva Suelo Agua SWCC según las ecuaciones de Torres Zapata	
af	0,01
bf	5,66
cf	0,03
hr	1152,48

10.1.4 Módulo Resiliente Multitemporal de Materiales no Ligados

Los modelos de Cary y Zapata se utilizan para poder obtener los factores ambientales para cada mes. Estos factores permiten afectar el módulo resiliente en función de la precipitación y la temperatura de Bogotá.

Un mes lluvioso tendrá un módulo resiliente más bajo, lo cual se ve reflejado en los modelos y el factor ambiental.

La latitud es un factor por tomar en cuenta, puesto que los modelos consideran las horas de luz solar del lugar durante el mes en estudio. La latitud de Bogotá es $4,61^\circ$, lo cual hace que la variación de horas de luz durante el año sea mínima al estar cerca del Ecuador.

Los valores del modelo que relaciona el índice de humedad de Thornthwaite (TMI) con la succión matricial del suelo. Los valores utilizados en el estudio se muestran en el Cuadro 10-13.

Cuadro 10-13. Valores del modelo que relaciona el TMI con la succión

Valores modelo TMI	
alfa	0,3
beta	1150,0
gamma	157,0
delta	28,3

En la Figura 10-7 se muestra la succión estimada para cada uno de los meses.

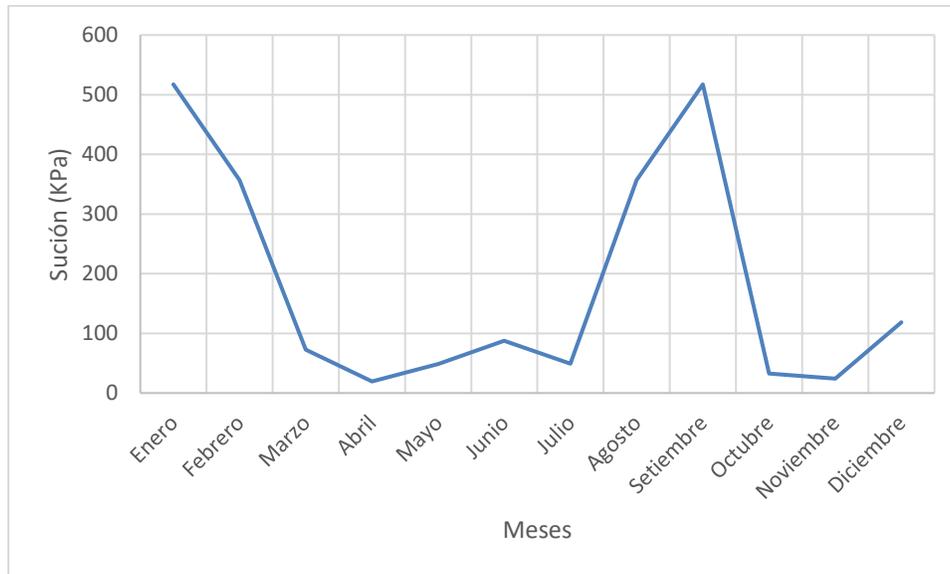


Figura 10-7. Succión matricial para cada mes según los modelos de Cary y Zapata

Los resultados de los modelos se muestran en el Cuadro 10-14. Se muestran la succión estimada como función del TMI con el cual posteriormente se estima suelo la estimación de contenido volumétrico de agua y la saturación para cada mes, según el modelo de curva suelo agua de Fredlund y Xing para las propiedades ingresadas del suelo en estudio.

Cuadro 10-14. Resultados Variables climáticas

Mes	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Succión (KPa)	Contenido Volumétrico de agua	Saturación (%)
Enero	42.39	14.17	517,2	0,39	82,4
Febrero	71.21	14.46	356,8	0,39	83,8
Marzo	94.93	14.46	72,5	0,41	87,0
Abril	153.43	14.42	19,5	0,41	88,0
Mayo	110.49	14.56	48,5	0,41	87,4
Junio	87.85	14.29	87,4	0,41	86,8
Julio	103.39	13.93	49,4	0,41	87,4
Agosto	62.88	14.13	357,0	0,39	83,8
Setiembre	53.90	14.16	517,2	0,39	82,4
Octubre	122.03	14.27	32,7	0,41	87,7
Noviembre	132.60	14.32	23,9	0,41	87,9
Diciembre	79.28	14.18	118,3	0,41	86,4

El Cuadro 10-15 muestra los factores ambientales obtenidos para el modelo propuesto por Cary y Zapata y según el modelo del MEPDG. Estos modelos difieren considerablemente,

pues los modelos de Cary y Zapata consideran una mayor afectación debido a los factores climáticos en el tipo de suelo estimado, considerando que su módulo resiliente será mayor al obtenido con la humedad óptima en un porcentaje mayor al estimado según los modelos del MEPDG.

Cuadro 10-15. Factor ambiental para los dos modelos considerados

Mes	Factor Ambiental Cary Zapata, %	Factor Ambiental MEPDG, %
Enero	241,0	155,6
Febrero	223,3	150,5
Marzo	187,2	138,7
Abril	176,5	134,8
Mayo	183,1	137,3
Junio	189,5	139,5
Julio	183,3	137,3
Agosto	223,3	150,5
Setiembre	241,0	155,6
Octubre	179,9	136,1
Noviembre	177,8	135,3
Diciembre	194,0	141,1

Como se observa en el cuadro anterior, los factores ambientales según el modelo propuesto por Cary y Zapata son mayores a los especificados por el MEPDG. Esto se debe a que los factores obtenidos por el método del MEPDG son basados en datos promedio, mientras que el nuevo modelo de Cary y Zapata considera las propiedades del material. El material estudiado es un material de subrasante el cual se ve afectado considerablemente por las condiciones climáticas, lo cual influye en que los factores obtenidos con el modelo de Cary y Zapata sean mayores a los valores promedio de MEPDG.

Los valores obtenidos son mayores a un 100% debido a que la saturación óptima del suelo es muy alta (96%), razón por la cual las saturaciones estimadas para cada mes son menores a dicha saturación óptima, tal como se observa en el Cuadro 10-14.

Los resultados de módulo resiliente obtenidos por medio de los ensayos de módulo resiliente se muestran en el Cuadro 10-17 junto con los resultados obtenidos al utilizar los modelos de Cary y Zapata y de MEPDG. El modelo utilizado para estimar el módulo resiliente del material es el mostrado en la 7.2, en la Ecuación 11.

Como se puede observar en la Figura 10-8 y en el Cuadro 10-16, los valores de los dos ensayos realizados para cada mes son similares, exceptuando el mes de junio, en el cual los resultados obtenidos difieren considerablemente. Puede observarse que los resultados obtenidos en el mes de abril son relativamente bajos cuando se comparan con el resto de los valores para los demás meses, lo cual indica que puede ser una anomalía en los resultados obtenidos del ensayo de módulo resiliente para este mes. De igual manera puede observarse la tendencia a aumentar el módulo resiliente a partir del mes de agosto hasta diciembre. Cabe destacar que para el mes de marzo se cuenta con un solo ensayo.

Cuadro 10-16. Resultados ensayo módulo resiliente

Mes	Módulo Resiliente 1 (MPa)	Módulo Resiliente 2 (MPa)	Módulo Resiliente Promedio (MPa)
Enero	9.3	18.0	13.6
Febrero	17.6	21.4	19.5
Marzo	20.1		20.1
Abril	10.7	2.7	6.7
Mayo	37.4	30.9	34.2
Junio	41.7	23.7	32.7
Julio	16.3	21.2	18.8
Agosto	17.2	18.7	18.0
Setiembre	21.5	16.8	19.1
Octubre	22.4	22.1	22.2
Noviembre	20.8	24.6	22.7
Diciembre	26.1	23.9	25.0

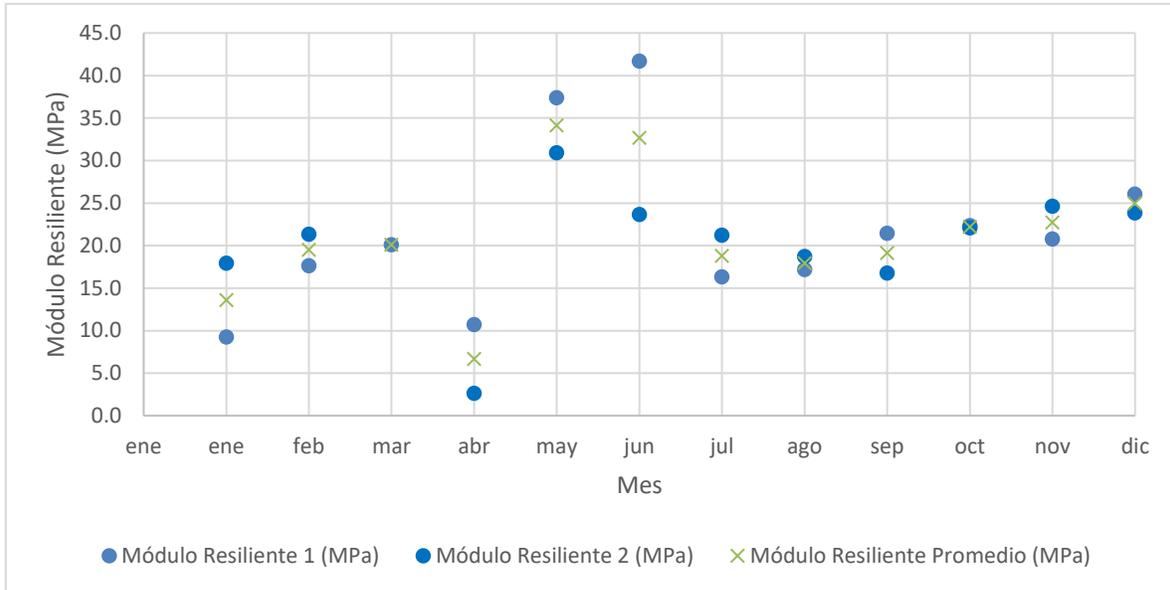


Figura 10-8. Resultados Módulo Resiliente

10.2 COMPARACION DE RESULTADOS

Se compararon los resultados de módulo resiliente obtenidos por medio de los ensayos de módulo resiliente y las estimaciones obtenidas con los modelos de Cary y Zapata y los modelos del MEPDG.

Los resultados se muestran en la Figura 10-9 y en el Cuadro 10-17.

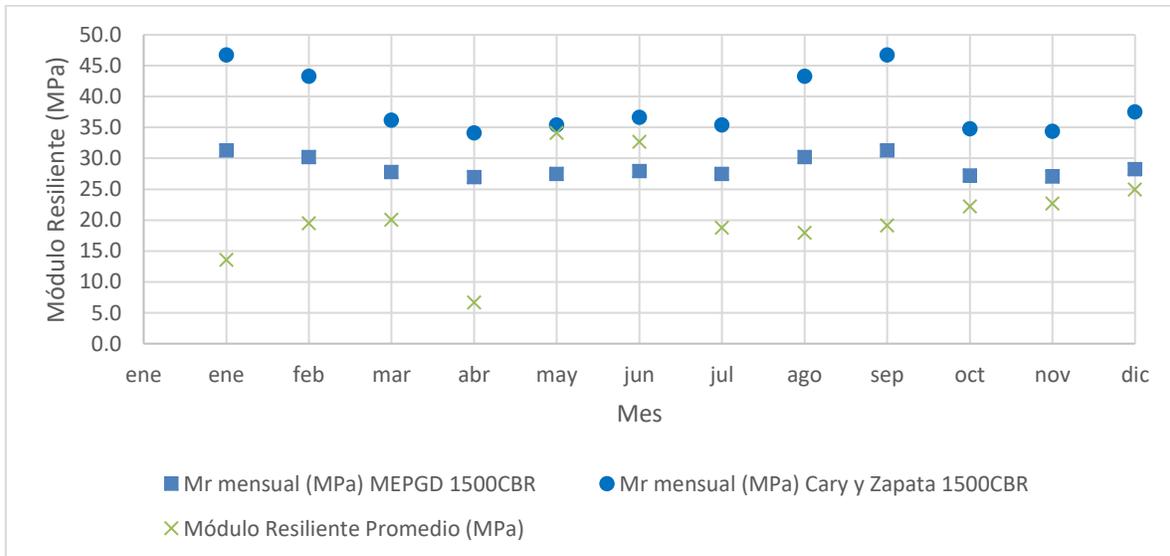


Figura 10-9. Comparación de resultados de laboratorio y según los modelos propuestos

Cuadro 10-17. Comparación de resultados de laboratorio y según los modelos propuestos

Mes	Mr mensual (MPa) Cary y Zapata	Mr mensual (MPa) MEPGD	Módulo Resiliente 1 (MPa)	Módulo Resiliente 2 (MPa)	Módulo Resiliente Promedio (MPa)
Enero	46.8	31.3	9.3	18.0	13.6
Febrero	43.3	30.2	17.6	21.4	19.5
Marzo	36.2	27.8	20.1		20.1
Abril	34.1	27.0	10.7	2.7	6.7
Mayo	35.4	27.5	37.4	30.9	34.2
Junio	36.7	28.0	41.7	23.7	32.7
Julio	35.5	27.5	16.3	21.2	18.8
Agosto	43.3	30.2	17.2	18.7	18.0
Setiembre	46.8	31.3	21.5	16.8	19.1
Octubre	34.8	27.2	22.4	22.1	22.2
Noviembre	34.4	27.1	20.8	24.6	22.7
Diciembre	37.5	28.3	26.1	23.9	25.0

Cabe destacar que los valores obtenidos por medio de los ensayos muestran variaciones mes a mes, lo cual indica que la aplicación de un modelo que considere los efectos climáticos en el cálculo el módulo resiliente es necesario.

El valor promedio anual del módulo resiliente obtenido por medio de ensayos es de 22,4 MPa, descartando el valor obtenido en el mes de abril, el cual se considera una anomalía u *outlier*.

Debe considerarse que tanto los modelos de Cary y Zapata como el modelo propuesto en la guía de diseño de pavimentos flexibles MEPDG fueron realizados en base a suelos parcialmente saturados, mientras que los suelos ensayados presentaron una condición sobresaturada, lo cual es una limitación del estudio.

11 ANALISIS DE RESULTADOS

11.1 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO PARA LOS SUELOS BLANDOS DE BOGOTÁ

Como parte de la investigación, se obtuvieron los valores del modelo de Cary y Zapata, basado en los resultados climáticos y las propiedades de los suelos utilizados a lo largo de la investigación.

Cabe resaltar que a mayor índice TMI, se tendrá una menor succión y por ende una mayor saturación estimada, lo cual tiene sentido con la definición del índice de Thornthwaite, el cual establece que una región con un índice mayor será más húmeda. Una saturación mayor. Al ser la humedad óptima del suelo tan alta (33%), la saturación óptima del suelo es muy alta (96%), esto hace que la saturación estimada mensual nunca supere a la saturación óptima. Esta estimación debe considerarse que es realizada para suelos no saturados, mientras que los suelos estudiados presentaron una condición sobresaturada, tal como se pudo apreciar en las humedades in situ.

El modelo de Cary y Zapata considera que, si un suelo presenta una saturación por debajo de su saturación óptima, su factor ambiental será mayor a 1, es decir, el suelo experimentará una mayor resistencia comparada con la resistencia a la humedad óptima.

Esto quiere decir que, a mayor saturación, menor módulo resiliente. Este patrón no se encontró en todos los meses del estudio. Esta tendencia no fue encontrada en todos los ensayos realizados, lo cual imposibilita que la convergencia al calcular los parámetros del modelo de Cary y Zapata. Se separó el mes de abril del estudio debido a que es una anomalía en los resultados.

Se utilizó la herramienta Solver, incluida en el paquete computacional Microsoft Office Excel, la cual es una herramienta de optimización no lineal con el propósito de encontrar los parámetros. Se aproximó el error cuadrado lo mayor posible a cero, el error cuadrado es calculado como la diferencia al cuadrado del módulo resiliente obtenido con los ensayos y el valor estimado utilizando los parámetros a, b y km.

Los valores obtenidos para los suelos de Bogotá estudiados son: $a=1,9896$; $b=-1,0987$ y $km=2,6552$. Para poder tener una mayor confiabilidad en el modelo obtenido, se recomienda realizar más ensayos y verificar que los valores tengan sentido con el comportamiento esperado.

11.2 MÓDULO RESILIENTE DE DISEÑO

Se realizó la estimación del módulo resiliente de diseño según la guía de diseño de pavimentos de bajo volumen de Colombia, el cual se basa en estimar el daño relativo para cada mes, posteriormente se promedian los daños relativos y finalmente se retrocálcula el módulo resiliente. Los módulos resilientes fueron obtenidos al aplicar los modelos de estimación del módulo resiliente con factores ambientales, utilizando las fórmulas propuestas por Cary y Zapata y por la guía de diseño de pavimentos mecánica empírica de los Estados Unidos (MEPDG).

De igual manera se estima un módulo resiliente de diseño basado en los resultados obtenidos de módulo resiliente de laboratorio.

El método de estimación del módulo resiliente de diseño es explicado a detalle en los capítulos anteriores. El Cuadro 11-1 presenta los resultados del daño relativo obtenido de acuerdo con los distintos métodos considerados.

Cuadro 11-1. Daño relativo según diversos métodos

Mes	Daño relativo MEPDG	Daño relativo Cary Zapata	Daño relativo Módulo Resiliente Laboratorio
Enero	0.39	0.15	2.67
Febrero	0.42	0.18	1.16
Marzo	0.51	0.28	1.08
Abril	0.55	0.32	13.88
Mayo	0.52	0.29	0.32
Junio	0.50	0.27	0.35
Julio	0.52	0.29	1.26
Agosto	0.42	0.18	1.40
Setiembre	0.39	0.15	1.21
Octubre	0.53	0.30	0.86
Noviembre	0.54	0.31	0.81
Diciembre	0.49	0.25	0.65
Daño Relativo promedio	0.48	0.25	2.14
Módulo resiliente de diseño, MPa	28.48	37.91	20,19*

*Se descartó el mes de abril para el cálculo debido a que el daño relativo obtenido para este mes no es representativo de las condiciones naturales de un suelo (Daño relativo mayor a 10).

Al igual que en las demás comparaciones de los módulos resilientes, se puede observar que el módulo resiliente de diseño obtenido con los módulos resilientes estimados por medio de factores ambientales basados en los coeficientes de Cary y Zapata son mayores

y más variables, lo cual se alinea con la teoría, pues estos modelos consideran las propiedades del suelo y al ser los suelos estudiados materiales altamente susceptibles a los cambios de humedad (suelos arcillosos cohesivos), es razonable que las estimaciones consideren una mayor variación.

El módulo resiliente de diseño utilizando el valor obtenido por medio de las correlaciones con el CBR son, 27,45 MPa con el modelo expuesto en la Ecuación 10 y 20,68 MPa al utilizar la fórmula mostrada en la Ecuación 11.

Considerando que el módulo resiliente de diseño más aproximado a las condiciones reales de campo es el valor calculado al realizar los ensayos de laboratorio de cálculo directo del módulo resiliente, se puede deducir que el método de estimación que se aproxima más al valor real de módulo resiliente de diseño es el obtenido por medio de la correlación del CBR con el módulo resiliente expuesta en la Ecuación 11.

11.3 DISEÑO DE PAVIMENTOS

Se realizó el diseño de pavimentos utilizando el modelo de AASHTO 93 y su posterior revisión con los modelos de la guía MEPDG con tal de observar las diferencias en espesor resultantes de considerar el módulo resiliente estimado de la subrasante con cada uno de los modelos.

Se consideraron cuatro niveles de tráfico (500 mil, un millón, cinco y diez millones de ejes equivalentes de carga, una carpeta asfáltica MDC 25 (coeficientes de la curva maestra: $\alpha = 5,566$, $\beta = -1,864$, $\gamma = 0,241$, $\delta = 1,034$, $c = 1,810$, $A = 10,2$ y $VTS = -3,399$), una base granular con módulo resiliente de 206,8 MPa, el espesor de la base granular se consideró constante para cada uno de los niveles de tráfico para los distintos valores utilizados de módulo resiliente de la subrasante y se varia el espesor de la carpeta asfáltica para efectos de la comparación.

La temperatura promedio utilizada en el diseño es de 14,3°C, obtenida de los datos climáticos de Bogotá obtenidos del IDEAM. El módulo dinámico obtenido para una velocidad de diseño de 40 km/h es dependiente del espesor de la carpeta asfáltica. Los módulos dinámicos utilizados varían en los rangos de 1 006 469 psi a 1 018 856 psi. Se utilizan los modelos de Barksdale para estimar la frecuencia asociada a dicha velocidad.

Cabe destacar que con valores tan bajos de módulo resiliente de subrasante el suelo se modificaría o sustituiría, tal como se discutió previamente; sin embargo, en aras de poder realizar la comparación, se considerará que la estructura del pavimento será construida sobre dicha subrasante.

Para el tránsito 500 mil y un millón de ESAL se consideró 15 cm de base y 20 de subbase. Para el tráfico de cinco millones de ESAL se consideró una base de 20 cm y una subbase de 20 cm, mientras que para el tráfico de 10 millones se consideró una base de 20 cm y una subbase de 25 cm. Todas las estructuras consideradas para cada nivel de tráfico tienen la misma base y subbase con el fin de poder comparar el espesor necesario de carpeta asfáltica.

Cuadro 11-2. Espesores de carpeta asfáltica de diseño para cada módulo resiliente de subrasante

Método de cálculo del Módulo Resiliente	Módulo Resiliente, Mpa	Espesor carpeta asfáltica, cm			
		500k ESAL	1M ESAL	5M ESAL	10M ESAL
1500CBR	20.68	17	20	25	27
2555CBR ^{0.64}	27.45	14	17	22	24
$M_{r_{diseño}}$ MEPDG	28.48	14	17	22	24
$M_{r_{diseño}}$ Cary y Zapata	37.91	12	14	19	21
$M_{r_{min}}$ laboratorio	13.6	21	24	30	32
$M_{r_{max}}$ laboratorio	34.2	13	17	20	22
$M_{r_{promedio}}$ laboratorio	22.4	16	19	24	26
$M_{r_{diseño}}$ laboratorio	20.19	17	20	25	27

Como se puede apreciar, utilizar el valor de ensayo de módulo resiliente de un mes aleatorio puede causar un sobre diseño, como se aprecia en el caso del valor de módulo resiliente mínimo de laboratorio. Es por estas razones que es importante utilizar estos modelos que brindan un resultado más representativo de las posibles condiciones que se tendrán en campo.

Los espesores de carpeta asfáltica menores se obtienen en el caso en que se obtiene el modelo de diseño basado en los valores de módulo resiliente mensuales producto de los modelos de Cary y Zapata. Esto significa que utilizar estos modelos, siendo previamente calibrados para las condiciones de Bogotá pueden ahorrar costos importantes en la obra, sustentando que en el campo se tendrán módulos resilientes mayores a los esperados.

Es importante recalcar que los resultados de espesor de carpeta asfáltica obtenidos con los modelos de Cary y Zapata no se alejan considerablemente de los valores obtenidos con las correlaciones o los valores promedio o máximo de laboratorio, lo cual es un indicativo de que estos modelos se encuentran en rangos similares, sin embargo, con una precisión aparentemente mejor a la hora de evaluar las condiciones reales en campo.

12 LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

Debe considerarse que los resultados de laboratorio pueden presentar anomalías y/o errores humanos, además de que las condiciones de las muestras pueden perjudicar la precisión de los resultados, lo cual puede obtenerse resultados que no representan completamente las condiciones reales que se tendrían a la hora de construir la carretera.

Por otra parte, cuando se está trabajando con suelos que presentan módulos resilientes muy bajos, en la práctica de la ingeniería civil de carreteras se procede a sustituir un espesor del suelo, se realiza un mejoramiento del suelo, se conduce una estabilización química o mecánica, además de realizar drenajes para evitar la sobresaturación del suelo, puesto que esto puede producir posteriores daños en el pavimento debido a cambios de humedad. Cuando los suelos presentan una baja resistencia, los módulos resilientes de diseño se modifican con modelos como el de Ivanov, cuando se realiza una sustitución de suelo, con el modelo de Giroud-Han, si geosintéticos son utilizados para la estabilización, o el valor recomendado por los análisis geotécnicos si se realiza una estabilización del suelo. Estos resultados emulan el valor del módulo resiliente del suelo considerando la modificación aplica al suelo. Es por este motivo que los resultados de módulo resiliente obtenidos si son muy bajos, en la práctica ingenieril puede darse el caso de que no sean utilizados debido a que el suelo es modificado o mejorado.

Los suelos estudiados presentaron una condición sobresaturada, mientras que los estudios utilizados para desarrollar los modelos de curvas suelo agua (SWCC) y de afectación climática se basan en suelos parcialmente saturados. Esta diferencia puede afectar las estimaciones al utilizar los modelos de afectación climática puesto que diferentes comportamientos en la composición del suelo pueden presentarse al estar en una condición sobresaturada.

Es importante mencionar que los resultados de los coeficientes calculados para el modelo de afectación climática estimados a partir de los resultados de módulo resiliente y las condiciones climáticas de Bogotá son aplicables única y exclusivamente a los suelos estudiados en esta investigación. Con el propósito de obtener coeficientes que apliquen para todos los suelos de Bogotá, es necesario ampliar el alcance de la investigación y realizar los ensayos a una cantidad de muestras que sean representativas de todos los suelos posiblemente en Bogotá.

Cabe recalcar que es recomendable, con tal de tener una mejor estimación en los resultados, que se realicen todos los ensayos necesarios y no basar resultados en estimaciones. Por ejemplo, los coeficientes de la curva suelo agua fueron estimados mediante correlaciones con propiedades físicas de los suelos estudiados. Sin embargo, este tipo de ensayos en ocasiones no están disponibles en los laboratorios de Bogotá, son muy costosos o no hay técnicos que tengan conocimiento de los lineamientos para realizar los procedimientos. La investigación fue realizada realizando la mayor cantidad de ensayos posibles dadas las condiciones del conocimiento actual en materia de ensayos de laboratorio para suelos en Bogotá.

En la práctica no se utilizan espesores en diferencias de 1 cm, sin embargo, con propósitos de comparación en esta investigación se diseñó con espesores en intervalos de 1 cm.

13 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del estudio son las siguientes:

- Los modelos propuestos por Cary y Zapata tienden a ser más exactos en cuanto a estimar las condiciones reales del suelo puesto que consideran aparte de las condiciones climáticas de la región, las propiedades físicas del suelo estudiado.
- Para poder utilizar los modelos de afectación del módulo resiliente por variación climática, es necesario conocer los valores de la curva suelo agua del suelo en estudio. Estos valores pueden obtenerse por medio de correlaciones, sin embargo, para futuras investigaciones, es recomendable obtener valores representativos de suelos colombianos.
- Como se pudo observar con los ensayos de laboratorio, el valor de módulo resiliente de los suelos de subrasante es altamente influenciado por las variaciones de humedad en el suelo.
- Los suelos estudiados presentaron una condición sobresaturada, esto es una limitación del estudio, puesto que los modelos fueron planteados para suelos en condición parcialmente saturada.
- El uso de modelos que consideren la variación climática del módulo resiliente son de gran importancia, puesto que si se realiza un ensayo de laboratorio para determinar el módulo resiliente del suelo, puede ser que se obtenga un valor muy bajo o muy alto que no representa las condiciones promedio que se espera tener en el suelo a lo largo del año, llevando a que se sobrediseñe o se subdiseñe la estructura.
- Se determinaron los parámetros del modelo de Cary y Zapata para el suelo de Bogotá con los resultados de los ensayos de laboratorio.
- Se realizó una revisión bibliográfica de los modelos propuesto por Cary y Zapata y por MEPDG para modificar el módulo resiliente según las condiciones climáticas.
- Se realizó una revisión literaria de los modelos de diseño de pavimentos empíricos y mecanístico empíricos con tal de evaluar el efecto en el diseño de pavimentos del uso de modelos de variación climática del módulo resiliente.
- Se realizaron ensayos de CBR, contenido de humedad, módulo resiliente por el método triaxial, ensayo de límite líquido y plástico, ensayo de gravedad específica y ensayo Proctor modificado.

- Se recopiló la información climática de Bogotá con datos del IDEAM. Se utilizaron 282 estaciones con información de precipitación y temperatura.
- Se calculó el índice de Thornthwaite de Bogotá con los dos métodos existentes, siendo más representativo de las condiciones reales de Bogotá el modelo simplificado, obteniendo como resultado que Bogotá es una región de clima templado y según el índice de Thornthwaite como una región B3, húmeda, con lluvia moderada o lluvia fuertemente estacional, debido a su índice de Thornthwaite promedio anual de 62,03.
- Se utilizó el modelo de correlación del índice de Thornthwaite con la succión del suelo para determinar la succión mensual.
- Se obtuvo la saturación mensual al correlacionar la succión mensual con la saturación por medio de la curva suelo agua (SWCC) del suelo en estudio.
- Se estimó el módulo resiliente mensual por medio de los modelos de Cary y Zapata y el MEPDG, al correlacionar la saturación con un factor ambiental que modifica el valor de módulo resiliente óptimo
- Se utilizó el modelo propuesto en la guía AASHTO 93 para determinar el daño relativo mensual y así obtener un modelo resiliente de diseño basado en los resultados obtenidos con el modelo de Cary y Zapata, la guía MEPDG y con los resultados de módulo resiliente mensual obtenidos de laboratorio.
- Se utilizó la guía AASHTO 93 y la guía de diseño mecánico empírica MEPDG para diseñar las estructuras con cada uno de los módulos resilientes de la subrasante considerados.
- Se obtuvo una importante variación del espesor de carpeta asfáltica al evaluar los diferentes valores de módulo resiliente de la subrasante.

14 BIBLIOGRAFÍA

- Austrroads Ltd . (Febrero de 2012). *Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design*. Recuperado el 4 de Febrero de 2014, de Austrroads Publications Online: <https://www.onlinepublications.austrroads.com.au/items/AGPT02-12>
- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington DC: AASHTO.
- Alfaro, M. (Diciembre de 2008). Geotécnia en suelos no saturados. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 32(125), 471-481.
- Cary, C., & Zapata, C. (2010). *Enhancement of the Model for Resilient Response of Soils Due to Seasonal Environmental Changes Implemented in the M-EPDG*.
- Corredor, G. (2010). *Experimento Vial de la AASHO y las Guías de Diseño AASHTO*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*.
- de Proença Franco, F. A. (2007). *Método de Dimensionamiento Mecánico - Empírico de Pavimentos Asfálticos-SISPAV*. Rio de Janeiro: Tesis de Doctorado Universidad Federal De Rio de Janeiro.
- Fredlund, D., & Xing, A. (1994). *Equation for the Soil-Water Characteristic Curve*.
- Garnica, P., & Barrera, M. (2002). *Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres*. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de comunicaciones y transporte. Recuperado el 10 de Enero de 2014, de www.imt.mx
- Hajj, E. Y., Stolte, S., Thavathurairaja, J., Sebaaly, P. E., & Piratheepan, M. (2018). *Evaluation of Soil Water Characteristic Curves (SWCC) in Pavement ME for Nevada's Unbound Materials*. Reno, NV: University of Nevada, Reno.
- Instituto Nacional de Vías. (2012). *Modulo Resilente de Suelos de Subrasante I.N.V.E -157-07*. Bogotá: Invías.
- Instituto Nacional de Vías. (2019). *Determinacion del Limite Liquido de los Suelos*.
- Instituto Nacional de Vías. (2019). *Limite Plastico e Indice de Plasticidad de Suelos*.
- Instituto Nacional de Vías. (2019). *Relaciones de Humedad- Masa Unitaria Seca en los Suelos*.

- Instituto Nacional de Vias. (s.f.). *Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado*.
- Leah, J. D. (2019). *OpenPave*. Obtenido de OpenPave.org Open Source Pavement Engineering: openpave.org
- Matiz Flórez, N. O. (2015). *Aplicación de la guía de diseño mecánico-empírico de pavimentos diseñada por la AASHTO, una opción de crecimiento para Colombia*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Mena, W. (2013). *Implementación del Modelo Climático de la MEPDG "AASHTO 2008" en Colombia para tres condiciones climáticas*. Tesis de Maestría en Ingeniería, Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería, Medellín. Recuperado el 12 de Marzo de 2014, de <http://repository.eafit.edu.co>
- Mena, W. B. (2013). *Implementación del Modelo Climático de la MEPDG "AASHTO 2008" en Colombia para tres condiciones climáticas*. Tesis de Maestría en Ingeniería, Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería, Medellín. Recuperado el 12 de Marzo de 2014, de <http://repository.eafit.edu.co>
- Montejo, A. (2006). *Ingeniería de Pavimentos*. Bogotá.
- Montenegro, C., & Wahr, C. (2007). Comparación de diseños de pavimentos flexibles nuevos según el método de diseño AASHTO 93, la Normativa Chilena vigente y la guía de diseño de pavimentos empírico-mecánica NCHRP 1-37A. *Infraestructural Vial*, 19(18), 30-37.
- National Cooperative Highway Research Program. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Part 2. Design Inputs. Chapter 3. Environmental Effects*. Champaign: Transportation Research Board.
- National Cooperative Highway Research Program. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Part 2. Design Inputs. Chapter 2. Material Characterization*. Champaign, IL: Transportation Research Board.
- National Cooperative Highway Research Program. (2006). *Environmental Effects in Pavement Mix and Structural Design Systems. NCHRP 9-23*. Arizona: Transportation Research Board.
- NCHRP. (2012). *Método estándar para ensayo de módulo de resiliencia (NCHRP 1-28A)*. Washington: Transportation Research Board.

- Ochoa Meza, V. E. (2012). Suelos Parcialmente Saturados, De la Investigación a la Cátedra Universitaria. *Boletín Ciencia de la Tierra*.
- Papagiannakis, A., & Masad, E. (2008). *Pavement Design and Materials*. New Jersey: Wiley.
- Sahin, H., Gu, F., & Lytton, R. (2014). Development of Soil-Water Characteristic Curve for Flexible Base Materials Using the Methylene Blue Test. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Torres, G. (2011). *Estimating the Soil-Water Characteristic Curve Using Grain Size Analysis and Plasticity Index*.
- Vásquez, L. R. (2013). *Método empírico-mecanicista aplicado al diseño de pavimentos nuevos flexibles*. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil, Manizales. Recuperado el 20 de Febrero de 2014, de <https://sites.google.com/site/ingepav/Home>
- Witczak, M., Zapata, C., & Houston, W. (2006). *NCHRP 1-40D FINAL REPORT: Models Incorporated into Integrated Climatic Model for use in Version 1.0 of MEPDG*. Ira A. Fulton School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona.
- Witczak, M., Zapata, C., & Houston, W. (2006). *NCHRP 1-40D FINAL REPORT: Models Incorporated into Integrated Climatic Model for use in Version 1.0 of MEPDG*. Ira A. Fulton School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona.
- Zapata, C. E. (2012). *Environmental Effects on Material Stiffness*. Arizona: Arizona State University.
- Zárate, M. (2003). *Diseño de Pavimentos Flexibles* (Primera ed., Vols. I-II). Mexico, D.F.: Gráfica, Creatividad y Diseño, S.A.
- Zhai, Q., & Rahardjo, H. (2012). *Determination of Soil-Water Characteristic Curve Variables*.

APÉNDICE A

A continuación, se muestran los datos del ensayo de módulo resiliente.

Cuadro 0-1. Diámetro y altura de las muestras ensayadas

Mes	Diámetro, mm		Altura, mm	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Enero	149.67	148.6175	73.0775	72.575
Febrero	150.8575	148.085	72.925	72.815
Marzo	146.2925		72.925	
Abril	147.8675	144.7575	72.605	72.62
Mayo	140.2625	145.5475	70.18	73.2425
Junio	147.4	151.4525	72.8225	72.8625
Julio	145.4725	146.0575	72.915	73.3175
Agosto	146.185	145.88	72.9275	73.2175
Setiembre	148.15	146.3875	72.7775	72.87
Octubre	147.94	148.02	72.8525	72.9925
Noviembre	146.9275	146.79	72.8025	73.045
Diciembre	154.3075	147.915	72.8375	72.8275

Cuadro 0-2. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de mayo 2018

Ciclo	Esfuerzo desviador máximo [KPa]		Esfuerzo de confinamiento [KPa]		Módulo resiliente [MPa]	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
0	55.1	54.4	29.1	28.8	31.3	27.1
1	41.9	46.8	55.6	55.3	31.7	29.5
2	40.8	43.9	41.3	41.3	31.6	31.4
3	34.2	38.4	27.6	27.6	30.1	27.7
4	32.6	31.7	13.9	13.9	30.7	27.3
5	57.8	62.9	55.9	57.6	29.3	26.7
6	57.5	59.2	41.3	41.3	31.4	29.5
7	53.6	52.8	27.6	27.6	30.7	29.1
8	52.0	45.9	13.9	13.9	32.7	28.0
9	78.3	79.8	57.6	57.3	28.1	26.5
10	77.2	77.5	41.3	41.3	29.3	26.7
11	74.5	72.0	27.6	27.6	30.3	26.2
12	68.5	67.1	14.0	13.9	29.3	24.2
13	108.1	113.7	57.2	56.9	22.5	23.9
14	107.8	95.1	41.3	41.3	23.2	19.6
15	98.0	95.5	27.6	27.6	24.6	20.6
16	94.1		13.9		25.4	

Cuadro 0-3. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de junio 2018

Ciclo	Esfuerzo desviador máximo [kPa]		Esfuerzo de confinamiento [kPa]		Módulo resiliente [Mpa]	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
0	49.8	52.0	27.6	28.1	25.3	11.7
1	41.7	42.1	54.7	54.5	35.8	13.0
2	38.7	37.6	41.4	41.3	34.4	13.2
3	36.0	33.1	27.5	27.6	30.5	12.8
4	34.5	30.0	13.9	13.9	23.2	14.3
5	63.2	63.1	55.0	54.9	24.6	12.4
6	60.6	57.3	41.3	41.3	25.9	13.5
7	55.1	49.1	27.5	27.6	26.7	12.2
8	50.5	42.8	13.9	13.9	25.5	12.1
9	84.6	80.9	55.1	55.5	24.2	12.6
10	78.5	71.7	41.1	41.3	23.9	11.1
11	71.4	74.7	27.6	27.6	22.2	11.5
12	67.8	67.1	14.0	13.9	20.7	11.3
13	108.4	82.7	55.4	55.1	19.4	6.7
14	95.9		41.2		16.2	
15	95.6		27.6		11.1	

Cuadro 0-4. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de julio 2018

Ciclo	Esfuerzo desviador máximo [kPa]		Esfuerzo de confinamiento [kPa]		Módulo resiliente [Mpa]	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
0	53.0	49.3	27.1	28.1	14.3	8.4
1	43.0	42.6	54.3	54.5	16.6	9.6
2	41.8	39.8	41.3	41.3	15.9	10.4
3	36.6	32.8	27.5	27.6	14.8	10.4
4	29.7	28.8	13.8	14.0	14.3	11.0
5	65.5	60.6	54.5	55.0	14.8	10.1
6	59.6	56.2	41.3	41.3	14.2	9.5
7	54.2	51.0	27.5	27.6	13.1	9.2
8	46.9	39.4	13.9	13.9	12.6	7.6
9	78.6	70.8	54.6	55.5	11.3	8.9
10	74.6		41.3		10.0	
11	69.8		27.5		9.6	
12	66.8		13.9		11.1	
13	94.7		54.8		7.0	

Cuadro 0-5. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de agosto 2018

Ciclo	Esfuerzo desviador máximo [kPa]		Esfuerzo de confinamiento [kPa]		Módulo resiliente [Mpa]	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
0	47.8	53.0	26.9	27.1	10.0	11.8
1	42.4	43.0	54.3	54.3	10.9	6.1
2	39.8	41.8	41.3	41.3	10.8	18.6
3	32.0	36.6	27.4	27.5	10.3	19.8
4	27.1	29.7	13.8	13.8	10.1	15.4
5	60.7	65.5	54.4	54.5	9.8	19.1
6	52.7	59.6	41.3	41.3	9.2	18.5
7	51.8	54.2	27.5	27.5	11.0	18.0
8	46.6	46.9	13.9	13.9	11.3	17.7
9	63.3	78.6	54.8	54.6	8.2	16.4
10		74.6		41.3		14.6
11		69.8		27.5		14.0
12		66.8		13.9		16.1
13		94.7		54.8		10.2

Cuadro 0-6. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de setiembre 2018

Ciclo	Esfuerzo desviador máximo [kPa]		Esfuerzo de confinamiento [kPa]		Módulo resiliente [Mpa]	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
0	51.1	47.8	26.8	26.8	10.6	8.0
1	40.4	43.1	54.1	54.4	12.2	10.4
2	35.8	37.3	41.5	41.2	12.0	10.1
3	31.5	31.2	27.5	27.5	12.3	10.1
4	25.2	26.5	13.9	13.8	11.0	9.6
5	63.9	56.9	54.2	54.7	11.3	8.2
6	56.9	51.8	41.5	41.3	10.7	7.9
7	52.7	48.9	27.5	27.5	10.8	8.0
8	45.2	42.9	13.8	13.8	10.0	7.5
9	70.1	66.3	54.6	54.3	8.8	7.0
10	63.4		41.3		7.9	
11	58.1		27.5		7.7	
12	64.4		13.8		9.2	
13	72.5		54.5		6.0	

Cuadro 0-7. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de octubre 2018

Ciclo	Esfuerzo desviador máximo [kPa]		Esfuerzo de confinamiento [kPa]		Módulo resiliente [Mpa]	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
0	54.6	48.5	26.7	27.0	10.5	10.2
1	42.3	40.6	54.5	54.1	11.6	12.1
2	38.2	36.0	41.1	41.3	11.8	12.1
3	33.1	30.8	27.5	27.5	11.8	12.4
4	28.4	25.7	13.7	13.9	11.6	11.9
5	54.5	56.1	54.4	54.4	9.9	10.3
6	51.0	52.0	41.4	41.3	9.8	9.9
7	46.2	50.1	27.4	27.5	9.6	10.5
8	41.3	43.8	13.7	13.9	9.4	9.9
9	68.5	70.8	54.6	54.8	8.9	9.4
10	65.4	63.5	41.3	41.2	8.2	8.5
11	59.5	58.4	27.5	27.5	7.7	8.1
12	57.9	65.6	13.8	13.9	7.9	9.6
13	75.2	74.0	54.6	54.5	5.7	6.2

Cuadro 0-8. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de noviembre 2018

Ciclo	Esfuerzo desviador máximo [kPa]		Esfuerzo de confinamiento [kPa]		Módulo resiliente [Mpa]	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
0	46.6	49.0	26.9	27.6	10.7	11.0
1	39.7	41.2	54.4	54.4	12.8	13.1
2	34.8	36.7	41.3	41.2	13.3	13.4
3	29.9	31.9	27.5	27.5	14.0	13.7
4	25.0	26.2	13.8	14.0	14.4	13.3
5	55.4	57.5	54.4	54.7	10.8	10.9
6	50.5	53.1	41.2	41.3	10.9	10.7
7	45.7	48.0	27.5	27.7	10.9	10.7
8	41.2	45.1	13.8	14.0	10.9	11.0
9	68.1	69.3	54.6	54.9	8.9	8.7
10	63.2	65.3	41.3	41.4	9.0	8.5
11	60.5	60.7	27.5	27.6	9.2	8.4
12	59.1	70.2	13.8	13.9	13.0	10.0
13	92.6	82.3	54.5	54.5	11.3	7.2
14		84.3		41.3		7.8
15		75.9		27.6		7.4
16		80.4		14.0		8.6

Cuadro 0-9. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de diciembre 2018

Ciclo	Esfuerzo desviador máximo [kPa]		Esfuerzo de confinamiento [kPa]		Módulo resiliente [Mpa]	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
0	43.5	48.9	27.6	27.0	8.7	10.4
1	38.3	40.9	54.3	54.4	10.6	12.4
2	34.0	36.8	41.4	41.3	11.2	12.8
3	30.1	32.4	27.6	27.6	12.2	12.8
4	25.4	27.5	14.0	13.9	12.8	12.8
5	49.9	57.2	54.7	54.7	8.2	10.4
6	46.7	52.9	41.3	41.3	8.4	10.3
7	42.7	46.8	27.6	27.5	8.7	10.1
8	41.4	42.6	14.0	13.9	9.0	10.1
9	59.6	65.5	54.6	54.7	7.0	8.3
10	56.4	62.3	41.4	41.4	7.2	7.9
11		59.0		27.5		8.0
12		58.1		13.8		8.5
13		77.7		54.4		7.1

Cuadro 0-10. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de enero 2019

Ciclo	Esfuerzo desviador máximo [kPa]		Esfuerzo de confinamiento [kPa]		Módulo resiliente [Mpa]	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
0	46.6	47.2	26.9	26.9	10.3	9.8
1	40.0	38.9	54.4	54.2	12.4	11.5
2	35.3	35.1	41.1	41.4	12.8	12.2
3	30.5	29.8	27.6	27.6	13.2	12.3
4	25.7	25.2	13.9	13.9	13.2	12.4
5	55.3	53.5	54.6	54.9	10.5	9.6
6	50.4	48.2	41.4	41.4	10.2	9.3
7	45.5	44.5	27.6	27.6	10.2	9.4
8	41.1	39.7	14.0	14.0	10.2	9.2
9	69.4	81.0	54.8	54.4	9.5	11.8
10	66.1	67.5	41.2	41.4	9.8	10.9
11		62.8		27.5		10.8
12		58.5		14.0		10.8
13		72.2		54.4		6.9

Cuadro 0-11. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de febrero 2019

Ciclo	Esfuerzo desviador máximo [kPa]		Esfuerzo de confinamiento [kPa]		Módulo resiliente [Mpa]	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
0	44.1	48.8	27.7	27.1	7.3	13.2
1	40.4	31.1	54.1	54.5	8.7	15.9
2	35.5	28.9	41.4	41.2	9.0	16.3
3	33.0	26.3	27.6	27.5	10.6	15.6
4	26.2	23.6	14.0	13.9	10.8	14.1
5	52.6	48.0	54.5	54.7	6.9	12.2
6	48.1	49.4	41.2	41.4	6.9	13.4
7	44.6	42.8	27.6	27.6	7.2	11.7
8	50.0	44.5	13.9	13.8	8.7	12.4
9	59.8	73.6	54.7	54.4	6.0	12.3
10		62.3		41.2		11.4
11		67.0		27.5		12.6
12		61.3		13.8		11.7
13		82.2		54.4		9.7

Cuadro 0-12. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de marzo 2019

Ciclo	Esfuerzo desviador máximo [kPa]	Esfuerzo de confinamiento [kPa]	Módulo resiliente [Mpa]
0	47.1	27.2	17.2
1	32.6	54.5	22.0
2	30.1	41.5	21.9
3	27.2	27.6	20.8
4	24.4	14.0	20.1
5	53.5	54.5	18.6
6	48.0	41.4	17.0
7	45.0	27.6	16.5
8	43.6	14.0	16.7
9	81.2	54.4	17.9
10	64.0	41.4	14.3
11	63.9	27.5	14.8
12	59.0	14.0	14.6
13	89.3	55.0	13.2
14	86.8	41.3	12.7
15	82.9	27.6	13.3
16	84.7	14.0	12.0

Cuadro 0-13. Valores del ensayo de módulo resiliente para el mes de abril 2019

Ciclo	Esfuerzo desviador máximo [kPa]		Esfuerzo de confinamiento [kPa]		Módulo resiliente [Mpa]	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
0	21.9	24.8	42.4	40.8	21.7	19.4
1	11.9	11.3	41.4	41.5	13.9	18.6
2	24.7	22.6	41.3	41.1	16.6	20.4
3	35.0	37.5	41.3	41.6	20.2	21.7
4	42.3	52.3	41.3	41.5	15.8	23.6
5	48.9	62.0	41.3	41.3	13.4	24.2
6	9.2	11.5	27.6	27.6	15.7	23.9
7	23.7	23.1	27.5	27.4	24.6	24.9
8	35.7	35.7	27.5	27.6	24.5	26.7
9	47.2	50.3	27.5	27.4	22.8	31.2
10	57.8	60.4	27.5	27.5	20.8	29.6
11	11.5	9.9	13.8	14.0	12.4	24.0
12	23.9	22.7	13.7	13.7	16.6	26.8
13	38.4	36.4	13.7	13.7	19.0	30.1
14	41.2	46.3	13.7	13.7	15.4	27.8
15	52.6	59.2	13.7	13.7	14.3	27.7

APÉNDICE B

Se muestra el código VBA utilizado en el modelado.

```
Public Function k1k2k3(k() As Double) As Boolean
```

```
    Dim i As Integer, j As Integer
```

```
    Dim conf(16) As Double, desv(16) As Double, Mr(16) As Double
```

```
    Dim theta(16) As Double, oct(16) As Double
```

```
    Dim logtheta(16) As Double, logoct(16) As Double, logMr(1 To 17, 1 To 1) As Double
```

```
    Dim pa As Double
```

```
    Dim x(16, 1 To 3) As Double, Xtrans(1 To 3, 16) As Double, B As Variant, xtransporx As Variant, inverse As Variant, inverseporxtrans As Variant
```

```
    pa = 101.3 'KPa presion atmosferica
```

```
    For j = 0 To 16
```

```
        If Val(Worksheets("Datos").Cells(59, j + 2)) > 0 Then
```

```
            conf(j) = Val(Worksheets("Datos").Cells(59, j + 2))
```

```
            desv(j) = Val(Worksheets("Datos").Cells(58, j + 2))
```

```
            Mr(j) = Val(Worksheets("Datos").Cells(64, j + 2))
```

```
            theta(j) = 3 * conf(j) + desv(j)
```

```
            oct(j) = (2) ^ 0.5 / 3 * desv(j)
```

```
            logtheta(j) = Log(theta(j) / pa)
```

```
            logoct(j) = Log(oct(j) / pa + 1)
```

```
            logMr(j + 1, 1) = Log(Mr(j))
```

```
            x(j, 1) = 1
```

```
            Xtrans(1, j) = x(j, 1)
```

```
            x(j, 2) = logtheta(j)
```

```
            Xtrans(2, j) = x(j, 2)
```

```
x(j, 3) = logoct(j)
Xtrans(3, j) = x(j, 3)
```

```
Else
```

```
logtheta(j) = 0
logoct(j) = 0
logMr(j + 1, 1) = 0
x(j, 1) = 0
Xtrans(1, j) = x(j, 1)
x(j, 2) = logtheta(j)
Xtrans(2, j) = x(j, 2)
x(j, 3) = logoct(j)
Xtrans(3, j) = x(j, 3)
```

```
End If
```

```
Next j
```

```
xtransporx = WorksheetFunction.MMult(Xtrans, x)
inverse = WorksheetFunction.MInverse(xtransporx)
inverseporxtrans = WorksheetFunction.MMult(inverse, Xtrans)
B = WorksheetFunction.MMult(inverseporxtrans, logMr)
```

```
k(1) = Exp(B(1, 1)) / pa
```

```
k(2) = B(2, 1)
```

```
k(3) = B(3, 1)
```

```
k1k2k3 = True
```

```
End Function
```

```

Public Function octaedrico(invariante As Double, tao As Double) As Double

    Dim k1 As Double, k2 As Double, k3 As Double, pa As Double

    pa = 101.3

    k1 = Worksheets("Analisis").Range("A3").Value
    k2 = Worksheets("Analisis").Range("b3").Value
    k3 = Worksheets("Analisis").Range("c3").Value

    octaedrico = k1 * pa * (Abs(invariante) / pa) ^ k2 * (Abs(tao) / pa + 1) ^ k3

End Function

Option Explicit

Public Updating As Boolean, Calculating As Boolean

Public Cursor As String

#If Win32 Or Win64 Then

    Private Declare PtrSafe Function SetCurrentDirectoryA Lib "kernel32" (ByVal
    lpPathName As String) As Long

#End If

#If VBA7 Then

#If Win64 Then

    Private Declare PtrSafe Function OP_LE_Calc Lib "libop64.dll" (ByVal Flags As Long, _
        ByVal nl As Long, h As Double, E As Double, v As Double, f As Double, _
        ByVal na As Long, Ax As Double, Ay As Double, Al As Double, Ap As Double, Ar As
        Double, _
        ByVal np As Long, Px As Double, Py As Double, Pz As Double, Pl As Long, Res As
        Double) As Long

#Elseif Win32 Then

    Private Declare PtrSafe Function OP_LE_Calc Lib "libop.dll" Alias "_OP_LE_Calc@72"
    (ByVal Flags As Long, _

```

```

        ByVal nl As Long, h As Double, E As Double, v As Double, f As Double, _
        ByVal na As Long, Ax As Double, Ay As Double, Al As Double, Ap As Double, Ar As
Double, _
        ByVal np As Long, Px As Double, Py As Double, Pz As Double, Pl As Long, Res As
Double) As Long
#End If
#Else
#If Win32 Or Win64 Then
    Private Declare Function OP_LE_Calc Lib "libop.dll" Alias "_OP_LE_Calc@72" (ByVal
Flags As Long, _
        ByVal nl As Long, h As Double, E As Double, v As Double, f As Double, _
        ByVal na As Long, Ax As Double, Ay As Double, Al As Double, Ap As Double, Ar As
Double, _
        ByVal np As Long, Px As Double, Py As Double, Pz As Double, Pl As Long, Res As
Double) As Long
#Else
    Private Declare Function OP_LE_Calc Lib "libop.dylib" Alias "_OP_LE_Calc" (ByVal
Flags As Long, _
        ByVal nl As Long, h As Double, E As Double, v As Double, f As Double, _
        ByVal na As Long, Ax As Double, Ay As Double, Al As Double, Ap As Double, Ar As
Double, _
        ByVal np As Long, Px As Double, Py As Double, Pz As Double, Pl As Long, Res As
Double) As Long
#End If
#End If

Public Function Mr() As Double

```

```

Dim presionVertical As Double, presionLateral As Double, coefPresion As Double, i As
Integer, j As Integer, k As Integer

Dim dens(1 To 4) As Double, pi As Double

For i = 1 To 4
    dens(i) = Worksheets("Analisis").Cells(i + 8, 5).Value
Next i

Mr = Worksheets("Analisis").Range("C12").Value

If Application.OperatingSystem Like "*Mac*" Then
    ChDir ActiveWorkbook.Path
Elseif Left$(ActiveWorkbook.Path, 1) = "\" Then
    SetCurrentDirectoryA ActiveWorkbook.Path
Else
    ChDrive Left$(ActiveWorkbook.Path, 1)
    ChDir ActiveWorkbook.Path
End If

Dim Mprev As Double

Dim cantMAC As Integer

Dim ultlinea As Long

Dim nLayers As Long, nLoads As Long, nPoints As Long

Dim m As Long, rv As Long

Dim Lh() As Double, LE() As Double, Lv() As Double, Lf() As Double
Dim Ax() As Double, Ay() As Double, Al() As Double, Ap() As Double, Aa() As Double
Dim Px() As Double, Py() As Double, Pz() As Double, Pl() As Long
Dim Result() As Double

```

Dim dif As Double

Dim invariante As Double, desviador As Double, tao As Double

pi = 3.14159265359

dif = 2

m = 0

nLoads = 1

nPoints = 1

'CARGAS: Eje simple dual con separación entre centros de llanta a llanta de 33 cm, una eje de 80 KN (en el método se coloca 0),

'una presión de inflado de 750 KPa, un radio de contacto de 9.218 cm. Fuente: Austroads

ReDim Ax(1 To nLoads) As Double

ReDim Ay(1 To nLoads) As Double

ReDim Al(1 To nLoads) As Double

ReDim Ap(1 To nLoads) As Double

ReDim Aa(1 To nLoads) As Double

Ax(1) = 0 'mm

' Ax(2) = -Ax(1) 'mm

Ay(1) = 0 ': Ay(2) = 0

Al(1) = 20 ': Al(2) = Al(1) 'KN

Ap(1) = 750 'KPa

' Ap(2) = Ap(1) 'KPa

Aa(1) = 1000 * (Al(1) / (pi * Ap(1))) ^ 0.5 'mm

' Aa(2) = Aa(1) 'mm

Al(1) = 0 ': Al(2) = Al(1)

nLayers = 4

'Para iniciar el proceso iterativo, se asigna el valor semilla de módulo resiliente

```
ReDim Lh(1 To nLayers) 'Espesores
ReDim LE(1 To nLayers) 'Modulos
ReDim Lv(1 To nLayers) 'Razon de Poisson
ReDim Lf(1 To nLayers) 'Fricción entre capas
```

```
***Capas BG-SBG***
```

```
'Se asignan los módulos de las capas
```

```
For j = 1 To nLayers
```

```
    Lh(j) = Worksheets("Análisis").Cells(j + 8, 2).Value 'En mm para OpenPave
```

```
    LE(j) = Worksheets("Análisis").Cells(j + 8, 3).Value * 1000 'En KPa para OpenPave
```

```
    Lv(j) = Worksheets("Análisis").Cells(j + 8, 4).Value
```

```
    Lf(j) = 1
```

```
Next j
```

```
'se asignan los puntos de análisis en medio de las llantas, debajo de la llanta y la orilla
de la llanta a la mitad de la base granular
```

```
nPoints = 1
```

```
ReDim Result(1 To 27, 1 To nPoints)
```

```
ReDim Px(1 To nPoints)
```

```
ReDim Py(1 To nPoints)
```

```
ReDim Pz(1 To nPoints)
```

```
ReDim Pl(1 To nPoints)
```

```
presionVertical = 0.00000981 * Application.WorksheetFunction.SumProduct(Lh(), dens())
```

```
coefPresion = Lv(2) / (1 - Lv(2))
```

```
presionLateral = coefPresion * presionVertical
```

```

For i = 1 To nPoints
    Py(i) = 0
    Pz(i) = Lh(1) + Lh(2) + Lh(3) + 0.0001
    Pl(i) = 4
Next i
Px(1) = 0

Do While dif > 1
    LE(2) = Mr * 1000
    Mprev = Mr

    'Resolución multicapa elástica
    ' Res will hold 27 values on return
    ' 1- 6: sxx, syy, szz, sxy, sxz, syz
    ' 7-12: sp1, sp2, sp3, ss1, ss2, ss3
    ' 13-15: dxx, dyy, dzz
    ' 16-21: exx, eyy, ezz, exy, exz, eyz
    ' 22-27: ep1, ep2, ep3, es1, es2, es3
    ' Note VB uses Fortan array storage (cols first)
    rv = OP_LE_Calc(m, nLayers, Lh(1), LE(1), Lv(1), Lf(1), _
        nLoads, Ax(1), Ay(1), Al(1), Ap(1), Aa(1), _
        nPoints, Px(1), Py(1), Pz(1), Pl(1), Result(1, 1))

    invariante = Abs(Result(1, 1)) + Abs(Result(2, 1)) + Abs(Result(3, 1)) + presionVertical
+ 2 * presionLateral

```

```

    tao = 1 / 3 * ((Abs(Result(3, 1)) + presionVertical - Abs(Result(2, 1)) - presionLateral) ^
2 + (Abs(Result(3, 1)) + presionVertical - Abs(Result(1, 1)) - presionLateral) ^ 2 +
(Abs(Result(2, 1)) - Abs(Result(1, 1))) ^ 2) ^ 0.5

```

```

    desviador = Result(3, 1) + presionVertical

```

```

    Mr = octaedrico(invariante, tao)

```

```

    Worksheets("Analisis").Range("A14").Value = Mr

```

```

    dif = Abs(Mprev - Mr)

```

```

Loop

```

```

End Function

```

```

Public Function saturacionCalculo(af As Double, bf As Double, cf As Double, hr As Double,
hsuccion As Double) As Double

```

```

    Dim Ch As Double

```

```

    Ch = 1 - Log(1 + hsuccion / hr) / Log(1 + 10 ^ 6 / hr)

```

```

    saturacionCalculo = Ch / (Log(Exp(1) + (hsuccion / af) ^ bf)) ^ cf

```

```

End Function

```

```

Public Function Factores(p200 As Double, pi As Double, d10 As Double, gi As Integer, af
As Double, bf As Double, cf As Double, hr As Double) As Boolean

```

```

    Dim cel As String

```

```

    cel = Worksheets("Analisis").Range("H23").Value

```

```

    Dim wpi As Double

```

```

    If cel = "Torres Zapata" Then

```

```

        wpi = p200 * pi / 100

```

```

    If wpi = 0 Then

```

```

If d10 < 0.02 Then
    af = 1.28
Else
    af = -967.21 * d10 ^ 2 + 218.37 * d10 - 2.7
End If

bf = 10 ^ (-0.0075 * af ^ 2 - 0.3577 * af + 0.3061)
cf = 0.0058 * af ^ 3 - 0.0933 * af ^ 2 + 0.4069 * af + 0.3481
hr = 100

Elseif wpi > 0 Then
    af = 10 ^ (0.69 - 2.7 / (1 + Exp(4 - 0.14 * gi)))
    bf = 10 ^ (0.78 / (1 + Exp(6.75 - 0.19 * gi)))
    cf = 0.03 + 0.62 * Exp(-0.82 * (log10(af) - 0.57) ^ 2)
    hr = 494 + 660 / (1 + Exp(4 - 0.19 * gi))
End If

Worksheets("Analisis").Range("h18").Value = af
Worksheets("Analisis").Range("h19").Value = bf
Worksheets("Analisis").Range("h20").Value = cf
Worksheets("Analisis").Range("h21").Value = hr

Elseif cel = "Papel filtro" Then
    af = Worksheets("Analisis").Range("F18").Value
    bf = Worksheets("Analisis").Range("F19").Value
    cf = Worksheets("Analisis").Range("F20").Value
    hr = Worksheets("Analisis").Range("F21").Value
End If

End Function

```

Public Function log10(x As Double) As Double

log10 = Log(x) / Log(10)

End Function

Public Function GroupIndex(p200 As Double, ll As Double, pi As Double) As Integer

GroupIndex = Application.WorksheetFunction.Round((p200 - 35) * (0.2 + 0.005 * (ll - 40))
+ 0.01 * (p200 - 15) * (pi - 10), 0)

End Function

Public Function Thornwaite(precipitacion() As Double, temperatura() As Double, latitud As Double, tmi() As Double) As Boolean

Dim icomp(1 To 12) As Double, a As Double, prec(1 To 12) As Double, temp(1 To 12) As Double, iacumulado As Double, i As Integer

Dim etpsincorr(1 To 12) As Double, Jclima(1 To 12) As Integer, delta(1 To 12) As Double, etpcorregido(1 To 12) As Double

Dim pi As Double, ws(1 To 12) As Double, Xclima(1 To 12) As Double, Nclima(1 To 12) As Double, dias(1 To 12) As Integer

Dim Ai(1 To 12) As Double, Exc(1 To 12) As Double, DEF(1 To 12) As Double, lh(1 To 12) As Double, la(1 To 12) As Double

Dim j As Integer, m As Integer

pi = 3.14159265359

Jclima(1) = 15: Jclima(2) = 45: Jclima(3) = 74: Jclima(4) = 105: Jclima(5) = 135: Jclima(6) = 166: Jclima(7) = 196: Jclima(8) = 227: Jclima(9) = 258

Jclima(10) = 288: Jclima(11) = 319: Jclima(12) = 349

dias(1) = 31: dias(2) = 28: dias(3) = 31: dias(4) = 30: dias(5) = 31: dias(6) = 30: dias(7) = 31: dias(8) = 31: dias(9) = 30: dias(10) = 31: dias(11) = 30: dias(12) = 31

iacumulado = 0

For i = 1 To 12

```

    icomp(i) = (temperatura(i) / 5) ^ 1.514

    iacumulado = iacumulado + icomp(i)

Next i

a = 675 * 10 ^ -9 * iacumulado ^ 3 - 771 * 10 ^ -7 * iacumulado ^ 2 + 1792 * 10 ^ -5 *
iacumulado + 0.49239

For i = 1 To 12

    etpsincorr(i) = 16 * (10 * temperatura(i) / iacumulado) ^ a

    delta(i) = 0.409 * Sin(2 * pi * Jclima(i) / 365 - 1.39)

    Xclima(i) = 1 - Tan(latitud * pi / 180) ^ 2 * Tan(delta(i)) ^ 2

    If Xclima(i) <= 0 Then Xclima(i) = 0.00001

    ws(i) = pi / 2 - Atn(-Tan(latitud * pi / 180) * Tan(delta(i)) / Xclima(i) ^ 0.5)

    Nclima(i) = 24 * ws(i) / pi

    etpcorregido(i) = etpsincorr(i) * (Nclima(i) / 12) * (dias(i) / 30)

    Worksheets("Analisis").Cells(i + 1, 12).Value = etpcorregido(i)

Next i

Ai(12) = 0

For j = 1 To 5

    For i = 1 To 12

        If i - 1 = 0 Then m = 12 Else m = i - 1

        Ai(i) = precipitacion(i) + Ai(m) - etpcorregido(i)

        If Ai(i) < 0 Then Ai(i) = 0

        If Ai(i) > 100 Then Ai(i) = 100

        Exc(i) = precipitacion(i) + Ai(m) - etpcorregido(i)

        If Exc(i) > 100 Then Exc(i) = Exc(i) - 100 Else Exc(i) = 0

        DEF(i) = precipitacion(i) + Ai(m) - etpcorregido(i)

        If DEF(i) < 0 Then DEF(i) = -DEF(i) Else DEF(i) = 0

```

```

    Next i
Next j
For i = 1 To 12
    lh(i) = Exc(i) / etpcorregido(i) * 100
    la(i) = DEF(i) / etpcorregido(i) * 100
    tmi(i) = lh(i) - 0.6 * la(i)
    Worksheets("Analisis").Cells(i + 1, 13).Value = tmi(i)
Next i

End Function

Public Function ModeloTMI(p200 As Double, pi As Double, tmi() As Double, succion() As
Double) As Boolean
    Dim wpi As Double
    Dim alpha As Double, beta As Double, gamma As Double, delta As Double
    wpi = p200 * pi / 100
    Dim i As Integer
    If wpi = 0 Then
        If p200 < 10 Then
            alpha = 0.3: beta = 419.07: gamma = 133.45: delta = 15
        ElseIf p200 < 50 Then
            alpha = 0.3: beta = 521.5: gamma = 137.3: delta = 16
        End If
    Else
        If wpi < 0.5 Then
            alpha = 0.3: beta = 521.5: gamma = 137.3: delta = 16

```

```
Elseif wpi < 5 Then
    alpha = 0.3
    beta = interpol(0.5, 5, 521.5, 663.5, wpi)
    gamma = interpol(0.5, 5, 137.3, 142.5, wpi)
    delta = interpol(0.5, 5, 16, 17.5, wpi)
Elseif wpi < 10 Then
    alpha = 0.3
    beta = interpol(5, 10, 663.5, 801, wpi)
    gamma = interpol(5, 10, 142.5, 147.6, wpi)
    delta = interpol(5, 10, 17.5, 25, wpi)
Elseif wpi < 20 Then
    alpha = 0.3
    beta = interpol(10, 20, 801, 975, wpi)
    gamma = interpol(10, 20, 147.6, 152.5, wpi)
    delta = interpol(10, 20, 25, 32, wpi)
Elseif wpi < 50 Then
    alpha = 0.3
    beta = interpol(20, 50, 975, 1171.2, wpi)
    gamma = interpol(20, 50, 152.5, 157.5, wpi)
    delta = interpol(20, 50, 32, 27.8, wpi)
Else
    alpha = 0.3
    beta = 1171.2
    gamma = 157.5
    delta = 27.8
End If
```

```

End If

For i = 1 To 12
    succion(i) = alpha * (Exp(beta / (tmi(i) + gamma)) + delta)
    Worksheets("Analisis").Cells(i + 1, 14).Value = succion(i)
Next i

Worksheets("Analisis").Range("J18").Value = alpha
Worksheets("Analisis").Range("J19").Value = beta
Worksheets("Analisis").Range("J20").Value = gamma
Worksheets("Analisis").Range("J21").Value = delta

ModeloTMI = True

End Function

```

```

Public Function interpol(x1 As Double, x2 As Double, y1 As Double, y2 As Double, x As Double) As Double

```

```

    interpol = (y2 - y1) / (x2 - x1) * (x - x1) + y1

```

```

End Function

```

```

Public Function factorambiental(p200 As Double, pi As Double, gammamax As Double, wopt As Double, gs As Double, saturacion As Double) As Double

```

```

    Dim wpi As Double, thetasat As Double

```

```

    wpi = p200 * pi / 100

```

```

    Dim Satopt As Double, i As Integer

```

```

    Satopt = Sopt(gammamax, wopt, gs, thetasat)

```

```

    Dim aAmb As Double, bAmb As Double, km As Double

```

```

    aAmb = (-0.6 - 1.87194 * Exp(-wpi)) ^ -1

```

```

    bAmb = (0.8 + 0.08 * (wpi ^ 0.5))

```

```

km = (11.96518 + 10.19111 * Exp(-wpi)) ^ 0.5

factorambiental = 10 ^ (1.002 * (aAmb + ((bAmb - aAmb) / (1 + Exp(Log(-bAmb / aAmb)
+ km * (saturacion - Satopt))))))

```

```
End Function
```

```
Public Function Sopt(yd As Double, wopt As Double, gs As Double, thetasat As Double) As
Double
```

```
    Dim thetaopt As Double
```

```
    thetaopt = wopt * yd
```

```
    Sopt = thetaopt / (1 - yd / (gs))
```

```
    thetasat = thetaopt / Sopt
```

```
End Function
```

```
Public Function mrmensual(Mr As Double, factorambiental As Double) As Double
```

```
    mrmensual = Mr * factorambiental
```

```
End Function
```

```
Dim j As Integer
```

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
    Dim yes As Boolean
```

```
    Dim k(1 To 3) As Double
```

```
    yes = k1k2k3(k())
```

```
    For j = 1 To 3
```

```
        Worksheets("Analisis").Cells(3, j) = k(j)
```

```
    Next j
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
    Mr
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
    Dim precipitacion(1 To 12) As Double, temperatura(1 To 12) As Double, yes As Boolean,  
    latitud As Double
```

```
    Dim succion(1 To 12) As Double, p200 As Double, pi As Double, gi As Integer, ll As  
    Double, d10 As Double
```

```
    Dim saturacion(1 To 12) As Double, tmi(1 To 12) As Double
```

```
    Dim gammadmax As Double, gs As Double, wopt As Double
```

```
    Dim fAmb(1 To 12) As Double, Mrmen(1 To 12) As Double, Satopt As Double, thetasat  
    As Double, thetaw(1 To 12) As Double
```

```
    Dim Mr As Double
```

```
    Dim i As Integer
```

```
    gammadmax = Worksheets("Analisis").Range("H11").Value
```

```
    wopt = Worksheets("Analisis").Range("H12").Value
```

```
    gs = Worksheets("Analisis").Range("H10").Value
```

```
    p200 = Worksheets("Analisis").Range("H9").Value
```

```
    pi = Worksheets("Analisis").Range("H15").Value
```

```
    ll = Worksheets("Analisis").Range("H15").Value
```

```
    d10 = Worksheets("Analisis").Range("H4").Value
```

```
    For i = 1 To 12
```

```
        temperatura(i) = Worksheets("Analisis").Cells(i + 1, 11).Value
```

```
        precipitacion(i) = Worksheets("Analisis").Cells(i + 1, 10).Value
```

```
    Next i
```

```
    latitud = Worksheets("Analisis").Range("J14").Value
```

```

yes = Thornwaite(precipitacion(), temperatura(), latitud, tmi())
yes = ModeloTMI(p200, pi, tmi(), succion())
gi = GroupIndex(p200, ll, pi)
Dim af As Double, bf As Double, cf As Double, hr As Double
yes = Factores(p200, pi, d10, gi, af, bf, cf, hr)
Dim cel As String
cel = Worksheets("Analisis").Range("H22").Value
If cel = "Basado en AASHTO T307" Then
    Mr = Worksheets("Analisis").Range("A14").Value
Elseif cel = "Basado en valor fijo" Then
    Mr = Worksheets("Analisis").Range("C10").Value
End If
Satopt = Sopt(gammadmax, wopt, gs, thetasat)
For i = 1 To 12
    saturacion(i) = saturacionCalculo(af, bf, cf, hr, succion(i))
    thetaw(i) = saturacion(i) * thetasat
    Worksheets("Analisis").Cells(i + 1, 15).Value = thetaw
    Worksheets("Analisis").Cells(i + 1, 16).Value = saturacion(i) * 100
    fAmb(i) = factorambiental(p200, pi, gammadmax, wopt, gs, saturacion(i))
    Worksheets("Analisis").Cells(i + 1, 17).Value = fAmb(i) * 100
    Mrmen(i) = mrmensual(Mr, fAmb(i))
    Worksheets("Analisis").Cells(i + 1, 18).Value = Mrmen(i)
Next i
End Sub

```