

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CLIMÁTICO DE LA MEPDG “AASHTO 2008”
EN COLOMBIA PARA TRES CONDICIONES CLIMATICAS

WILMER BERNARDO MENA ABADÍA

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERIA
2013

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CLIMÁTICO DE LA MEPDG “AASHTO 2008”
EN COLOMBIA PARA TRES CONDICIONES CLIMATICAS

WILMER BERNARDO MENA ABADÍA

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR AL TITULO DE MAGISTER EN INGENIERIA

ASESORES:

Ph.D., P.E. CARLOS M. CHANG ALBITRES
ESP. JULIÁN VIDAL VALENCIA

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERA
FACULTAD INGENIERIA CIVIL

2013

NOTA DE ACEPTACIÓN

TUTOR:

EVALUADOR:

MEDELLÍN, JUNIO DE 2013

AGRADECIMIENTOS

Al Esp. y Candidato a Máster en Ingeniería Julián Vidal Valencia
Jefe del Departamento de Ingeniería Civil U. EAFIT

Al Ph.D., P.E. Carlos M. Chang Albitres
University of Texas en El Paso
Profesor del Programa de Graduados

Curso: Gestión de Infraestructura, Planeamiento de Infraestructura, Diseño Avanzado de Pavimentos, Materiales en Ingeniería Civil, Estática, Topografía, Gestión de la Construcción.

A los dos ingenieros mencionados anteriormente de corazón les agradezco por su inmensa y permanente colaboración a pesar de las múltiples ocupaciones en las cuales se mantienen.

Al Ingeniero y amigo José Joaquín Lara Ruiz, por ser siempre esa persona que generó en mí el entusiasmo de seguir adelante y ser siempre un mejor profesional capaz de perseverar para conseguir los objetivos.

Finalmente agradezco a todos los miembros de mi familia por todo el respaldo recibido durante todo este tiempo y su gran paciencia ante la falta de disponibilidad para con ellos, debido al tiempo utilizado mientras adelantaba todos mis respectivos estudios.

TABLA CONTENIDO

CAPITULO 1	20
INTRODUCCION.....	20
1.1. ANTECEDENTES	22
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	29
1.3. JUSTIFICACION	31
1.4. ALCANCE.....	32
1.5. OBJETIVOS	32
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	32
1.5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	32
1.6. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	34
CAPITULO 2	36
MARCO CONCEPTUAL: GLOSARIO	36
CAPITULO 3	51
MARCO TEÓRICO: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	51
3.1. TIPOS DE PAVIMENTOS	51
3.2. FILOSOFÍA DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	53
3.3. RESPUESTA Y DESEMPEÑO DE LOS PAVIMENTOS	54
3.4. CONDICIONES FUNCIONALES Y ESTRUCTURALES DE LAS CARRETERAS.....	55
3.5. ALGUNOS PARADIGMAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS	55
3.6. ADOPCIÓN DE TEORÍA	70
CAPITULO 4	71
METODO DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS	71
“MECÁNISTICO-EMPÍRICO”	71
4.1. PERSPECTIVA HISTÓRICA	71
4.2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y SU ADOPCIÓN	72
4.3. MODELOS DE RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO	76

4.4. MODELOS DE DESEMPEÑO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES Y RÍGIDOS	79
4.4.1. MODELOS DE DESEMPEÑO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES – MEPDG	80
4.4.1.1. FISURAMIENTO RELACIONADO CON LA CARGA (FALLA POR FATIGA).....	80
4.4.1.2. FISURAS PIEL DE COCODRILO	81
4.4.1.3. FISURAS LONGITUDINALES.....	83
4.4.1.4. FISURAMIENTO TÉRMICO	85
4.4.1.5. AHUELLAMIENTO	88
4.4.1.6. REGULARIDAD SUPERFICIAL	93
4.4.2. MODELOS DE DESEMPEÑO EN PAVIMENTOS RIGIDOS JPCP- JOINTED PLAIN CONCRETE PAVEMENT (PAVIMENTO DE CONCRETO CON JUNTAS SIMPLES) MEPDG	96
4.4.2.1. FISURAMIENTO TRANSVERSAL DE LOSAS (ABAJO HACIA ARRIBA Y ARRIBA HACIA ABAJO).....	96
4.4.2.2. ESCALONAMIENTO PROMEDIO EN JUNTAS TRANSVERSALES.....	100
4.4.2.3. REGULARIDAD SUPERFICIAL EN JPCP - JOINTED PLAIN CONCRETE PAVEMENT (PAVIMENTO DE CONCRETO CON JUNTAS SIMPLES).....	103
4.4.3. MODELOS DE DESEMPEÑO EN PAVIMENTOS RIGIDOS CRCP – CONTINUOUSLY REINFORCED CONCRETE PAVEMENT (PAVIMENTO DE CONCRETO CONTINUAMENTE REFORZADO) MEPDG.....	104
4.4.3.1. PUNZONAMIENTO	104
4.4.3.2. REGULARIDAD SUPERFICIAL EN CRCP – CONTINUOUSLY REINFORCED CONCRETE PAVEMENT (PAVIMENTO DE CONCRETO CONTINUAMENTE REFORZADO).....	107
CAPITULO 5	108
MODELO CLIMÁTICO .ICM - “MECÁNISTICO-EMPÍRICO”	108

5.1.	FACTORES HORARIOS.....	112
5.1.1.	PRECIPITACIÓN.....	112
5.1.1.1.	EFFECTOS DE LA PRECIPITACIÓN.....	112
5.1.1.2.	HUMEDAD Y SUCCIÓN DEL SUELO.....	114
5.1.1.3.	CURVA CARACTERÍSTICA AGUA - SUELO (SOIL WATER CHARACTERISTIC CURVE - SWCC).....	116
5.1.1.4.	MODELOS DE PRECIPITACIÓN EXISTENTES.....	118
5.1.1.5.	PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES DE LOS SITIOS DE ESTUDIO.....	124
5.1.1.6.	DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA EN COLOMBIA.....	125
5.1.2.	TEMPERATURA.....	128
5.1.2.1.	MODELOS DE TEMPERATURA EXISTENTES.....	129
5.1.2.2.	TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES DE LOS SITIOS DE ESTUDIO.....	134
5.1.3.	PORCENTAJE DE CIELO CLARO Ó NUBOSIDAD.....	138
5.1.4.	VIENTO.....	143
5.1.4.1.	VELOCIDAD DEL VIENTO EN COLOMBIA.....	145
5.1.5.	PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO.....	150
5.2.	OTROS PARAMETROS DE ENTRADA.....	153
5.2.1.	SALIDA Y PUESTA DEL SOL.....	153
5.2.2.	HUMEDAD.....	153
5.2.2.1.	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA HUMEDAD RELATIVA EN COLOMBIA.....	156
5.2.3.	RADIACION SOLAR.....	160
5.2.3.1.	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA RADIACIÓN SOLAR EN COLOMBIA.....	160
5.2.4.	LONGITUD, LATITUD Y ELEVACIÓN.....	163
5.3.	EJEMPLOS DE DISEÑO MECANÍSTICO EMPÍRICO.....	171
5.3.1.	PAVIMENTO FLEXIBLE.....	171

5.3.2. PAVIMENTO RÍGIDO	193
CAPITULO 6	208
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	208
6.1. CONCLUSIONES.....	208
6.2. RECOMENDACIONES	211
CAPITULO 7	213
BIBLIOGRAFIA.....	213

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PROCESOS DE DISEÑO ME.	26
FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA EN UN PAVIMENTO FLEXIBLE	52
FIGURA 3. DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA EN UN PAVIMENTO RÍGIDO.....	53
FIGURA 4. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS FACTORES AMBIENTALES Y CLIMÁTICOS.....	58
FIGURA 5. REGIONES CLIMÁTICAS DE COLOMBIA.....	59
FIGURA 6 DIAGRAMA DE FLUJO DE LAS TRES ETAPAS DEL PROCESO DE DISEÑO Y ANÁLISIS EN LA MEPDG.....	74
FIGURA 7. FISURAS PIEL DE COCODRILO.....	82
FIGURA 8. FISURAS LONGITUDINALES.....	83
FIGURA 9. FISURAMIENTO TÉRMICO.....	86
FIGURA 11. AHUELLAMIENTO.....	89
FIGURA 12. COMPORTAMIENTO DEL IRI.....	96
FIGURA 13. FISURAMIENTO TRANSVERSAL EN LOSAS.....	99
FIGURA 14. VISTA EN PERFIL: DETALLE DEL ESCALONAMIENTO.....	102
FIGURA 15. ESCALONAMIENTO.....	102
FIGURA 16. PUNZONAMIENTO.....	106
FIGURA 17. FORMATO .ICM.....	111
FIGURA 18. CURVA CARACTERÍSTICA SUELO – AGUA.....	117
FIGURA 19. MODELAMIENTO DEL MOVIMIENTO DEL AGUA.....	123
FIGURA 20. PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES DE LOS SITIOS DE ESTUDIO (2001 A 2012).....	124
FIGURA 21. DISTRIBUCIÓN ESPACIO – TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL (MM) PROMEDIOS MULTIANUALES.....	127
FIGURA 22 VARIACIONES DE TEMPERATURA (°F) DE MÁS DE 24 HORAS EN HAWAI DURANTE LOS EQUINOCCIOS (2002-2005).....	134
FIGURA 23. TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES DE LOS SITIOS DE ESTUDIO (2001-2012).....	135
FIGURA 24. TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C) PROMEDIO MULTIANUAL.....	137

FIGURA 25. TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO Y EL AIRE EN UN DÍA SOLEADO.	140
FIGURA 26. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO (M/S) PROMEDIOS MULTIANUALES.	149
FIGURA 27. HUMEDAD MEDIA MENSUAL PARA LOS SITIOS DE ESTUDIO (2001-2012).	156
FIGURA 28. HUMEDAD RELATIVA MEDIA ANUAL (%) PROMEDIOS MULTIANUALES.	159
FIGURA 29. RADIACIÓN SOLAR GLOBAL (KWH/M ² POR DÍA) PROMEDIO MULTIANUAL.	162
FIGURA 30. ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA ARAGÓN.	164
FIGURA 31. ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA UNIBAN.	165
FIGURA 32. ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA TAQUES LOS.	166
FIGURA 33. REGISTROS METEOROLÓGICOS ENTREGADOS POR EL IDEAM EN FORMA BRUTA.	166
FIGURA 34. ORDENAMIENTO DE ARCHIVOS CLIMÁTICOS EN EXCEL.	168
FIGURA 35. REEMPLAZO DE ESPACIOS CON BLOC DE NOTAS DE WINDOWS. ...	169
FIGURA 36. UBICACIÓN DE ENCABEZADO EN LOS ARCHIVOS .ICM.	169
FIGURA 37. EXTENSIÓN Y CODIFICACIÓN DE ARCHIVOS CLIMÁTICOS.	170
FIGURA 38. ARCHIVO CLIMÁTICO FINAL (PERFIL DE ICC).	170
FIGURA 39. CURVA GRANULOMÉTRICA MDC-2.	175
FIGURA 40. CURVA GRANULOMÉTRICA BASE GRANULAR PAVIMENTO FLEXIBLE.	176
FIGURA 41. CURVA GRANULOMÉTRICA SUBBASE GRANULAR PAVIMENTO FLEXIBLE.	177
FIGURA 42. IRI TERMINAL (PULG/MI) – PAVIMENTO FLEXIBLE – APARTADÓ.	181
FIGURA 43. FISURAMIENTO LONGITUDINAL (FT/MI) – PAVIMENTO FLEXIBLE – APARTADÓ.	182
FIGURA 44. FISURAMIENTO PIEL DE COCODRILO (%) – PAVIMENTO FLEXIBLE - APARTADÓ.	182
FIGURA 45. FISURAMIENTO TÉRMICO (TRANSVERSAL – FT/MI) – PAVIMENTO FLEXIBLE - APARTADÓ.	183

FIGURA 46. DEFORMACION PERMANENTE (PULG) – PAVIMENTO FLEXIBLE - APARTADÓ.....	183
FIGURA 47. IRI TERMINAL (PULG/MI) – PAVIMENTO FLEXIBLE - SANTA ROSA DE O.	184
FIGURA 48. FISURAMIENTO LONGITUDINAL (FT/MI) – PAVIMENTO FLEXIBLE - SANTA ROSA DE OSOS	185
FIGURA 49. FISURAMIENTO PIEL DE COCODRILO (%) – PAVIMENTO FLEXIBLE - SANTA ROSA DE OSOS	185
FIGURA 50. FISURAMIENTO TÉRMICO (TRANSVERSAL – FT/MI) – PAVIMENTO FLEXIBLE - SANTA ROSA DE OSOS.....	186
FIGURA 51. DEFORMACION PERMANENTE (PULG) – PAVIMENTO FLEXIBLE - SANTA ROSA DE OSOS	186
FIGURA 52. MÓDULOS DE HMA VS TIEMPO PARA EL DISEÑO EN PAVIMENTO FLEXIBLE – LOCALIDAD DE SUMAPAZ.....	188
FIGURA 53. IRI TERMINAL (PULG/MI) – PAVIMENTO FLEXIBLE – SUMAPAZ.....	189
FIGURA 54. FISURAMIENTO LONGITUDINAL (FT/MI) – PAVIMENTO FLEXIBLE – SUMAPAZ.	189
FIGURA 55. FISURAMIENTO PIEL DE COCODRILO (%) – PAVIMENTO FLEXIBLE – SUMAPAZ.	190
FIGURA 56. FISURAMIENTO TÉRMICO (TRANSVERSAL – FT/MI) – PAVIMENTO FLEXIBLE – SUMAPAZ.....	190
FIGURA 57. DEFORMACION PERMANENTE (PULG) – PAVIMENTO FLEXIBLE – SUMAPAZ.	191
FIGURA 42. CURVA GRANULOMÉTRICA SUBBASE GRANULAR PAVIMENTO RÍGIDO.	196
FIGURA 59. IRI TERMINAL (PULG/MI) – PAVIMENTO RÍGIDO – APARTADÓ	201
FIGURA 60. ESCALONAMIENTO PROMEDIO DE JUNTAS (IN) – PAVIMENTO RÍGIDO – APARTADÓ.....	202
FIGURA 61. FISURAMIENTO DE LOSAS (%) – PAVIMENTO RÍGIDO – APARTADÓ.	202
FIGURA 62. IRI TERMINAL (PULG/MI) – PAVIMENTO RÍGIDO – SANTA ROSA DE O.	203
FIGURA 63. FISURAMIENTO DE LOSAS (%) – PAVIMENTO RÍGIDO – SANTA ROSA DE O.....	204

FIGURA 64. ESCALONAMIENTO PROMEDIO DE JUNTAS (IN) – PAVIMENTO RÍGIDO – SANTA ROSA DE O.....	204
FIGURA 65. IRI TERMINAL (PULG/MI) - PAVIMENTO RÍGIDO – SUMAPAZ.	205
FIGURA 66. ESCALONAMIENTO PROMEDIO DE JUNTAS (IN) - PAVIMENTO RÍGIDO – SUMAPAZ.	206
FIGURA 67. FISURAMIENTO DE LOSAS (%) - PAVIMENTO RÍGIDO – SUMAPAZ....	206

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. DIFERENCIAS ENTRE LA AASHTO 1993 Y MEPDG 2008.	23
TABLA 2. REGIONES CLIMÁTICAS SEGÚN LA TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN. [17, 18 Y 19]	58
TABLA 3. RANGOS DE TRÁNSITO CONTEMPLADOS EN EL MÉTODO DE DISEÑO.	60
TABLA 4. CATEGORÍAS DE LA SUBRASANTE.....	60
TABLA 5. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA- CALDAS.....	109
TABLA 6. CARACTERIZACIÓN DE MUNICIPIOS DE COLOMBIA UTILIZADOS PARA EL MODELAMIENTO CLIMÁTICO.	109
TABLA 7. ESCALA DE NUBOSIDAD.	142
TABLA 8. ESCALA BEAUFORT PARA LA FUERZA DEL VIENTO, CON INDICACIÓN DE LAS VELOCIDADES EQUIVALENTES EN METROS POR SEGUNDO.....	146
TABLA 9. ESTACIÓN ARAGÓN EN EL MUNICIPIO DE SANTA ROSA DE OSOS – ANTIOQUIA – COLOMBIA – IDEAM.	164
TABLA 10. UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACIÓN ARAGÓN.....	164
TABLA 11. ESTACIÓN UNIBAN EN EL MUNICIPIO DE APARTADÓ – ANTIOQUIA – COLOMBIA – IDEAM.....	165
TABLA 12. UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACIÓN UNIBAN.	165
TABLA 13. ESTACIÓN TAQUES LOS EN LA LOCALIDAD DE SUMAPAZ – BOGOTÁ – COLOMBIA – IDEAM.	165
TABLA 14. UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACIÓN TAQUES LOS.....	165
TABLA 15. CONFIGURACIÓN VEHICULAR BASADA EN EL PORCENTAJE DE AADTT EN EL DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE.	172
TABLA 16. ESPACIAMIENTO PARA EJES DOBLE, TRIPLE Y CUÁDRUPLE EN EL DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE.	173
TABLA 17. ESPECIFICACIONES DEL CEMENTO ASFALTICO MDC—2.	174

TABLA 18. GRANULOMETRÍA MDC-2 ART 450 - INV 07.....	174
TABLA 19. COEFICIENTES DE EMPUJE LATERAL.....	175
TABLA 20. RESUMEN DE DAÑOS Y CONFIABILIDAD PARA EL MUNICIPIO DE APARTADO, ANTIOQUIA – PAVIMENTO FLEXIBLE.....	178
TABLA 21. RESUMEN DE DAÑOS Y CONFIABILIDAD PARA EL MUNICIPIO DE SANTA ROSA DE OSOS, ANTIOQUIA – PAVIMENTO FLEXIBLE.	178
TABLA 22. RESUMEN DE DAÑOS Y CONFIABILIDAD PARA LA LOCALIDAD DE SUMAPAZ, CUNDINAMARCA – PAVIMENTO FLEXIBLE.....	179
TABLA 23. CUADRO COMPARATIVO DE PARÁMETROS DE SALIDA – PAVIMENTO FLEXIBLE.	179
TABLA 24. PAUTAS PARA MODIFICAR EL DISEÑO PRUEBA DE HMA PARA SATISFACER LOS CRITERIOS DE DESEMPEÑO EN PAVIMENTO FLEXIBLE.	191
TABLA 25. CONFIGURACIÓN VEHICULAR BASADA EN EL PORCENTAJE DE AADTT EN EL DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE.	194
TABLA 26. ESPACIAMIENTO PARA EJES DOBLE, TRIPLE Y CUÁDRUPLE EN EL DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE.	194
TABLA 27. RESUMEN DE DAÑOS Y CONFIABILIDAD PARA EL MUNICIPIO DE APARTADO, ANTIOQUIA – PAVIMENTO RÍGIDO.....	198
TABLA 28. RESUMEN DE DAÑOS Y CONFIABILIDAD PARA EL MUNICIPIO DE SANTA ROSA DE OSOS, ANTIOQUIA – PAVIMENTO RÍGIDO.....	198
TABLA 29. RESUMEN DE DAÑOS Y CONFIABILIDAD PARA LA LOCALIDAD DE SUMAPAZ, CUNDINAMARCA – PAVIMENTO RÍGIDO.....	198
TABLA 30. CUADRO COMPARATIVO DE PARÁMETROS DE SALIDA – PAVIMENTO RÍGIDO.....	199
TABLA 31. PAUTAS PARA MODIFICAR EL DISEÑO PRUEBA DE JPCP PARA SATISFACER LOS CRITERIOS DE DESEMPEÑO EN PAVIMENTO RÍGIDO. .	207

LISTA DE ABREVIATURAS

- AADT = Average Annual Daily Traffic (Tránsito Promedio Diario Anual)
- AADTT = Average Annual Daily Truck Traffic (Tránsito Promedio Diario Annual de Camiones)
- AC = Asphalt Cement (Cemento Asfáltico)
- ADT = Average Daily Traffic (Tránsito Promedio Diario)
- CBR = California Bearing Ratio (Relacion de Soporte de California)
- CRCP = Continuously Reinforced Concrete Pavement (Pavimento de Concreto Continuamente Reforzado)
- CRREL – Cold Regions Research and Engineering Laboratory (Laboratorio de ingeniería dedicado a la Investigación de las regiones frías)
- DG2002 = AASHTO 2002 Design Guide (guía de diseño AASHTO 2002)
- ESAL = Equivalent Single Axle-Load (Carga por Eje Simple Equivalente)
- FEA = Finite Element Analysis (Análisis de elementos finitos)
- Fenv* = Environmental adjustment (Factor de ajuste ambiental)
- FD = Fatigue Damage (Daño por fatiga)
- FHWA = Federal Highway Administration
- HMA = Hot Mix Asphalt (Mezcla Asfáltica en caliente)
- ICM = Integrated Climate Model (Modelo Climático Integrado)
- IRI = International Roughness Index (Indice Internacional de Rugosidad)
- JPCP = Jointed Plain Concrete Pavement (Pavimento de Concreto con Juntas Simples)
- LTE = Load Transfer Efficiency (Eficiencia de la Transferencia de Carga)
- LTPP = Long Term Pavement Performance “pavement study program” (comportamiento del pavimento a largo plazo “plan de estudios del pavimento”)
- MEPDG = Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (Guia de Diseño Mecanístico-Empírico de Pavimento)
- MLET = Multi-Layer Elastic Theory (Teoría Elástico Multicapa)

P = Probability (Probabilidad)

PCC = Portland Cement Concrete (Concreto de Cemento Portland)

R = Reliability (Confiabilidad)

SWCC = Soil water characteristic curve (Curva característica Suelo – Agua)

TC = Thermal Cracking (Fisuramiento Térmico)

VMC = Volumetric Moisture Content (contenido de humedad volumétrico).

RESUMEN

El presente proyecto; requisito principal para obtener el título de Magister en ingeniería tiene por objeto implementar el modelo climático ICM (actualmente conocido como EICM) para tres pisos térmicos, utilizando para ello la recientemente creada Guía de Diseño de Pavimentos mecanicista-empírico (MEPDG) AASHTO 2008. Los datos para realizar este proyecto fueron obtenidos en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia “IDEAM” en intervalos de una hora.

El factor clima junto con el tráfico es uno de los factores más importantes que lleva al pavimento a un progresivo deterioro a lo largo de su vida útil. Los diseños de pavimentos durante los últimos tiempos se han llevado a cabo teniendo como base el Método de diseño de pavimentos AASHTO-93 que también considera los efectos ambientales, a través de la estimación de un sistema eficaz del módulo resiliente que refleja las variaciones estacionales atribuidas a la susceptibilidad de la humedad de los suelos, dejando aislado las variaciones generadas en los pavimentos por efecto de las fluctuaciones en la precipitación, velocidad del viento, nubosidad, temperaturas, humedad del aire y demás parámetros que incluye el modelo climático de la MEPDG.

La adaptación del factor climático a la Guía de pavimento Mecanístico-Empírico de diseño (MEPDG) que se genera con este proyecto de Maestría representa un cambio de paradigma en el diseño y la rehabilitación de las estructuras de pavimento sobre su predecesor de AASHTO 1993.

Los parámetros que se incluyen dentro del modelo climático ICM se ordenan y se adaptan en base a tres estaciones meteorológicas escogidas de acuerdo a los pisos térmicos predominantes del país y la respectiva disponibilidad de la información con aras a interpretar la variación en el comportamiento de las

Mezclas asfálticas, Concreto, capas granulares y suelos de subrasante previstos en términos de fallas, fisuramiento, deformación, escalonamiento, IRI, confiabilidad etc.

Esta adaptación indudablemente traerá mejores predicciones del comportamiento de los pavimentos en Colombia y por ende estructuras capaces de soportar las agresiones de los factores externos y cumplir con la vida útil para la cual se diseñan. Conjuntamente a lo anterior, se espera que se deriven nuevas calibraciones e investigaciones que generen consigo una completa adaptación de todos los diferentes parámetros que contiene la guía y de esta forma conocer mucho mejor las estructuras de pavimento que se construyen en nuestro país.

Palabras claves: PROYECTO, MAESTRÍA, INGENIERÍA, ANALIZAR, CALIBRAR, VALIDAR, COLOMBIA, MODELO CLIMÁTICO ICM, GUÍA DE DISEÑOS AASHTO 2008 (MEPDG), PISOS TERMICOS, TRÁFICO, PAVIMENTO, VIDA ÚTIL, MÉTODO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS AASHTO-93, EFECTOS AMBIENTALES, CLIMA, HUMEDAD, PRECIPITACIÓN, VELOCIDAD DEL VIENTO, NUBOSIDAD, TEMPERATURAS, DISEÑO, REHABILITACION, ESTRUCTURA, ESTACION METEOROLOGICA, IDEAM, MEZCLA ASFALTICA, CONCRETO, CAPAS GRANULARES, SUELOS, SUBRASANTE, FALLAS, ESCALONAMIENTO, FISURAMIENTO, IRI, DEFORMACION, CONFIABILIDAD.

ABSTRACT

This project main requirement for the degree of Master of Engineering is to implement climate model ICM (now known as EICM) and three temperature zones, using the newly created Pavement Design Guide mechanistic-empirical (MEPDG) AASHTO 2008. The data for this project were obtained from the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies of Colombia "IDEAM" at hourly intervals.

The climate factor along with the traffic is one of the most important factors leading to a progressive deterioration pavement along its life. The pavement designs in recent times have been carried out on the basis of the method AASHTO pavement design-93 also considers the environmental effects through the estimation of an effective resilient modulus reflecting seasonal variations attributed to susceptibility of soil moisture, leaving isolated physiological changes in pavements due to fluctuations in rainfall, wind speed, cloud cover, temperature, humidity and other parameters including the climate model of the MEPDG.

Adapting to climate factor Guide Mechanistic-Empirical Pavement Design (MEPDG) generated with the draft Master represents a paradigm shift in the design and rehabilitation of pavement structures on its predecessor AASHTO 1993.

The parameters included in the climate model ICM are arranged and adapted based on three weather stations chosen according to the prevailing climatic zones of the country and the relative availability of information order to interpret the change in the behavior of mixtures asphalt, concrete, granular layers and subgrade soils under terms of failures, cracking, warping, scaling, IRI, reliability etc.

This adaptation will undoubtedly bring better predictions of the behavior of pavement structures Colombia and therefore able to withstand the assaults of

external factors and fulfilling life for which they are designed. In conjunction with the above, it expects to derive new calibrations and investigations that generate it a complete adaptation of all the different parameters contained in the guide and thus a much better understanding of pavement structures are constructed in our country.

Keywords: PROJECT, MASTER, ENGINEERING, ANALYSIS, CALIBRATE, VALIDATE, COLOMBIA, CLIMATE MODEL ICM, DESIGN GUIDE AASHTO 2008 (MEPDG), THERMAL FLOORS, ROAD, PAVEMENT, LIFE, METHOD AASHTO PAVEMENT DESIGN-93, ENVIRONMENTAL EFFECTS, CLIMATE, MOISTURE, PRECIPITATION, WIND SPEED, CLOUDINESS, TEMPERATURE, DESIGN, REHABILITATION, STRUCTURE, WEATHER STATION, IDEAM, ASPHALT, CONCRETE, GRANULAR LAYERS, FLOORS, SUBGRADE, FAILURES, SPREADING, CRACKING, IRI, STRAIN, RELIABILITY.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El diseño de pavimentos es un tema importante en el ámbito de la Ingeniería Civil. En el mundo hay muchas estructuras de pavimento que fracasan de forma prematura debido a diseños inadecuados, producto en ocasiones a factores que debieron ser considerados inicialmente en el diseño y en últimas no lo son, como el mismo criterio ingenieril.

Dadas ciertas condiciones ambientales y la cantidad vehículos que pasa sobre un tramo de vía, es difícil anticipar los acontecimientos futuros y cómo estos afectarán la estructura del pavimento. Aunque es imposible conocer el futuro, es posible predecir por medio de la nueva guía de diseño AASHTO 2008 MEPDG el comportamiento de los pavimentos durante la vida de diseño.

Los efectos ambientales y la carga de tráfico son las dos fuerzas más destructivas de los pavimentos, también son los dos más difíciles de cuantificar. Las cargas de impartidas por los vehículos generan desgaste en el pavimento, provocando la degradación en la superficie y la fatiga en el asfalto, así como formación de ahuellamientos en la mezcla asfáltica, base y sub-base.

Los efectos climáticos al igual que el tráfico también causan deterioros, por ejemplo, cambios de temperatura causan fisuras térmicas sobre los pavimentos, envejecen el asfalto...

El elemento climático más perjudicial para un pavimento es la precipitación. Este puede entrar sobre las estructuras en forma de lluvia y causar fisuras, también es capaz de entrar a través de las bermas, carpeta asfáltica y el concreto de cemento portland, generando en últimas considerables inconvenientes (Huang 2004) ^[1].

El agua puede llegar a desgastar capas como la base y sub-base hasta tener contacto con la subrasante y generar disminución de soporte, deformaciones permanentes y el deterioro de la superficie de rodadura.

El aumento y disminución de la humedad puede causar que el suelo se expanda y se contraiga internamente para provocar rompimiento fácil de la estructura del pavimento. En regiones áridas donde el suelo continuamente experimenta ciclos de humedecimiento y secado, es posible que el suelo de subrasante al hincharse y contraerse en respuesta a estos cambios humectantes cause daños similares a la vía como el ciclo de congelación-descongelación.

Todo los factores climáticos, como la precipitación, la temperatura, radiación solar, nubosidad, humedad relativa, junto con las características del material de pavimento, tales como la susceptibilidad a la humedad y los daños por aumento de niveles freáticos, drenaje, potencial de infiltración, tienen un impacto importante sobre los resultados a largo plazo del pavimento ^[2].

Por todo lo anterior este proyecto basa sus esfuerzos en la aplicación de la Guía de diseño de pavimentos mecanicista-empírica AASHTO 2008 en nuestro país, que proporciona modelos útiles de predicción, metodologías de análisis, y un procedimiento de diseño que puede ser ajustado, mejorado y calibrado hacia condiciones locales, y de esta forma proporcionar capacidades de predicción razonables para los diferentes diseños de estructuras de pavimentos ^[3].

La implementación del modelo climático (ICM - MEPDG) en base a tres pisos térmicos de Colombia, es entonces el objeto principal de este proyecto, lo cual permitirá una motivación para todos los ingenieros de pavimentos y entidades gubernamentales dedicadas a ejecutar las políticas y proyectos relacionados con la infraestructura vial a cargo de la Nación hacia la búsqueda de diseños de estructuras de pavimentos capaces de durar en el tiempo y brindar un confort hacia toda la comunidad en general.

1.1. ANTECEDENTES

Desde tiempos remotos el clima en Colombia ha sufrido cambios significativos, el exceso de precipitación, temperatura, radiación solar etc. presentado en los últimos años demuestra la considerable variación presente en el factor climático que rige en nuestro país.

Las fluctuaciones de las diferentes condiciones atmosféricas, se ven caracterizadas por los estados y evoluciones del tiempo, lugar y factores determinantes como la interacción entre los diferentes componentes del denominado sistema climático (atmósfera, hidrosfera, litosfera, criósfera, biosfera y antropósfera).

Grandes áreas de la tierra han sufrido fuertes variaciones como parte normal del clima, especialmente en las zonas áridas y semiáridas, donde la precipitación experimenta cambios significativos.

Las transiciones bruscas observadas en el clima durante las últimas décadas en todo el mundo se le llama cambio climático, efecto que da lugar al establecimiento de un nuevo clima y por lo tanto, a un ajuste en las actividades humanas ^[4].

Los cambios producidos por el clima y las constantes variaciones del mismo fueron uno de los principales motivos que incitaron al estudio del clima y la creación de una guía de diseño, de modo que se conociera con mayor exactitud las diferentes variaciones que generan las propiedades hídricas y térmicas sobre las características estructurales de los materiales de un pavimento ^[5].

Otro de los porqués del cambio fueron las grandes diferencias que existen entre la guía AASHTO 93 y la MEPDG. Puesto que la guía AASHTO 1993 solo evalúa un indicador de desempeño (Índice de Servicio Presente "PSI"), mientras que el

MEPDG predice múltiples indicadores de rendimiento y proporciona un vínculo directo entre los materiales, diseño estructural, construcción, el clima, el tráfico y los sistemas de gestión de pavimentos.

Todas las diferencias que generaron el cambio de metodología de diseño de estructuras de pavimentos se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 1. Diferencias entre la AASHTO 1993 y MEPDG 2008.		
Parámetro	MEPDG 2008	AASHTO 1993
Tipo de pavimentos		
Software de fácil uso	Si	Si
Diseño de Pavimentos (flexibles y rígidos)	Si	Si
Funcional para la Rehabilitación de Pavimentos Flexibles y rígidos	Si	Si
Entradas		
Niveles jerárquicos de entrada 1, 2 y 3	Si	No
Trafico		
Espectros de Carga	Si	No
ESALs 18-kip	Si	Si
Distribución del tráfico de forma horaria, diaria y mensual	Si	No
Desplazamiento lateral por trafico	Si	No
Velocidad del tráfico (Tipo de carga)	Si	No
Análisis de daños por efecto de vehículos pesados	Si	No
Clima		
Consideración de Clima Húmedo de Heladas	Si	Sí, solo en Ottawa, Illinois
Consideración del clima del medio-oeste	Si	No
Consideración de clima cálido, seco ó húmedo	Si	No
Consideración de Climas con altas temperaturas	Si	No
Consideración de clima costero	Si	No
Consideración de intensas heladas	Si	No
Predicción:		
Comportamiento de la mezcla asfáltica, concreto de cemento portland y materiales granulares	Si	No
Piel de cocodrilo y fisuramiento por fatiga longitudinal	Si	No
IRI, Ahuellamiento y fisuramiento térmico	Si	No
Fisuramiento transversal	Si	No
Desnivel de Juntas y Punzonamiento	Si	No

Diferencias entre la AASHTO 1993 y MEPDG 2008		
Parámetro	MEPDG 2008	AASHTO 1993
Credibilidad en los diferentes diseños y soluciones	Si	No
Caracterización del Material		
Niveles jerárquicos de entrada	Si	No
Caracterización del material a utilizar	Si	No
Consideración a corto y mediano plazo del endurecimiento por envejecimiento del AC	Si	No
Módulos variables de la MDC y del PCC por variación de temperaturas frecuencias de carga	Si	No
Ajuste del módulo resiliente del material sin consolidar por variación de la humedad durante toda la vida de diseño	Si	No, solo considera las variaciones estacionales del módulo
Caracterización del material granular que conforma el MDC y el PCC	Si	No
Calibración de Modelos		
Calibración y validación de modelos a nivel nacional	Si	No, solo los datos de pruebas de carreteras realizados por la AASHTO
Tiempo para la representación y recolección de los datos utilizados en la calibración	Hasta 14 años	Solo 2 años para la representación y recolección de los datos (PSI)
Repeticiones del tráfico utilizado en la calibración	Hasta 27 años	Solo 1.1 millones de ESALs

FUENTE: Implementation of the MEPDG for Flexible Pavements in Idaho. National Institute for Advanced Transportation Technology University of Idaho.

Las diferencias a grandes escalas entre los métodos anteriormente planteados dejaron al descubierto la falta de desarrollo en infraestructura vial y el desconocimiento del comportamiento que podía generarse en las estructuras de pavimentos por la acción de los agentes externos.

En las estructuras de pavimento la humedad y la temperatura siempre han sido las dos variables climáticas que accionan y afectan rápidamente las capas y propiedades de subrasante y por tanto su capacidad de soporte. Las incertidumbres y efectos negativos generados por el factor clima sobre el diseño de los pavimentos se vio reflejado indudablemente en la Guía de Diseño de estructuras de pavimentos AASHTO 1993, considerada por muchos como uno de los métodos de diseño más utilizados en los EE.UU. y los diferentes países del mundo.

Desde principios de los años 60 hasta 1993, todas las versiones de diseño de AASHTO se basaron en las limitadas ecuaciones empíricas resultantes de la AASHO Road Test realizadas a finales de los 50. Fue a partir de 1986 que se visualizó la necesidad de tener una nueva guía de diseño de pavimentos basada en los conceptos mecanicistas. Fue entonces cuando la “AASHTO Joint Task Force on Pavements”, la “Federal Highway Administration” y el “National Cooperative Highway Research Program” patrocinaron el desarrollo de un procedimiento de diseño ME (Mecanístico – Empírico) bajo el proyecto denominado NCHRP 1-37A.

El objetivo principal del proyecto 1-37A fue el desarrollar una guía para el diseño y rehabilitación de pavimentos que estuviera basada en los modelos mecanísticos existentes y que reflejara el estado del arte tanto en pavimentos flexibles como rígidos, dando como resultado la guía denominada MEPDG (Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide).

La guía de diseño Mecanístico – Empírico MEPDG se completó en 2004 y fue lanzada al público para su revisión y evaluación. La revisión formal de la guía se realizó bajo el proyecto NCHRP 1-40A dando como resultado varias mejoras, muchas de las cuales se han incorporado a la MEPDG bajo el proyecto 1-40D

igualmente de la NCHRP. La cual dio como resultado la versión 1.0 del software MEDPG y la actualización del manual de diseño.

Finalmente la versión 1.0 fue presentada a la NCHRP, FHWA y a la AASHTO para ser considerada como la versión provisional de la nueva guía AASHTO ME y simultáneamente muchos estados de la unión americana compartieron información y experiencias con la finalidad de acelerar la implementación de esta, ya que estaba previsto que esta fuera la única y definitiva guía AASHTO en un plazo no mayor a dos años. Todo esto hizo que algunos estados comenzaran a implementarla mediante capacitación de personal y recopilación de datos de entrada, así como equipos de ensayos y la adaptación de tramos de prueba para la calibración regional ^[6].

La MEPDG se caracteriza por ser el primer método de diseño capaz de considerar las propiedades térmicas como parámetros de entrada y sus efectos sobre la capacidad de servicio de los pavimentos. La Figura 1 muestra el proceso de diseño Mecánico-empírico en un diagrama de flujo básico ^[7].

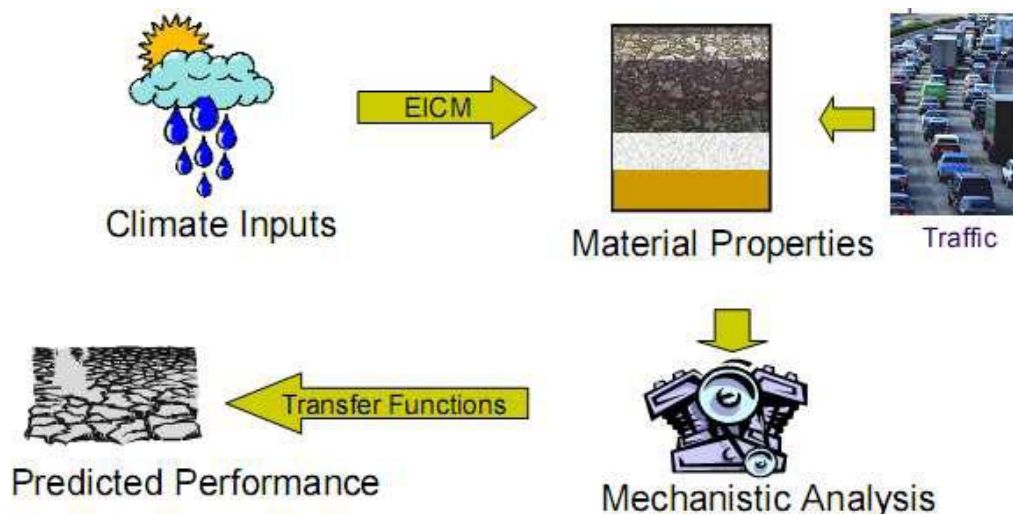


Figura 1. Procesos de Diseño ME.

FUENTE: The Effect of Environmental Factors on the Implementation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG).

El software incorporado dentro de la guía es una herramienta avanzada para el diseño y análisis de estructuras de pavimentos nuevas y a ser rehabilitadas.

Este calcula de manera mecánica las respuestas de la estructura de pavimento (tensiones, deformaciones y deflexiones), utilizando para ello la teoría elástica multicapa y el software JULEA para el análisis elástico lineal y de elementos finitos en pavimentos flexibles. Para pavimentos rígidos se utiliza el software ISLAB2000, así mismo utiliza un modelo climático con extensión ICM, el cual sirve para ajustar los módulos de las capas del pavimento a lo largo del periodo de análisis, este modelo ICM calcula las condiciones de temperatura y humedad de la estructura del pavimento de forma horaria ^[8].

Los esfuerzos realizados para alcanzar mejores diseños permitieron crear el modelo climático ICM (input climate model) de la MEPDG. En sus inicios este modelo solo predijo los módulos tanto en mezclas asfálticas, concreto hidráulico y los suelos de subrasante, además de ayudar a calcular las deformaciones verticales dependientes del tiempo.

Este modelo se perfeccionó de modo que calculara el contenido de humedad de las diferentes capas que conforman la estructura de pavimento aplicando para ello una variación mensual para el ajuste de los módulos y el cálculo de las respuestas estructurales, de esta forma se logró calcular el daño por fatiga, el fisuramiento térmico y la deformación permanente.

El ICM utiliza cinco variables climáticas que son: temperatura, precipitación, velocidad del viento, nubosidad y la profundidad del nivel freático, estas fueron utilizadas en los estados unidos para una calibración de más de 800 estaciones ^[10]. La versión original del modelo climático fue modificado y publicado en 1997 por Larson y Dempsey como ICM versión 2.0. Las modificaciones adicionales se realizaron en 1999, lo que condujo a la creación de la versión ICM 2.1, en esta

versión se realizaron mejoras en la capacidad de predicción de la humedad como parte del desarrollo de la Guía de Diseño ^[11].

Tras la insuficiencia de las versiones 2.0 y 2.1 se desarrolló la Versión EICM 2.6 que mejoró sustancialmente en la capacidad de predicción de la humedad en los diseños de pavimentos ^[12].

Con el objeto de tener una calibración local de la MEPDG y conocer mucho mejor nuestros pavimentos, me di a la tarea de realizar la calibración de uno de los parámetros de entrada más importantes en la AASHTO 2008, el cual es el clima.

Aunque muchos aspectos e insumos son necesarios para tener una calibración total de la MEPDG, se realizó un esfuerzo para realizar la implementación del ICM en base a tres pisos térmicos presentes en nuestro territorio colombiano, utilizando los registros meteorológicos de algunas estaciones del país que administra el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde tiempos remotos en nuestro país se ha tratado de mejorar la infraestructura vial de uso diario, las cuales vienen a ser las generadoras de transporte, expansión comercial, conectividad etc, y que tienen vital importancia porque son indicadores del grado de desarrollo de los países que quieren integrarse social y económicamente.

En un intento por atraer inversión, generar empleo y estimular el crecimiento económico, Colombia en los últimos años ha ido aumentando sus asignaciones presupuestales para la construcción de carreteras y la expansión de la red vial del país. Esta enorme inversión pública en infraestructura debe ir acompañada de prácticas y diseños satisfactorios de estructuras de pavimentos que requieren siempre la ejecución de numerosas tareas complejas y generalmente deben hacerse de forma iterativa.

Es común que en los últimos años se hayan evidenciado deficiencias en materia de diseños y rehabilitación de las estructuras de pavimentos, puesto que no se han tenido a la mano los conocimientos necesarios, recursos y métodos de diseño capaces de garantizar el cumplimiento de la vida útil para la cual se diseñan las estructuras de los pavimentos.

La Guía de Diseño de pavimentos mecánico-empírico (MEPDG) desarrollada bajo el proyecto NCHRP 1-37A, resulta ser la manera más exitosa y fácil de realizar lo que para nosotros antes parecía complejo.

La problemática fundamental de este proyecto es entonces implementar el modelo climático ICM que incorpora la MEPDG para tres pisos térmicos, utilizando los registros Meteorológicos de la entidad encargada de la obtención, captación y

ordenamiento de esta información en nuestro país “IDEAM”, con el objeto de que se prediga o simulen los cambios en el comportamiento y las características de las superficies de rodadura y los materiales que la conforman.

PREGUNTA DE INVESTIGACION

¿Es indispensable realizar una calibración del modelo Climático ICM para la nueva Guía de diseño de estructuras de pavimentos AASHTO 2008 (MEPDG)?

1.3. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo nace de la necesidad de estudiar el comportamiento de la variable climática en el diseño de los pavimentos tanto rígidos como flexibles y de esta forma ayudar a subsanar los daños de forma prematura que se han venido presentando sobre estos en nuestro país.

Por lo anterior resulta indispensable realizar la implementación de la nueva Guía de Diseño mecanicista-empírico AASHTO 2008 (MEPDG) en Colombia para dejar atrás los inconvenientes generados por la utilización de métodos que no tienen en cuenta las múltiples variables de entrada y que son fundamentales para predecir el comportamiento de todas y cada una de las capas que conforman la estructuras de los pavimentos.

Con este proyecto se beneficiarán todos los ingenieros dedicados al diseño de pavimentos y que están involucrados en los diversos proyectos de mantenimiento de carreteras con pavimentos asfálticos y rígidos, así como estudiantes e ingenieros interesados en conocer esta área de la ingeniería y a los usuarios permanentes de las diferentes redes viales que conforman el país.

1.4. ALCANCE

El presente trabajo tiene como meta principal la calibración del factor climático que integra la MEPDG para conocer el actuar de los pavimentos frente a este factor y de esta forma impulsar a otros ingenieros involucrados en el área del diseño de estructuras de pavimentos en la calibración total del mismo y de los demás factores que incorpora esta nueva guía de diseño.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar el modelo climático ICM en Colombia para tres pisos térmicos, de modo que se usen en el método Mecánico - Empírico de la AASHTO 2008 (MEPDG).

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recoger de la entidad meteorológica del país los registros de temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, nubosidad y la radiación solar para un periodo de tiempo determinado.
- Realizar una base de datos de todos los registros meteorológicos a estudiar, para generar consigo la salida de forma recopilada de los diferentes archivos con extensión .icm que emplea el MEPDG.

- Analizar detalladamente las salidas que arrojan los respectivos modelamientos para así elaborar comparativos de resultados.
- Establecer que tipos de fallas son más sensibles a los efectos del clima en las zonas estudiadas y las recomendaciones prácticas para garantizar el cumplimiento de los diferentes criterios de desempeño.
- Expandir la MEPDG en Colombia y la necesidad de estudiar sus parámetros a fondo para que sea de vital importancia dentro del medio y de esta forma conocer un poco más cómo se comportan nuestros pavimentos a lo largo del tiempo.

1.6. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para llevar a cabo el presente proyecto de maestría se tuvieron en cuenta los siguientes capítulos:

El Capítulo 1 ofrece una visión general del estudio, que recoge la introducción, antecedentes, el planteamiento del problema, justificación, alcances, objetivos y la metodología de investigación llevada a cabo para cumplir con cada uno de las metas planteadas.

En el capítulo 2 se establece el marco conceptual utilizado.

El capítulo 3 es una exploración de la literatura pertinente para llevar a cabo el desarrollo del proyecto, en este se realiza una visión general de los principios básicos necesarios para entender la teoría detrás de la incorporación del modelo climático en la MEPDG. No se pretende que sea exhaustiva, sin embargo, es suficiente para que cualquier lector entienda cómo el factor climático representa un papel importante en los diseños de pavimentos.

El capítulo 4 aborda la nueva guía de diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos AASHTO 2008. Su evolución, diferentes modelos, factores de diseño, metodología y adopción.

En el capítulo 5 se encuentra el principal trabajo realizado en este proyecto, en el cual se establecen los diversos factores climáticos, se presenta el modelo ICM, la entrada y ordenamiento de los datos recogidos en la entidad meteorológica del país. Además se proponen tres ejemplos de diseño con los archivos climáticos generados utilizando el enfoque Mecánico – empírico tanto para pavimento flexible como rígido.

También se plantea que tipos de fallas son más sensibles a los efectos del clima en las zonas de estudio y las recomendaciones prácticas para garantizar el cumplimiento de los diferentes criterios de desempeño.

En el capítulo 6 se exponen las conclusiones y posibles recomendaciones que se deben tener en cuenta en los diferentes diseños llevados a cabo en la MEPDG utilizando los modelos climáticos generados.

Por último, en el capítulo 7 se plantea toda la bibliografía empleada para la elaboración del proyecto.

CAPÍTULO 2

MARCO CONCEPTUAL: GLOSARIO

A

AHUELLAMIENTO: depresión en la banda de rodamiento, la cual puede generar levantamientos en las zonas adyacentes. Se produce como resultado de la deformación permanente de cualquiera de las capas del pavimento o la subrasante a causa de la consolidación o movimiento lateral de los materiales, debido a las cargas del tránsito. Este ahuellamiento puede ser producido por deformación plástica de la mezcla asfáltica a alta temperatura o por deficiente compactación durante la construcción. El ahuellamiento calculado en el MEPDG se mide en pulgadas (mm) y corresponde a la máxima profundidad medida del ahuellamiento entre las dos trayectorias del neumático. El MEPDG también calcula la profundidad del ahuellamiento dentro de las capas asfálticas, capas granulares no ligadas y del terreno de fundación.

ALTITUD: distancia vertical de un punto de la Tierra respecto al nivel del mar, llamada elevación sobre el nivel medio del mar, en contraste con la altura, que indica la distancia vertical existente entre dos puntos de la superficie terrestre.

B

BASE: Es una capa de material grueso granular tratado o no tratado que subyace a la carpeta de rodadura y presenta mejores propiedades estructurales que la capa de subbase granular. En algunos casos permite la circulación de vehículos mientras se construye la capa de rodadura. Esta capa es indispensable para

cualquier sistema pavimentos, ya que en ella, después de la capa asfáltica es donde se presenta la mayor disipación de esfuerzos.

La carpeta asfáltica es colocada sobre de ella porque la capacidad de carga del material friccionante es baja en la superficie por falta de confinamiento.

Regularmente la capa de base además de la compactación necesita otro tipo de mejoramiento (estabilización) para poder resistir las cargas del tránsito sin deformarse y además de transmitir las en forma adecuada a las capas inferiores.

C

CARPETA ASFALTICA: Son capas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla homogénea de materiales pétreos seleccionados y cemento asfáltico, modificado o no, elaborada en una planta estacionaria, con las proporciones adecuadas y utilizando calor como vehículo de incorporación; para proporcionar al usuario una superficie de rodamiento uniforme, cómoda, segura, bien drenada y con características de resistencia al deslizamiento e interperismo.

CBR (California Bearing Ratio): medida indirecta de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad cuidadosamente controladas que tiene su aplicación principalmente en el diseño de pavimentos flexibles.

CLIMA: conjunto de condiciones atmosféricas, típicas de una región específica que varían según las regiones y que están caracterizadas por estadísticas a largo plazo (valores medios, varianzas, probabilidades de valores extremos, etc) de los elementos meteorológicos en dicho lugar.

CRITERIOS DE DISEÑO O VALORES UMBRALES: estos valores son aquellos que se utilizan para determinar la vida de la estructura del pavimento y la estrategia de rehabilitación, los cuales son datos que se ingresan al software MEPDG. Estos valores representan la magnitud del deterioro o nivel de rugosidad que desencadenarían algún tipo de actividad de rehabilitación mayor, y que son típicamente decisiones de políticas de mantenimiento.

D

DAÑO INCREMENTAL: el daño incremental (ΔDI) es una relación definida por el número real de aplicaciones de carga por neumático (n), dentro de un intervalo de tiempo, para un nivel de carga y tipo de eje específicos divididos por el número admisible de aplicaciones que existen en el mismo intervalo específico de tiempo. Los indicadores incrementales de daño son posteriormente sumados para determinar el daño acumulado a lo largo del tiempo

DEFORMACION RADIAL ADMISIBLE DE TRACCION EN LA FIBRA INFERIOR DE LA CARPETA ASFALTICA (ϵ_t): es la que se presenta en la base de la capa asfáltica de una estructura de pavimento flexible debido a la acción de las cargas, generalmente impuestas por el tránsito, esta magnitud de la deformación de tracción (ϵ_r) se obtiene mediante la modelación de la estructura y el análisis de la mecánica de los pavimentos, para lo cual se deben tener los espesores (h_i) y la caracterización de las diferentes capas del modelo estructural (E_i y μ_i), así como las características del sistema de carga (carga aplicada, área de contacto, presión de contacto y separación entre ejes de carga), y la determinación de su magnitud se realiza utilizando ecuaciones, ábacos o programas de cómputo.

DEFORMACION VERTICAL ADMISIBLE DE COMPRESION SOBRE LA SUBRASANTE (ϵ_z): se produce por el esfuerzo vertical de compresión generado por la acción de las cargas de tránsito en el pavimento flexible, que causa

deformación o ahuellamiento en la estructura del pavimento flexible, y por lo tanto, daños estructurales y funcionales, cuando su valor excede los valores admisibles.

DESNIVEL DE JUNTAS O ESCALONAMIENTO: es una falla provocada por el tránsito que corresponde a un desnivel de la losa en su junta con respecto a una losa vecina. El escalonamiento de las juntas puede ocasionar fractura de la losa, si este se combina con bombeo que implica pérdida del material de base.

Dado que el escalonamiento puede variar considerablemente de junta a junta, el MEPDG predice el escalonamiento promedio de todas las juntas transversales en una sección de pavimento. La unidad de medida del escalonamiento calculado por la MEPDG es la pulgada. El escalonamiento es un mecanismo de deterioro importante del JPCP debido a su impacto sobre la calidad de rodadura.

DETERIORO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO: se origina por la pérdida de la capacidad estructural de una o más de sus capas componentes y/o la pérdida de capacidad estructural del suelo de fundación. Este deterioro se puede manifestar en forma de deformaciones o fisuramiento.

DETERIORO FUNCIONAL DEL PAVIMENTO: se relaciona principalmente con la calidad de la superficie de éste, y afecta negativamente la serviciabilidad (confort y costo de operación del usuario) y la seguridad de circulación. Entre este tipo de deficiencias se encuentran la rugosidad, fallas superficiales y pérdida de fricción.

E

ESPECTROS DE CARGA: se definen como la relación entre el número de un tipo de eje con un rango de carga y el número total de ese tipo de eje, expresado en porcentaje, se calculan usualmente para cada tipo de eje: sencillo dual, doble y

trídem. Los espectros de carga son una representación realista de la distribución de cargas.

F

FACTORES DE CALIBRACIÓN: en el MEPDG se utilizan dos factores de calibración: global y local. Estos factores de calibración son aquellos que permiten aplicar ajustes a los coeficientes y/o exponentes de la función de transferencia para eliminar los sesgos entre los deterioros o fallas de pavimentos medidos y pronosticados. La combinación de factores de calibración (coeficientes y exponentes de las diferentes ecuaciones de predicción de deterioros) también pueden ser utilizados para minimizar el error estándar de la ecuación de predicción.

FALLA POR FATIGA (PIEL DE COCODRILO): la piel de cocodrilo es un conjunto de fisuras interconectadas, las cuales se producen por la falla por fatiga de las capas asfálticas a causa de la acción repetida de las cargas del tránsito. Este fisuramiento se inicia en la parte inferior de dichas capas donde los esfuerzos de tensión y las deformaciones a causa de las cargas del tránsito alcanzan su mayor magnitud. En el MEPDG el fisuramiento tipo piel de cocodrilo se calcula como un porcentaje de la superficie total del carril.

FISURAMIENTO LONGITUDINAL: son aproximadamente paralelas al eje de la calzada, están motivadas por contracción de las capas asfálticas a bajas temperaturas, endurecimiento del asfalto o reflejo de fisuras de capas inferiores. Las fisuras longitudinales se inician en la superficie del pavimento de HMA y en un principio aparecen como fisuras longitudinales cortas que luego se van conectando longitudinalmente con las continuas cargas de los camiones. Este tipo de fisuramiento no está relacionado con las cargas de tránsito, aunque es evidente que estas pueden aumentar su severidad. El fisuramiento longitudinal en el

MEPDG se expresa como el total lineal en pies por milla (metros por kilómetro), incluyendo ambas huellas de neumáticos.

FISURAMIENTO TÉRMICO: Esta forma de deterioro involucra diversos tipos de fisuras, principalmente de tipo transversal, y en bloque, que aparecen en diversas áreas de la superficie del pavimento. Se diferencian de otros deterioros, como fisuramiento longitudinal y fisuramiento piel de cocodrilo, porque se presentan en zonas donde no hay repeticiones permanentes de carga, aun cuando es evidente que éstas pueden aumentar su nivel de deterioro.

Este deterioro se presenta principalmente a causa de la contracción térmica de las capas asfálticas, debido a los ciclos diarios de temperatura. También, por el uso de un tipo de asfalto inadecuado para las características climáticas de la zona.

FISURAMIENTO TRANSVERSAL: es un tipo de fisura que no está relacionada con las cargas por neumático, que es predominantemente perpendicular a la línea central del pavimento y es causada por las bajas temperaturas o ciclos térmicos. Las fisuras transversales en el MEPDG se expresan en pies por milla (metros por kilómetro) para el caso de los pavimentos flexibles.

En cambio el fisuramiento transversal de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo generado en los pavimentos rígidos es calculado por el MEPDG como un porcentaje del número total de las losas. El parámetro de salida (porcentaje de losas con fisuras transversales) entregados en los reportes MEPDG, además combina el porcentaje de losas que presentan fisuras transversales arriba hacia abajo y viceversa.

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA: es la parte empírica del modelo de predicción de deterioro o falla que relaciona el parámetro crítico de respuesta del pavimento, ya sea directamente o a través del concepto de daño, para los deterioros del pavimento.

H

HELADAS: fenómeno climático que consiste en un descenso de la temperatura ambiente a niveles inferiores al punto de congelación del agua y hace que el agua o el vapor que está en el aire se congele depositándose en forma de hielo en las superficies.

HUMEDAD: El término humedad se emplea para designar la cantidad de vapor de agua contenida en un volumen dado de aire. El agua está mezclada con aire de forma homogénea en el estado gaseoso. Al igual que cualquier sustancia, el aire tiene una capacidad limitada de absorción, que se conoce como saturación. Por debajo del punto de saturación, el aire húmedo no se distingue a simple vista del aire seco, es absolutamente incoloro y transparente; sobre el límite de saturación, la cantidad de agua en exceso se precipita, ya sea en forma de neblina o bien como pequeñas gotas de lluvia. La humedad del aire es variable y depende fundamentalmente del grado de evaporación de los océanos u otras fuentes de agua.

HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE: Es el vapor de agua que existe en una masa de aire, expresado como un porcentaje de la cantidad total que existiría si el aire estuviese saturado a esta temperatura.

Se expresa en unidades enteras que van de cero (0) hasta el 100%. Los valores de humedad relativa dependen necesariamente de la temperatura del momento. En las zonas tropicales continentales, en donde las variaciones de la temperatura durante el día son generalmente grandes, la humedad relativa cambia considerablemente en el curso del día.

I

IRI: medida de la influencia de la uniformidad del perfil longitudinal de la carretera sobre la calidad de la rodadura, que representa la vibración de un vehículo típico de pasajeros como resultado de la falta de regularidad de la superficie de la vía. Se define como la relación entre el movimiento acumulado entre las masas amortiguada y no amortiguada de un modelo matemático denominado “*cuarto de carro*” (cuya respuesta es similar a la de un automóvil) que circula a una velocidad de 80 kilómetros por hora, y la distancia recorrida. Este valor se expresa corrientemente en m/km. En el MEPDG el IRI se predice de forma empírica como una función de los deterioros en el pavimento. Los tipos de deterioros o falla del pavimento que se incorporan en la predicción del IRI dependen de la función del pavimento o tipo de rehabilitación que se considere. La regularidad superficial o IRI se expresa en el MEPDG en pulgadas por millas.

L

LATITUD: es la distancia angular entre la línea ecuatorial (el ecuador), y un punto determinado del planeta, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra dicho punto. Se abrevia con lat. Según el hemisferio en el que se sitúe el punto, puede ser latitud norte o sur.

La latitud proporciona la localización de un lugar, en dirección Norte o Sur desde el ecuador y se expresa en medidas angulares que varían desde los 0° del ecuador hasta los 90°N del polo Norte o los 90°S del polo Sur.

La latitud se mide en grados sexagesimales (representados por el símbolo ° inmediatamente arriba y a la derecha del número, mientras que las subdivisiones o fracciones de los grados se representan con ' que significa minuto sexagesimal y " que significa segundo sexagesimal), entre 0° y 90°.

LONGITUD: en cartografía, expresa la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y el meridiano que se tome como 0° (es decir el meridiano base) medida a lo largo del paralelo en el que se encuentra dicho punto, una circunferencia cuyo centro es la intersección del eje de la Tierra con el plano del citado paralelo. Habitualmente en la actualidad el meridiano base es el meridiano de Greenwich (observatorio de Greenwich). La longitud geográfica se mide en grados (°), minutos (') y segundos (") generalmente la cartografía usa grados sexagesimales, minutos sexagesimales y segundos sexagesimales.

LOSA DE CONCRETO: son elementos estructurales cuyas dimensiones en planta son relativamente grandes comparadas con su espesor y que está formado por una mezcla homogénea de cemento Pórtland, agua, arena, grava, aire y en casos especiales aditivos; para obtener un material fluido o plástico, que le permite ser manejado con facilidad, desde su mezclado hasta su colocación, compactación o moldeado, conservando su homogeneidad, y que al endurecer, obtiene con el tiempo determinadas características de dureza capaz de soportar y transmitir uniformemente las cargas.

M

MES DE CONTRUCCIÓN Y MES DE APERTURA AL TRÁNSITO: las fechas de finalización de la construcción y de apertura al tránsito (mes y año) son características del lugar de construcción. Los meses de construcción en el MEPDG representan el mes y el año en que las capas no ligadas han sido compactadas y terminadas (mes de construcción de la base/subrasante), y el mes y año en que el HMA o PCC fue colocado para cubrir dichas capas (mes de construcción del pavimento).

El mes de apertura al tránsito representa el mes y año en que la carretera el mes y año en que la carretera se abre al público. Estas fechas están asociadas a las cargas mensuales de tránsito, a los datos climáticos mensuales que afectan a

todos los valores mensuales del módulo de la subrasante y la capa, y a los modelos de envejecimiento del material.

MÉTODO ANALÍTICO O RACIONAL PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS: los métodos analíticos de diseño estructural de pavimentos son aquellos que se basan en el estado de esfuerzos y deformaciones producido por las solicitaciones que se consideren (cargas, temperatura, etc.) y permiten el diseño óptimo y durable de pavimentos, ya que, se puede verificar su vida útil con respecto a las admisibilidades propias de cada capa del pavimento y los respectivos modelos de respuestas y análisis de fallas.

El modelo de respuesta para el caso de los pavimentos flexibles es la utilización de la teoría de la elasticidad y aplicación de las leyes de fatiga de las capas, integrando modelos matemáticos de Burmister, y las rutinas de cálculo Alize III.

Y para el caso de los pavimentos rígidos se usa la teoría de la elasticidad, integrando modelos matemáticos de Hogg, Westergaard y Teorías de Placas.

MÉTODO EMPÍRICO PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS PAVIMENTOS: son todos aquellos que correlacionan el comportamiento de los pavimentos in situ, a través de observaciones y mediciones en campo, con los factores que causan el mecanismo de degradación de dichos pavimentos. Esta clase métodos de diseños además de no tener en cuenta parte de la acumulación de la deformación permanente que puede ser originada en las capas granulares tampoco permite ser adaptada a condiciones distintas a las que fueron estudiadas para su desarrollo e implementación. El método más popular de diseño empírico es la Guía de diseño AASHTO 93.

MÉTODO MECANÍSTICO-EMPÍRICO PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTOS: procedimiento de diseño y análisis que calcula las respuestas del pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) y utiliza esas respuestas para calcular el incremento de daño a través del tiempo y la relación empírica del daño

acumulado a los deterioros o fallas observadas en el pavimento. Este método de diseño corresponde a la actual guía de diseño AASHTO 2002, el cual incluye el software MEPDG para el diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados.

MODELO DE RESPUESTA ESTRUCTURAL: es un modelo Mecanístico basado en principios fundamentales de ingeniería y se utiliza para calcular las respuestas críticas del pavimento (deflexiones, esfuerzos y deformaciones unitarias). El programa de análisis elástico de capas de Jacob Uzan (Jacob Uzan Layered Elastic Analysis – JULEA) es el modelo de respuesta estructural utilizado para los pavimentos flexibles, en tanto que para los pavimentos rígidos, se utiliza el programa ISLAB2000.

MODULO DINAMICO: relación entre el esfuerzo y aplicado bajo carga repetida (condición dinámica) y la deformación elástica recuperable. $E_d = \sigma_d / \epsilon_r$

Mr (Modulo Resiliente): propiedad que caracteriza los materiales granulares en el método AASHTO. Este se considera una medida de las propiedades elásticas del suelo que presenta ciertas características no lineales, constituye además un medio para evaluar los materiales de construcción de pavimentos.

N

NIVEL FREÁTICO: corresponde al lugar en el que se encuentra el agua subterránea. En este nivel la presión de agua del acuífero es igual a la presión atmosférica. La profundidad a la que se encuentra el nivel freático varía de acuerdo con la pluviosidad y otros factores. También se conoce como capa freática, manto freático, napa freática, napa subterránea, tabla de agua o simplemente freático.

NUBOSIDAD: es la fracción de cielo cubierto con nubes, en un lugar en particular.

Según las normas meteorológicas actuales, la nubosidad se expresa en octas, u octavos de la bóveda celeste. La nubosidad es máxima en invierno y mínima en verano.

P

PAVIMENTOS: estructura vial formada por una o varias capas de materiales seleccionados que se construyen técnicamente sobre la subrasante, y es capaz de resistir las cargas impuestas por el tránsito y la acción del medioambiente, así como transmitir al suelo de apoyo o fundación esfuerzos y deformaciones tolerables, además de proporcionar la circulación de los vehículos con rapidez, comodidad, seguridad y economía.

PAVIMENTOS FLEXIBLES: son todos aquellos que están formados por una capa bituminosa apoyada sobre una o varias capas de gran flexibilidad (base y subbase) que transmiten los esfuerzos al terreno de soporte o fundación mediante un mecanismo de disipación de tensiones, las cuales van disminuyendo con la profundidad.

PAVIMENTOS FLEXIBLES CONVENCIONALES: son pavimentos flexibles que consisten en superficies relativamente delgadas (menos de 6 pulgadas de espesor) y capas de base granular no ligadas (piedra triturada o grava, y mezclas de agregados del suelo). Los pavimentos flexibles convencionales también pueden tener una capa subrasante estabilizada o tratada.

PAVIMENTOS RIGIDOS: son aquellos que están constituidos fundamentalmente por una losa de concreto hidráulico de gran rigidez, apoyada sobre la subrasante o una capa de material seleccionado que se denomina subbase del pavimento rígido. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico, así como a su elevado

módulo de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia.

PERIODO DE ANALISIS (PA): es un periodo convenientemente planeado durante el cual es indeseable una reconstrucción de la vía.

PERIODO DE DISEÑO: está definido como el periodo durante el cual está previsto, con alto grado de confiabilidad, que la vía sea útil y no requiera ningún mantenimiento.

PRECIPITACIÓN: es cualquier forma de hidrometeoro que cae del cielo y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno incluye lluvia, llovizna, nieve, aguanieve, granizo, pero no incluye neblina ni rocío, que son formas de condensación y no de precipitación. Es una parte importante del ciclo hidrológico, responsable del depósito de agua dulce en el planeta y, por ende, de la vida en nuestro planeta, tanto de animales como de vegetales, que requieren del agua para vivir. La precipitación es generada por las nubes, cuando alcanzan un punto de saturación; en este punto las gotas de agua aumentan de tamaño hasta alcanzar el punto en que se precipitan por la fuerza de gravedad.

PUNZONAMIENTO: Es la falla más importante en pavimentos de hormigón con armadura continua. El punzonamiento tiene lugar cuando una sección de una losa de hormigón situada entre dos fisuras de contracción muy próximas se rompe y desciende bajo la acción de cargas repetidas. Esto ocurre, en general, en el borde externo del carril más transitado por los camiones. A veces se encuentran evidencias de bombeo cerca de los sectores punzonados. En la calibración global del modelo MEPDG solo están incluidos los punzonamientos de alta y mediana severidad, según lo definido por el LTPP (FHWA 2003). En el MEPDG este tipo de deterioro se expresa como cantidad de punzonamiento de media o alta severidad por cada milla de carril (cantidad por kilómetro, en unidades métricas).

R

RADIACIÓN SOLAR: energía emitida por el Sol que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas y partículas. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

S

SUB-BASE: Es la primera capa de la estructura del pavimento vista desde abajo, dispuesta sobre la subrasante, con el fin de facilitar un buen drenaje en el pavimento y permitir la construcción del resto de la estructura. En esta capa se presenta una disipación parcial de esfuerzos. Se construye con material con menos exigencias y por ende mucho más económico que el utilizado en la base. Cumple además una cuestión de economía ya que, con esta se ahorra dinero al poder transformar un cierto espesor de la capa de base a un espesor equivalente de material de sub-base (no siempre se emplea en el pavimento).

SUBRASANTE: se define como la superficie o terreno de fundación de los pavimentos, pudiendo estar constituida por el suelo natural del corte o de la parte superior de un lleno debidamente compactado.

T

TEMPERATURA DEL AIRE: es una magnitud física que caracteriza el movimiento aleatorio medio de las moléculas en un cuerpo físico. En particular, cuando se habla de la temperatura del aire, se refiere a la medida del estado térmico del aire con respecto a su habilidad de comunicar calor a su alrededor.

V

VELOCIDAD DEL VIENTO: La velocidad del viento determina el desplazamiento del aire en un tiempo determinado. La velocidad del viento es un parámetro muy

variable, tanto en el tiempo como en el espacio. Las velocidades son muy variables durante el transcurso del día y el patrón de comportamiento diario va cambiando durante el año.

VIDA ÚTIL DE DISEÑO: la vida útil de diseño de un pavimento nuevo, reconstruido o rehabilitado es el tiempo transcurrido desde la construcción inicial hasta que el pavimento se ha deteriorado estructuralmente a un punto tal que requiere una reconstrucción o rehabilitación importante. La vida útil de un diseño de prueba en particular va desde la construcción inicial del pavimento hasta que se alcance una condición crítica predefinida para el pavimento. El software puede trabajar con vidas útiles de entre un año y 99 años.

VIENTO: el viento es el movimiento natural del aire. Se determina por la dirección o punto del horizonte desde donde sopla y por su velocidad, de la cual depende su mayor o menor fuerza. Si bien el viento es una cantidad vectorial y se puede considerar una variable primaria por naturaleza, por lo general la velocidad (la magnitud del vector) y la dirección (orientación del vector) se tratan frecuentemente como variables independientes.

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Un pavimento se refiere a la estructura de capas que forman la superficie de una carretera, cuyo objetivo es transmitir de manera adecuada las cargas de los vehículos a la subrasante, brindar confort, seguridad y un respectivo balance económico.

3.1. TIPOS DE PAVIMENTOS

En términos generales, los pavimentos se clasifican en dos categorías, cuyo factor determinante es su reacción a las cargas a las que se ven sometidas. Los tipos de pavimentos pueden ser denominados como flexibles o rígidos.

Pavimentos flexibles, denominados genéricamente como pavimentos de hormigón asfáltico (AC – Asphalt Concrete), son aquellos que están recubiertos con material bituminoso o asfalto. La pavimentación puede hacerse en forma de tratamientos superficiales que abarcan desde una simple y ligera aplicación de cemento asfáltico o emulsión bituminosa, a múltiples aplicaciones de materiales asfálticos sobre las que se distribuyen agregados pétreos, cuya finalidad fundamental es prolongar la vida de las vías. También en base a una mezcla de asfalto caliente (HMA) que son utilizadas generalmente en las vías con volúmenes de tránsito considerables.

Estos tipos de pavimentos son llamados "flexible", ya que la estructura total del pavimento se deflecta o flexiona, debido a las cargas de tráfico y se compone generalmente de varias capas de materiales.

Por otra parte, los pavimentos rígidos se componen de una placa de concreto de cemento portland. Tales pavimentos son sustancialmente "rígidos" en comparación de los pavimentos flexibles debido al alto módulo de elasticidad del material de concreto hidráulico. Además, estos pavimentos pueden ser reforzados con acero eliminando así las

Los pavimentos flexibles y rígidos distribuyen las cargas recibidas del tránsito de diferentes maneras. La placa del pavimento rígido por su alta rigidez tiende a distribuir la carga sobre un área relativamente amplia de la subrasante. La losa de concreto absorbe la mayor parte de la carga impuesta por el tránsito.

El pavimento flexible en cambio utiliza la capa asfáltica y distribuye las cargas sobre un área más pequeña. Es por eso que este tipo de pavimentos basa su estructura sobre una combinación de capas para la transmisión de las cargas a la capa de subrasante, de modo que estas sean mínimas.

Estos mecanismos de distribución de cargas se ilustran en las figuras 2 y 3.

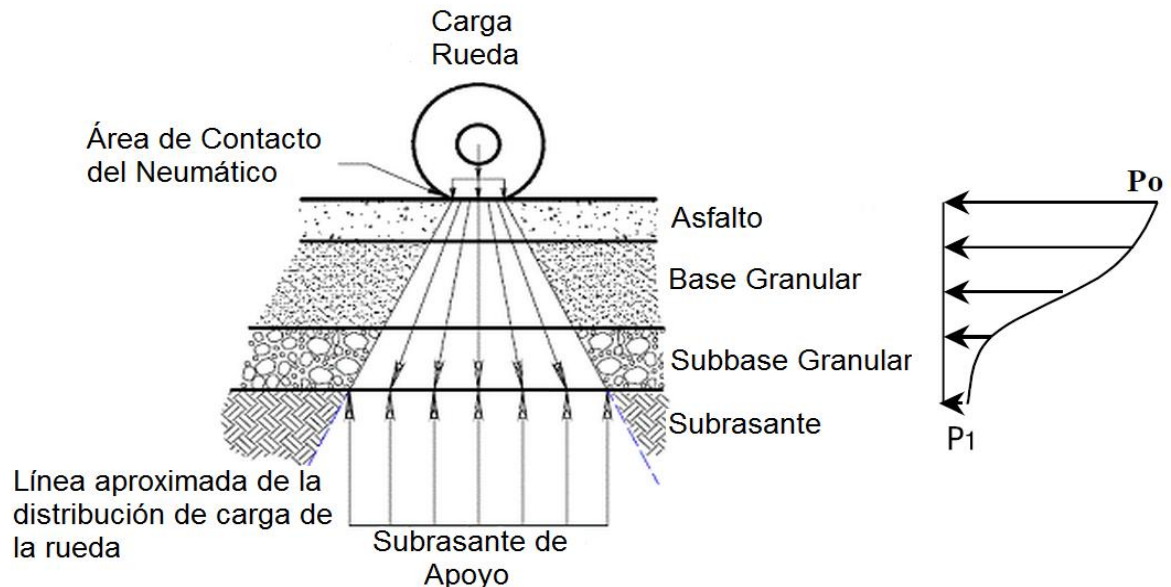


Figura 2. Distribución de la carga en un pavimento flexible

FUENTE: Propia.

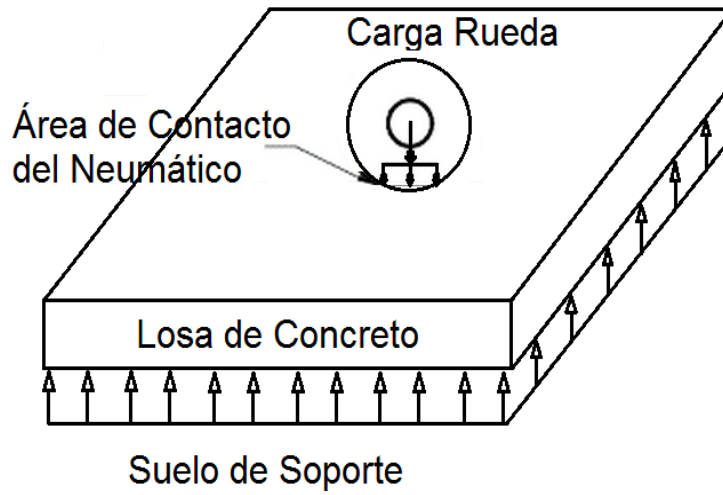


Figura 3. Distribución de la carga en un pavimento Rígido.

FUENTE: Propia.

3.2. FILOSOFÍA DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS

El diseño de los pavimentos es un acto de optimización que busca desarrollar la combinación más económica de las capas del pavimento (en relación tanto con espesor y material de gradación) para adaptarse a la base del suelo y el tráfico durante toda la vida de diseño. Cualquiera que sea el enfoque de diseño empleado, es necesario considerar que como estructuras, los pavimentos están sometidos a cargas de tráfico en movimiento y repetitivo con lo que se genera una cantidad de daño que se acumula para causar un fallo final del pavimento.

De lo anterior, se puede indicar que los pavimentos están "diseñados para fallar, ya que, es un hecho que la carga de tránsito que se acumula con el tiempo conduce a un deterioro inaceptable en algún punto del tiempo ^[13]. Esto es lo que diferencia al diseño de pavimentos con otros diseños de ingeniería que van a durar para siempre. En este sentido, el concepto de "periodo de diseño" debe ser definido como el período en el que un pavimento no necesita una reconstrucción o reparación importante.

3.3. RESPUESTA Y DESEMPEÑO DE LOS PAVIMENTOS

La respuesta de un pavimento se refiere al análisis mecánico, el cual se basa en la respectiva reacción que este se produce cuando se le es aplicada la carga de tráfico y además entra en contacto con las influencias ambientales.

Esto implica el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en los puntos críticos del pavimento. Es evidente que este procedimiento determina un conocimiento más acertado de la respuesta que tiene la estructura, y que se supone homogénea, elástico lineal, isotrópica y semi-infinita para el caso de los pavimentos flexibles ^[13]. Gran parte de los primeros trabajos sobre la determinación de la respuesta de los pavimentos se atribuye a Boussinesq y Burmister (flexible) y Winkler y Westergaard (rígido) 1885, que desarrollaron sistemas de ecuaciones en diferentes puntos de la estructura de pavimento y representaron las cargas impuestas por el tránsito de forma distribuida en las distintas dimensiones ^[20, 13].

El desempeño de los pavimentos es una consecuencia de la respuesta y es la medida de las fallas desarrolladas durante la vida de un pavimento ^[25].

Las fallas más comunes son el ahuellamiento, fisuramiento, rugosidad y resistencia al deslizamiento entre otros. A diferencia de la respuesta, el desempeño es mucho más difícil de cuantificar analíticamente debido a la escala de tiempo, la variabilidad, incertidumbre de los parámetros involucrados y la naturaleza repetitiva y acumulativa de los costos requeridos. Por esta razón, a menudo se habla de predicción del rendimiento y en la mayoría de los métodos de diseño se incluye un determinado nivel de confiabilidad (en porcentajes) de forma explícita en el proceso.

Correlacionar el rendimiento con las respuestas del pavimento ha sido un reto para la mayoría de los sistemas de diseño, pero el método Mecanístico-Empírico

ha ganado una amplia aceptación en los últimos años como pionero en este sentido ^[12].

3.4. CONDICIONES FUNCIONALES Y ESTRUCTURALES DE LAS CARRETERAS

Existen dos puntos de vista para realizar la evaluación del estado de una carretera, el cual depende de la percepción básica de los usuarios, ingenieros y otros especialistas involucrados en el proceso de diseño. Para un usuario el aspecto de utilidad también se conoce como el estado funcional, en este sentido, la "calidad de un viaje" está enfocada a juzgar las consideraciones de seguridad (rugosidad, resistencia al deslizamiento, visibilidad) y la emisión de ruido. En general, el usuario de la vía desea siempre minimizar los costes asociados con el uso de la carretera.

Además de la condición funcional, la comunidad de ingeniería de pavimentos se ocupa de la condición estructural, a menudo referido como "capacidad de carga" ²⁶. Este factor estructural involucra los materiales utilizados en la construcción y los espesores de las diversas capas, además está directamente relacionado con los niveles de tránsito esperados sobre la estructura de pavimento. Cualquier evaluación del estado de los pavimentos debe dar como resultado un análisis funcional y estructural.

3.5. ALGUNOS PARADIGMAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS

Como se indicó en el capítulo 1, los métodos de diseño han evolucionado con los años en respuesta a agentes externos como el clima y el tráfico y como una función del avance de la tecnología. Algunos de los procedimientos convencionales de diseño de pavimento utilizados en el pasado fueron los

catálogos, el método de la relación de soporte California (CBR- 1929 T. E. Stanton y O. J. Porter), diseño de pavimentos con la Shell-1978, notas Road 29 y 31 (de origen británico- 1960), el Manual de Diseño de Carreteras III (HDM3- Paterson, 1987) del Banco Mundial, el número de clasificación de Aeronaves (ACN-1981) y la AASHTO 1972, 1986 y 1993 ^[26].

La mayoría de estos procedimientos se basan en datos obtenidos a partir de sitios de prueba, y con ecuaciones matemáticas empíricas que están formuladas para guiar los futuros procesos de diseño. La más famosa de estas pruebas es la realizada por la Oficial Asociación Americana de carreteras estatales (AASHTO) Prueba Road ^[15].

Los diseños en Colombia han sido híbridos, es decir, se han realizado apoyándose de las notas Road, el CBR y en gran parte de la AASHTO. En la mayoría de los países del mundo, los métodos puramente empíricos han sido dominantes, y para comprender más claramente la aplicación del clima en los diseños de pavimentos, se toma prestado de una amplia variedad de áreas como las matemáticas, Ingeniería, física y climatología los diferentes estudios realizados que han servido a lo largo del tiempo para conocer la influencia del clima en el comportamiento de los pavimentos.

En comparación con otros problemas de la ingeniería civil, el diseño de pavimento ha llevado un proceso lento en su separación con los métodos puramente empíricos ^[13]. El uso de métodos analíticos para estimar la respuesta de los pavimentos de concreto de cemento Portland (PCC), se remonta a 1913, cuando Bradbury publicó su trabajo sobre pavimentos de hormigón armado, sin embargo, métodos similares se utilizan hasta ahora en muchas partes del mundo ^[14].

Este retraso en la transición a métodos más actuales de diseño puede atribuirse en parte a la compleja interacción entre las diferentes variables que intervienen en

el diseño de carreteras, como son la inclusión de la carga de tráfico, diseños geométricos, materiales de construcción y factores climáticos ^[15].

En el pasado, varios países han utilizado "Catálogos" como una herramienta de diseño. El más famoso de ellos, es la versión francesa "Catálogos para diferentes tipos de Estructuras de Pavimentos", esta cartilla es una representación tabular sobre la clase de tráfico T_i y la iteración con el suelo S_i ^[16].

Esta última variable es dependiente del tipo de suelo y las condiciones de drenaje. Los catálogos en su forma básica establecen los tipos de materiales requeridos para cada capa (subrasante, subbase, base y mezcla), sus respectivos espesores y por último la carga del tráfico esperado.

Al igual que otros países en Colombia también se utilizaron catálogos para el diseño de pavimentos por medio de regiones climáticas, que estuvieron basadas en la utilización de la temperatura y precipitación.

Este catálogo fue desarrollado en el año 1998 por el actual Instituto nacional de Vías "INVIAS", basándose en los conceptos de la guía de diseño AASHTO 93. El catalogo incluía el diseño de pavimentos y materiales usados en ese entonces, además de factores ambientales, suelos, tránsito y disponibilidad de materiales acordes con la realidad colombiana. El país se dividió en seis regiones climáticas con el fin de que la variable clima se involucrase en forma apropiada en el diseño de las estructuras de pavimentos ^[17, 18 y 19].

Para la obtención de las diferentes regiones empleadas en el diseño con catálogos se tuvo en cuenta una metodología para su respectiva evaluación representada en el siguiente esquema ^[17, 18 y 19].

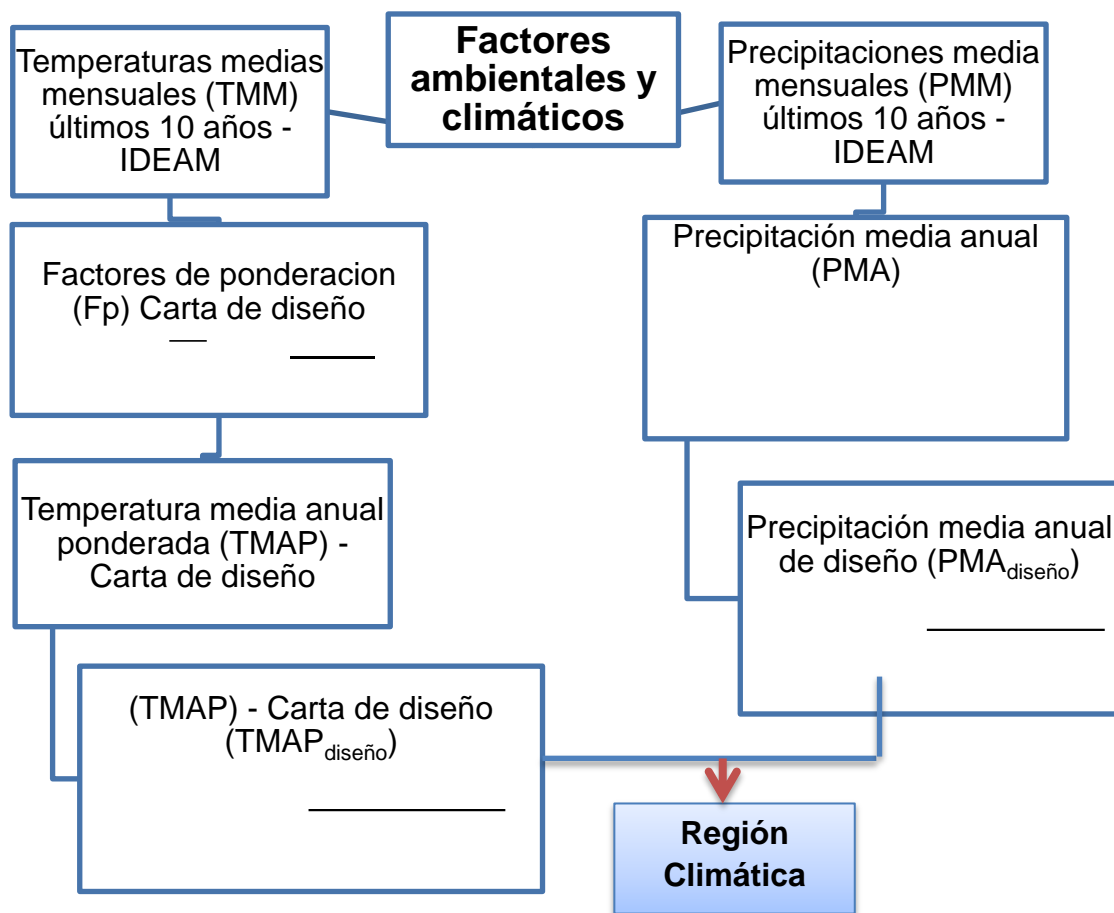


Figura 4. Metodología para la evaluación de los factores ambientales y climáticos.

FUENTE: INVIAS. Manual de diseño de Pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito Bogotá D.C. 1998.

Con las consideraciones anteriormente planteadas se llegó a la clasificación de las regiones teniendo en cuenta la TMAP y la PMA.

Tabla 2. Regiones climáticas según la temperatura y precipitación. ^[17, 18 y 19]

	REGIÓN	TMAP (°C)	PMA (mm)
R1	Fría seca y fría semihúmeda	<13	<2000
R2	Templado seco y templado semihúmedo	13 - 20	<2000
R3	Cálido seco y Cálido semihúmedo	20 - 30	<2000
R4	Templado húmedo	13 - 20	2000 - 4000
R5	Cálido húmedo	20 - 30	2000 - 4000
R6	Cálido muy húmedo	20 - 30	>4000

El siguiente esquema fue en su momento el punto de inflexión para la determinación de las regiones climáticas anteriormente mencionadas.

Regiones climáticas de Colombia

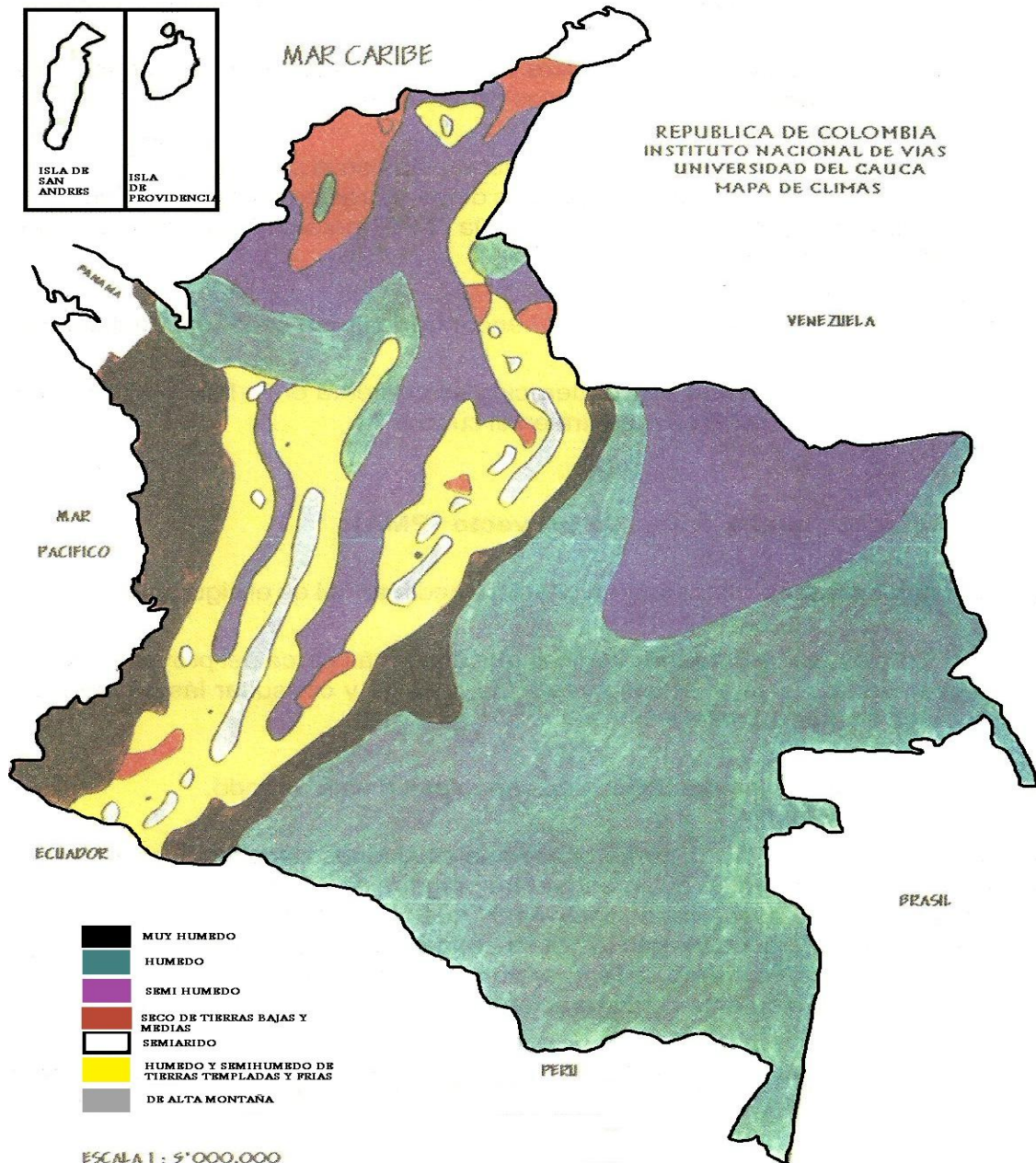


Figura 5. Regiones Climáticas de Colombia.

FUENTE: INVIAS. Manual de diseño de Pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito Bogotá D.C 1998.

Al catálogo de diseño de pavimentos también se le incluyeron las consideraciones del tránsito y el suelo de subrasante. Para el caso del tránsito se tomó toda la información de la red vial nacional colombiana, las tendencias de crecimiento y se establecieron rangos para fines de la metodología de diseño, expresados en números de ejes equivalentes de 80 kN que circulaban en el carril de diseño durante el periodo de diseño [17, 18 y 19].

En ese momento se obtuvieron 9 rangos para el tránsito representados de la siguiente forma:

T	Rango
T1	$0.5 - 1 \cdot 10^6$
T2	$1 - 2 \cdot 10^6$
T3	$2 - 4 \cdot 10^6$
T4	$4 - 6 \cdot 10^6$
T5	$6 - 10 \cdot 10^6$
T6	$10 - 15 \cdot 10^6$
T7	$15 - 20 \cdot 10^6$
T8	$20 - 30 \cdot 10^6$
T9	$30 - 40 \cdot 10^6$

Así mismo, se planteó que para determinar el valor medio del módulo resiliente de la unidad se debía proceder de la siguiente manera:

Como primer paso se debía encontrar el valor medio de los valores del módulo resiliente determinados para cada uno de los suelos presentes en la unidad, y como segundo y último paso se debía calcular el valor medio ponderado de la unidad utilizando como criterio de ponderación la relación entre la extensión del suelo y la longitud total de la unidad considerada [17, 18 y 19]. Según el módulo resiliente, la subrasante se clasifica de acuerdo a las siguientes categorías:

Módulo resiliente kg/cm^2	Categoría
$300 \leq Mr < 500$	S1
$500 \leq Mr < 700$	S2

$700 \leq MR < 1000$	S3
$100 \leq MR < 1500$	S4
$MR \geq 1500$	S5

Con estas 4 consideraciones se dimensionaban las estructuras de los pavimentos las cuales eran utilizadas solamente para pavimentos asfálticos.

Aunque son una herramienta para el diseño de pavimentos, los catálogos se limitaron solo a la construcción de nuevas carreteras, dejando de lado las consideraciones por el aumento en el tráfico a través de los años y la predicción del estado funcional y estructural de una estructura de pavimento en cualquier momento durante su vida útil.

La relación de soporte de California (CBR) fue uno de los primeros ensayos utilizados en el diseño empírico de pavimentos y como bien se sabe la finalidad de este ensayo, es determinar la capacidad de soporte de suelos con una humedad óptima y niveles de compactación variables. Desarrollado entre 1928 y 1929, con una aplicación sumamente sencilla. Cada una de las capas que se utilizan en el diseño de las estructuras de pavimento tienen su CBR determinado, y el espesor requerido para el material de capa por encima de ella se lee desde un gráfico (nomograma) o se calcula a partir de la siguiente ecuación^[19];

$$t = P \frac{1}{8.1CBR} - \frac{1}{Ip} \quad (3.0.1)$$

t = espesor (pulgadas)

P = carga axial de la rueda (libras)

p = presión de los neumáticos en libras por pulgada cuadrada (psi)

A diferencia de los catálogos, con este ensayo se define explícitamente el fracaso de una estructura de pavimento con relación a su desplazamiento vertical y que está asociado básicamente a una respectiva absorción de humedad^[19]. A pesar

de la superioridad del CBR con respecto a los catálogos, a este se le fueron incluidos métodos de falla para predecir el comportamiento del pavimento cuando estaba asociado a agentes externos ^[13].

Las (RN – Note Roads) o notas de carreteras No 29 y 31 fueron intentos de ingenieros de pavimentos de origen británico en llenar los vacíos del CBR y los diferentes Catálogos. La RN No 29, publicada por primera vez en 1960, fue un método para el diseño estructural de carreteras que utilizó las condiciones climáticas británicas, los materiales y el tráfico. Esta nota basa sus experimentos en el estudio del K (Modulo de reacción de la Subrasante), el método de CBR y la prueba de carretera AASHO ^[21].

Mientras que la RN No 29 definía los estándares de diseño de pavimento nuevos, la RN No 31 se dedicó al diseño de la estructura de pavimentos bituminosos en los países tropicales y sub-tropicales.

Un intento importante de la RN No 31 fue cuantificar el número de ejes equivalentes de 80 kN obtenidos en la prueba AASHO Road, donde la condición inicial y final de deterioro estuvo determinada por el PSR - Present Serviceability Rating (clasificación de servicio actual), el cual es un índice de la condición del pavimento, que va desde cero a cinco. Una puntuación de cero indicaba que el bordillo y la estructura estaban completamente deteriorados o no existían; y cinco indicaba que el bordillo y la estructura eran o parecían ser completamente nuevos.

Ambas notas sin embargo no lograron definir ni cuantitativa ni objetivamente la condición terminal de un pavimento ^[21].

A finales de la década de 1950 la Asociación Americana del estado y Funcionarios de carreteras (AASHO) se encargó de una serie de pruebas en carreteras, cerca de Ottawa, Illinois ^[21]. Se publicó una guía basada en las

limitadas ecuaciones empíricas de rendimiento desarrolladas a partir de esta prueba de carretera. Más adelante se le denominó el "viejo" método AASHTO, este ganó mucho uso a partir de 1960 hasta 1986, cuando la comunidad de diseño de pavimentos señaló entre sus defectos el hecho de no contabilizar los cambios en la carga del tráfico, materiales y características de diseño, así como la consideración directa o específica del sitio y por último los efectos climáticos, ya que las ecuaciones se desarrollaron a partir de una misma localización geográfica (Ottawa, Illinois)-Ullidtz ^[13].

Después de esto, se produjo un cambio de concepción en el que se daba como prioridad que las carreteras fueran construidas en beneficio de los usuarios, por lo que la aceptación de estas en últimas dependía del estado del pavimento; para poder ser así calificadas por los usuarios.

Después de entender que la percepción de los usuarios se podía tomar como un calificativo del estado de los pavimentos se elaboró el Índice de servicio Presente (PSI - Present Serviceability Index), que determina la condición del pavimento en una escala de 0 (intransitable a velocidad normal) a 5 (perfecto), y se creó basada en el recorrido de un grupo de usuarios sobre el tramo de una carretera. Ullidtz ^[13].

A pesar de la naturaleza vaga y subjetiva de la prueba realizada sobre el tramo de carretera, se desarrollaron las siguientes ecuaciones a partir de la prueba.

Para los pavimentos flexibles,

$$PSI = 5.03 - 1.9 \log 1 + SV - 1.38RD^2 - 0.01 \overline{C + P} \quad (3.0.2)$$

Y para los pavimentos rígidos,

$$PSI = 5.41 - 1.8 \log 1 + SV - 0.09 \overline{C + P} \quad (3.0.3)$$

Dónde:

SV = varianza de la pendiente (inclinación medida sobre 1 pie)

RD = profundidad del Carril en pulgadas, medido con una regla de 4 pies

C = pies lineales de fisuras de gran magnitud, por cada 1000 pies cuadrados

P = parches bituminosos en pies cuadrados, por área de 1000 metros cuadrados

Se mejoraron las ecuaciones anteriores y se obtuvieron buenas correlaciones teniendo en cuenta la variación de la pendiente. Yoder y Witczak utilizaron coeficientes de correlación de 0,88 y 0,92, respectivamente, para obtener las siguientes ecuaciones ^[20],

Para pavimentos flexibles,

$$PSI = 4.29 - 0.40 \overline{SV} \quad (3.0.4)$$

Y para pavimentos rígidos

$$PSI = 4.81 - 0.47 \overline{SV} \quad (3.0.5)$$

Los intentos de superar los fracasos del "viejo" método AASHTO dieron lugar a tres revisiones importantes realizadas en los años 1972, 1986 y 1993. Las dos últimas revisiones (1986 y 1993) tuvieron mejoras en los parámetros de entrada de materiales, la confiabilidad del diseño y los procedimientos empíricos para el diseño de rehabilitaciones ^[12].

En reconocimiento de las limitaciones de la Guía AASHTO, la comunidad de ingeniería de pavimentos en 1996 elaboró desde la academia, la industria y los organismos públicos y privados un marco para el desarrollo de un proceso de diseño basado en todos los estudios realizados a los dos principios: Mecanístico y Empíricos, dos enfoques empleados hasta ese entonces de forma independiente. Lo anterior dio como resultado la Guía de Diseño de Pavimentos Mecanístico-

empírico (MEPDG). Los componentes básicos del enfoque MEPDG son la carga de tráfico, suelo de fundación, caracterización de materiales y el clima, todos estos parámetros de entradas son usados para predecir el rendimiento y la respuesta instantánea de una estructura de pavimento durante su vida de diseño ^[12].

El MEPDG adopta un enfoque iterativo, teniendo como base los componentes básicos de entradas. Para desarrollar un diseño se toman los modelos mecanicistas de respuesta (ambiente, tensiones críticas, esfuerzos y deflexiones) y los modelos empíricos de rendimiento (en relación a daños, fisuras y pulimiento del pavimento etc.).

La MEPDG define un nivel de confiabilidad, donde se emplea un criterio de desempeño para evaluar el logro y la meta a la cual se desea llegar. En el caso de que no se cumplan los requisitos definidos, se realizan diseños nuevos, con diferentes juicios y se conciben iterativamente hasta que se cumple con el nivel aceptable de diseño. Este proceso da como resultado un diseño final.

La integración total de los factores climáticos en todos los procedimientos de diseño de pavimentos lo convirtieron en un componente fundamental de estudio, al cual se le han realizado diversas calibraciones que han traído consigo la obtención de diferentes modelos de precipitación y temperatura.

The Collaborative Historical African Rainfall Model (CHARM) o bien dicho en español “La Colaboración histórica del Modelo de Lluvia Africana” es uno de estos modelos que suple la falta de observación del clima en forma confiable en el continente Africano y en otras regiones similares.

La CHARM mezcló sus diferentes ecuaciones con las de la (NWP - numerical weather prediction o predicción numérica del tiempo), la cual utiliza modelos matemáticos de la atmósfera y de los océanos para predecir el tiempo y elaborar

modelos de reanálisis, interpolar los datos de las estaciones y producir un modelo orográfico compuesto por 36 años de registro de la precipitación en todo África [22]. Esa fusión de los componentes orográficos con la NWP y los campos numéricos de precipitación generaron la expresión final del modelo CHARM:

$$R^c \Phi, \lambda, year, month, day = \alpha, \Phi, \lambda, year, month, day R^r \Phi, \lambda, year, month, day + \beta R^o \Phi, \lambda, year, month, day \quad (3.0.6)$$

Donde β determina la ponderación de las cantidades de lluvias orográficas. La determinación de este parámetro es difícil, y a menudo no llega a su total claridad hasta que se utilizan la totalidad de las redes de estaciones orográficas de precipitación.

Φ y λ representan a la latitud y longitud respectivamente.

Los campos faltantes:

R^c y R^r year, month, day, representan el paso del tiempo en el cual se realiza el reanálisis y la interpolación de los datos.

Aunque estos modelos se utilizan en cultivos, su salida puede ser igualmente aplicable al diseño de carreteras, ya que proporciona estimaciones fiables de precipitación [22].

El modelo matemático del comportamiento del pavimento (MMOPP - Mathematical Modelling of **Pavement** Performance), es un programa informático elaborado por primera vez en 1976 y tiene un modelo constitutivo para la temperatura (media semanal) cuya predicción está dada por la función coseno [13];

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2} + \frac{T_1 - T_2}{2} \frac{\cos(U - U_0)}{26\pi} \quad (3.0.7)$$

Dónde:

T_1 = máxima temperatura del aire presente en cada semana del año

T_2 = mínima temperatura del aire presente en cada semana del año

U = Número de la semana (contados a partir del año nuevo)

U_0 = número de semanas que corresponde a la máxima temperatura, T_1 .

Según Barker et al. la temperatura del asfalto (capa superior), T_{Asp} (en °C) se obtiene entonces a partir de la ecuación anterior como ^[23]:

$$T_{\text{asp}} = 1.2T + 3.2 \quad (3.0.8)$$

Uno de los puntos fuertes de la MEPDG es su capacidad para integrar plenamente a los modelos climáticos en el proceso de diseño de carreteras con altos niveles de confiabilidad y predicciones, ya que todos los modelos son calibrados y validados con los registros reales de las estaciones climáticas. Para ello, se basa en datos meteorológicos obtenidos en más de 800 localidades en Norteamérica, como parte de un programa más amplio llamado estudio del comportamiento del pavimento a largo plazo (LTPP - Long Term **Pavement** Performance), el cual es un esfuerzo de 20 años que comenzó en 1986 ^[12].

En este sentido, las predicciones exactas sobre las condiciones del pavimento se basan en los registros horarios de los últimos 10 años. Como se expuso en el capítulo 1, debido a la enorme cantidad de datos involucrados una herramienta de análisis llamada el Modelo Climático Integrado (ICM) es desarrollada en 1989 (con revisiones posteriores) para simular las variaciones temporales en las condiciones de temperatura, humedad, congelamiento y descongelamiento en la estructura del pavimento y sus efectos en las propiedades del material.

En la MEPDG, se presenta una versión mejorada de la ICM llamado Integración del mejorado modelo climático (EICM - Enhanced Integrated Climatic Model) que es un modelo producto de otros modelos, como son ^[12]:

- El modelo (CMS – Climatic-Materials-Structural) Clima-Materiales-Estructura, el cual fue desarrollado en la Universidad de Illinois.
- El Modelo de infiltración y drenaje (ID) desarrollado en la Universidad de Texas y
- El modelo desarrollado por el Ejército de los EE.UU (CRREL – Cold Regions Research and Engineering Laboratory) Laboratorio de ingeniería dedicado a la Investigación de las regiones frías.

Los modelos EICM se discuten en el capítulo 5, pero la Guía describe la EICM, así ^[12].

"El EICM es un acople dimensional del calor y el modelo de flujo de la humedad, el cual está basado tanto en diferencias finitas como en métodos de elementos finitos con las condiciones térmicas como contorno, las entradas del clima y la energía en la superficie junto con la profundidad del suelo como fuente de calor"

El estudio del calor y el flujo de humedad en los suelos han despertado un gran interés entre los ingenieros y científicos en los últimos años, con varios modelos propuestos. Algunos de estos incluyen la ecuación dimensional del flujo de calor creada por Wilson ^[24], la cual describe el flujo de calor debido a la conducción y la transferencia de calor latente producto de un cambio de fase, y el gradiente de presión de aire (en una dimensión), el cual es un modelo desarrollado por Dakshnamurthy y Fredlund ^[11].

Los modelos tienen en cuenta las propiedades del suelo tales como el calor latente, conductividad térmica, capacidad de calor específico y coeficiente de

difusión del agua que fluye a través del suelo. En combinación con los parámetros ambientales como la presión atmosférica, las tasas de evaporación y la temperatura del aire, tales modelos se han utilizado para describir el flujo de calor subterráneo.

El estudio del flujo de la humedad ha llevado a la formulación de ecuaciones que intentan representar el contenido de humedad a diferentes profundidades en un perfil de suelo. La ley de Darcy y sus ecuaciones afiliadas han encontrado uso en el aprovechamiento de los recursos freáticos.

Para el caso del diseño de pavimentos, la ecuación de la curva característica agua - suelo (SWCC – Soil-Water characteristic curve) junto con las elaboradas por Fredlund y Xing han presentado una fuerte aplicabilidad en el EICM ^[12]. Una explicación más detallada de la SWCC y otros modelos relacionados se consideran en el capítulo 5.

Wilson G.W. Ph.D. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1990., intentó la combinación de los efectos de la humedad y de la temperatura en un único modelo que da lugar a la ecuación compuesta de Wilson, expresada como;

$$\frac{\partial u_w}{\partial t} = -C_w \frac{\partial u_a}{\partial t} + C_u^w \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} + C_u^{wu} \frac{\partial^2 u_v}{\partial z^2} \quad (3.0.9)$$

Dónde:

u_a = presión de aire

u_w = presión de agua

u_v = presión de vapor

C_w = coeficiente de interacción asociado a la fase de agua líquida

C_u^w = coeficiente con respecto a la fase de consolidación del agua

C_u^{wu} = coeficiente con respecto a la fase de vapor de consolidación

Es indispensable tener como referencia que ninguno de los modelos planteados anteriormente es tan amplio como el EICM, debido a la total integración de los efectos climáticos en el diseño del pavimento, ya que además de la humedad, precipitación y la temperatura, también incorpora la velocidad del viento, humedad, porcentaje de luz solar, radiación solar, precipitación y la profundidad del nivel freático^[12].

3.6. ADOPCIÓN DE TEORÍA

Este estudio por lo tanto se centra en la calibración y adaptación del modelo ICM como un componente global e integral de la MEPDG para tres estaciones climatológicas con un respectivo piso térmico. Con este proyecto se generará un cambio en el diseño de las estructuras de pavimentos en Colombia, de tal forma que con el tiempo se corrijan y se mejoren aspectos a nivel de diseño y respectiva construcción.

CAPÍTULO 4

MÉTODO DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS “MECÁNISTICO-EMPÍRICO”

4.1. PERSPECTIVA HISTÓRICA

El diseño Mecanístico-empírico (ME) de estructuras de pavimentos ha sido reconocido en muchos países como el método más prometedor para el diseño de carreteras y la rehabilitación, se señala que este se introdujo en Dinamarca hacia los años sesenta como el método Estándar de diseño, luego adoptado por Shell y se introdujo en los EE.UU. por el Instituto de Asfalto en 1982. El ingeniero Theyse H.I., en su paper *Revision of SouthAfrican Flexible Pavement Design Method: Mechanistic-EmpiricalComponent* (Revisión en Sudáfrica del Método de Diseño de Pavimentos Flexible: Componente Mecanístico-Empírico) expone que el método ha estado disponible en el sur de África desde la década de 1970.

Sin embargo, su uso como una herramienta de diseño estuvo obstaculizado por la dificultad en la determinación de los módulos elásticos de los diferentes materiales que conforman la estructura de pavimento. La excesiva sensibilidad que en su momento exhibieron estos materiales debido al cambio de sus variables de entrada condujo a resultados no intuitivos, cálculos estructurales erróneos y por lo tanto poco realistas. En casi todos los casos, el fracaso de las primeras versiones de la ME se relacionaron directamente a las influencias ambientales y las características de los materiales.

En reconocimiento de esto y de las deficiencias de los métodos de diseño, en los EE.UU. hacia el año 1996 la AASHTO y la JTFP - Joint Task Force on Pavements (Grupo de trabajo conjunto sobre pavimentos) recolectaron todas las experiencias de la ingeniería de pavimentos extraída de los organismos viales, la academia,

industria y gobierno, lo que ayudo a sentar las bases para un nuevo método de diseño ME y una mejora sustancial sobre las versiones anteriores.

Con lo anterior se dio lugar al NCHRP - National Cooperative Highway Research Program (Programa Nacional de Investigación Cooperativa de Autopistas) Proyecto 1-37A que desarrolló en ultimas la guía de diseño y el software que lo acompaña^[27].

4.2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y SU ADOPCIÓN

El diseño ME de la ASHTOO reúne dos enfoques separados hasta ahora en el diseño de los pavimentos. Su aplicación depende en gran medida de los modelos matemáticos y las diferentes propiedades de los materiales que se encuentran en los laboratorios. Los modelos matemáticos incluidos en el ME se utilizan para predecir esfuerzos, deformaciones y deflexiones (denominados colectivamente como respuestas) dentro del pavimento cuando se somete a cargas de tránsito y los cambios en las condiciones ambientales^[27]. Esto hace que el primer paso del análisis (Mecanístico) se base en leyes físicas de la mecánica.

En la etapa mecanicista, las herramientas matemáticas empleadas son o bien el FEA - **Finite Element Analysis** (análisis de elementos finitos) o la MLET - Multi-Layer Elastic Theory (teoría elástica multicapa). La FEA y MLET se utilizan para analizar las respuestas de la estructura de pavimento sometidos a cargas e influencias ambientales.

El otro conjunto de modelos (funciones de transferencia) utilizan los valores de las respuestas calculados para predecir empíricamente el comportamiento del pavimento. Esta predicción se determina a través de los daños acumulados, deterioros o fallas observadas en los pavimentos tanto flexibles como rígidos.

La etapa que implica la evaluación del rendimiento se denomina la etapa empírica, y depende de la predicción estadística de la condición del pavimento en un tiempo

futuro, sobre la base de las respuestas críticas obtenidas. El enfoque ME hace posible optimizar el diseño para garantizar plenamente que los tipos específicos de deterioro o falla sean limitados a valores inferiores a los criterios de falla durante la vida útil de diseño de la estructura del pavimento. La figura 6 muestra el diagrama de flujo de las etapas del proceso de diseño y análisis en la MEPDG.

Los pasos básicos incluidos en el proceso de diseño del MEPDG se enumeran a continuación ^[28]:

- 1. Selección de la estrategia para el diseño de prueba.** En este el diseñador puede utilizar la Guía AASHTO 1993 o cualquier procedimiento de diseño con el objeto de definir la sección transversal del diseño prueba.
- 2. Selección de los criterios adecuados de desempeño (umbral), para los indicadores y el nivel de confiabilidad de diseño del proyecto.** Los criterios de diseño o indicadores de desempeño deben incluir la magnitud de los principales deterioros y la regularidad superficial del pavimento, los cuales son los principales causantes de una rehabilitación o reconstrucción.
- 3. Obtención de todos los datos de entrada para el diseño de prueba del pavimento bajo consideración.** Los datos de entrada se agrupan en seis amplios temas: información general del proyecto, criterios de diseño, tráfico, clima, estructura de capas y propiedades de los materiales (incluyendo las características de diseño).
- 4. Ejecución del Software MEPDG, exploración de los datos de entrada y salida con juicio ingenieril.** En este paso se examinan los datos de entrada para verificar el correcto ingreso de los mismos, además de la respectiva evaluación de los parámetros arrojados en la salida correspondientes a los indicadores de desempeño con el objetivo de que él sea evaluado, es decir, si ha cumplido con cada uno de los indicadores para el nivel confiabilidad del diseño elegido para el proyecto.

Por último, si alguno de los criterios no se cumple, se remedian las diferentes características de diseño ingresadas en los pasos 2 al 4.

5. **Revisión del diseño de prueba, si es necesario.** Este paso se realiza para considerar si el diseño de prueba tiene errores en los datos de entrada, anomalías en las respuestas del material, o se ha excedido el criterio de falla para el nivel de confiabilidad especificado, además se pueden revisar los datos de entrada del diseño de prueba, y se itera con el software hasta que los criterios de desempeño cumplan.

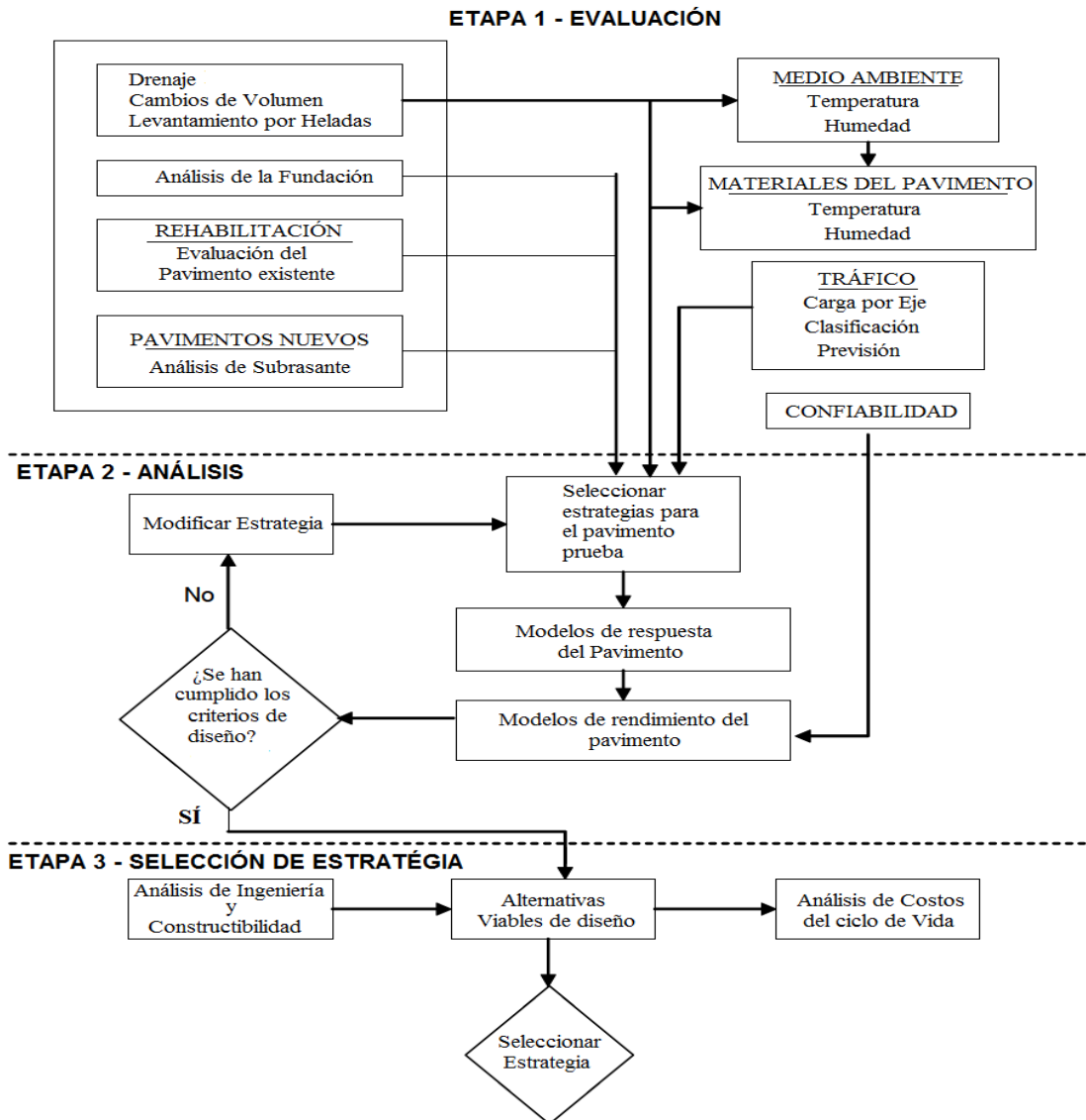


Figura 7 Diagrama de flujo de las tres etapas del proceso de diseño y análisis en la MEPDG.

FUENTE: Guía de diseño Mecánico – Empírico de Pavimentos – Manual Práctico.

En últimas, la función de la MEPDG es predecir los deterioros o fallas y el IRI (índice de regularidad internacional) a un nivel de confiabilidad seleccionado. Por lo tanto, no es un procedimiento directo de diseño de espesores, sino más bien una herramienta de análisis para que el diseñador la use de manera iterativa.

Es evidente que la adopción del diseño ME ha sido posible gracias a los rápidos avances en la tecnología, requiriendo cálculos muy complejos tanto para la parte mecánica como las etapas empíricas, las cuales se combinan en la guía de diseño de pavimentos Mecánico-empírico (MEPDG) o DG2002. Desde un punto de vista económico, la metodología ME ofrece un enfoque más rentable en el diseño, construcción y gestión de los pavimentos.

A pesar que su uso es deseable, una de las desventajas del enfoque ME son los requisitos que se incluyen en las diferentes entradas y modelos, como el caso climático que para una adopción completa se necesita de muchos insumos que por lo general no se poseen ^[29].

La adopción del enfoque ME propone la definición de los niveles jerárquicos de los datos de entrada. Esta estructura jerárquica de ingreso de datos permite a las agencias estatales y usuarios con pequeña experiencia utilizar el ME con una inversión inicial mínima.

El nivel jerárquico de los datos que se ingresan en el MEPDG es un esquema que se utiliza para categorizar el conocimiento del diseñador acerca de los datos ingresados para el análisis. El enfoque de niveles de jerarquía es empleado con respecto al tránsito, los materiales y a la condición de los parámetros de entrada relacionados a la condición de pavimentos existentes.

A continuación se describen los tres niveles disponibles para jerarquizar los valores que se ingresan para la mayoría de los parámetros de materiales y el tránsito ^[28].

Nivel de entrada 1: este nivel representa el mayor grado de conocimiento sobre el parámetro de entrada para un proyecto específico, pero tiene el más alto nivel de costos de recopilación de información y pruebas para determinar el valor de entrada. Este nivel debe ser utilizado para diseños de pavimentos donde se presenten características inusuales, o bien para materiales o condiciones de tráfico que estén fuera del espacio de inferencia considerado para desarrollar las correlaciones y los valores por defecto incluidos en los niveles 2 y 3.

Nivel de entrada 2: el parámetro de entrada es calculado a partir de correlaciones o ecuaciones de regresión, es decir, el valor del ingreso se calcula para datos específicos o parámetros que son menos costosos de medir.

Nivel de entrada 3: En este nivel el parámetro de entrada está basado en valores por defecto o “estimados”. Los datos de entrada del nivel 3 están basados en valores globales o regionales por defecto, como por ejemplo el valor de la mediana estadística de un grupo de datos con características similares. Este nivel tiene el menor grado de conocimiento sobre el parámetro de entrada para el proyecto específico pero tiene los costos más bajos de ensayos y recopilación de datos.

4.3. MODELOS DE RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

Las respuestas estructurales debidas al tráfico son evaluadas usando los análisis por elementos finitos (FEA) y la teoría elástico multicapa (MLET), mientras el EICM evalúa la humedad y los perfiles de temperatura en el pavimento con la MEPDG ^[30].

Sus salidas actúan entonces como las entradas a las funciones de transferencia. La elección del análisis por elementos finitos o la teoría elástico multicapa es guiado por las capas que conforman la estructura de pavimento, es decir, en el caso del cemento asfáltico (se trata como un comportamiento elástico lineal) analizado por la MLET (teoría elástica multicapa). En cambio las capas de subbase no consolidados que presentan más esfuerzos y dependen de tendencias se analizan a través de FEA - finite element analysis (análisis de elementos finitos).

El método MLET se basa tanto en las ecuaciones de Boussinesq como las soluciones de Burmister. El MLET ofrece a simplicidad que requieren las propiedades de algunos materiales (por lo general elasticidad) y espesores de capa, junto con las presiones de los neumáticos y áreas de contacto ^[30]. Sin embargo, no tiene en cuenta la anisotropía en materiales, y la FEA supera esta carencia a pesar de que requiere más rigor y tiempo de cálculo. Los análisis con FEA arrojan resultados como el de la tensión y la dependencia de los materiales al módulo de elasticidad obtenidos a partir de ensayos de laboratorio, dado por la siguiente ecuación ^[12];

$$Mr = k_1 Pa \frac{\theta}{Pa}^{k_2} \cdot \frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1^{k_3} \quad (4.0.1)$$

Dónde:

Mr = módulo resiliente de la capa de pavimento

k1, k2, k3 = parámetros de regresión

Pa = presión atmosférica

θ = esfuerzo mayor

T_{oct} = esfuerzo cortante octaédrico

El EICM predice la distribución de la temperatura en todo el perfil del pavimento. Esto se usa para determinar el módulo de elasticidad, E, (una medida de la rigidez) de la mezcla asfáltica a diferentes profundidades. Por lo tanto, cuando los datos reales de ensayo están disponibles o un modelo predictivo es capaz de estimar el módulo resiliente como una función de la tensión utilizada, un estado de tensión representativo de toda la capa (subcapa) debe ser estimado y el módulo de elasticidad en ese estado particular de esfuerzo de entrada debe ser un valor constante.

Para la humedad, la EICM calcula un factor de corrección F_{env} - environmental adjustment factor (factor de ajuste de los efectos ambientales), en diferentes puntos de las capas no ligadas y el subsuelo. El F_{env} se utiliza para modificar el módulo resiliente dependiendo del estado del suelo (esfuerzos) y de la temporada climática (humedad, congelación/ descongelación).

Aunque la sensibilidad al esfuerzo sólo se considera si la entrada del nivel 1 se utiliza, el impacto de las variaciones temporales en la humedad y la temperatura en el M_r se consideran plenamente en todos los niveles a través del factor de ajuste compuesto del medio ambiente, F_{env} . El EICM ocupa todos los factores ambientales y proporciona la humedad del suelo, la aspiración y la temperatura como una función del tiempo en cualquier lugar dentro de las capas no ligadas. El módulo resiliente M_r en cualquier momento o posición se expresa entonces como [12].

$$M_r = F_{env} \cdot k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (4.0.2)$$

Dónde:

M_r = módulo resiliente de la capa de pavimento

F_{env} = factor compuesto de ajuste para el medio ambiente de la capa/subcapa

Otro componente de la EICM es la CRREL - Cold Regions Research and Engineering Laboratory (Laboratorio de ingeniería dedicado a la Investigación de las regiones frías), que no se consideran en este estudio, pero calcula el índice de congelación y predice la formación de cristales de hielo a diferentes profundidades para condiciones de invierno en las zonas templadas.

4.4. MODELOS DE DESEMPEÑO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES Y RÍGIDOS

Los modelos de predicción del deterioro o de desempeño tienen como entradas las salidas de los modelos de respuesta ^[29].

El daño de un pavimento es una condición o un conjunto de condiciones, generadas por el tránsito, el medio ambiente, los métodos de construcción y los materiales. El daño puede definirse como una alteración de las propiedades físicas o funcionales de la estructura de pavimento. El daño depende de ciertos factores como son: la magnitud de la carga de rueda, el área de influencia de la carga, el número de aplicaciones y repeticiones de carga, la velocidad de operación, el área de contacto, la separación entre ejes etc. Vale la pena mencionar que dichos modelos varían dependiendo de la capa de pavimento (específicamente son una función de los materiales) ^[31].

Los diferentes daños que son cuantificables matemáticamente tienen modelos que incluyen el fisuramiento (longitudinal, térmico y por fatiga), la deformación permanente y la rugosidad. Estos modelos se han desarrollado como un esfuerzo del Proyecto 1-37A bajo las condiciones de América del Norte, pero aun así cabe decir que no son adecuados para las suplir las necesidades de los otros países, por lo que existe la necesidad de la calibración de estos modelos a las condiciones locales y así ser utilizados de forma fiable ^[29].

En la siguiente sección, se examinan los diferentes modelos desarrollados para los pavimentos flexibles y rígidos incluidos dentro de la MEPDG.

4.4.1. MODELOS DE DESEMPEÑO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES – MEPDG

4.4.1.1. FISURAMIENTO RELACIONADO CON LA CARGA (FALLA POR FATIGA)

Existen dos tipos de fisuras relacionadas con la carga, las cuales se incluyen en la MEPDG: las fisuras de piel de cocodrilo y las fisuras longitudinales. El MEPDG asume que las fisuras de piel de cocodrilo o de fisuras de área se inician en la parte inferior de las capas de la mezcla asfáltica y se propagan a la superficie con el continuo tráfico de camiones, mientras se asume que las fisuras longitudinales se inician en la superficie.

El número permitido de repeticiones de carga por ejes necesarios para el enfoque del índice de daño incremental para predecir ambos tipos de fisuras relacionadas con la carga (cocodrilo y longitudinal) se muestra en la siguiente ecuación ^[28]:

$$N_{f-HMA} = k_{f1} C C_H \beta f_1 \varepsilon_t^{k_{f2}\beta f_2} E_{HMA}^{k_{f3}\beta f_3} \quad (4.0.3)$$

Dónde:

N_{f-HMA} = Número permitido de repeticiones de carga por eje para un pavimento flexible y recapados de HMA.

ε_t = Deformación unitaria por tensión en lugares críticos y calculados por el modelo de respuesta estructural, en pulg/pulg,

E_{HMA} = Módulo dinámico del HMA medido bajo compresión, en psi,

$K_{f1, f2, f3}$ = parámetros de calibración global en campo

$B_{f1,f2,f3}$ = Constantes de calibración de campo específica local o específicas de la mezcla; para el esfuerzo de calibración global, estas constantes fueron establecidas con un valor de 1.

C = factor de corrección

C_H = Factor de corrección de espesor, dependiente del tipo de fisuramiento

4.4.1.2. FISURAS PIEL DE COCODRILO

Corresponde a una serie de fisuras interconectadas, las cuales se producen por la falla por fatiga de las capas asfálticas a causa de la acción repetida de las cargas del tránsito. El fisuramiento se inicia en la parte inferior de dichas capas donde los esfuerzos de tensión y las deformaciones a causa de las cargas del tránsito alcanzan su mayor magnitud. Inicialmente, aparecen como fisuras longitudinales individuales o series de fisuras paralelas en la banda de rodamiento. Luego, bajo la acción de las cargas repetidas, se van interconectando formando un patrón reticular semejante a una malla de gallinero o a la piel de un cocodrilo.

Este tipo de falla solo ocurre en áreas sometidas a tránsito repetido y, por lo tanto no deben cubrir toda el área de la calzada, a no ser que toda ella este sometida a la acción de las cargas vehiculares, como se observa en la figura 7.

La piel de cocodrilo se considera un síntoma muy importante de deterioro estructural del pavimento asfáltico ^[32].

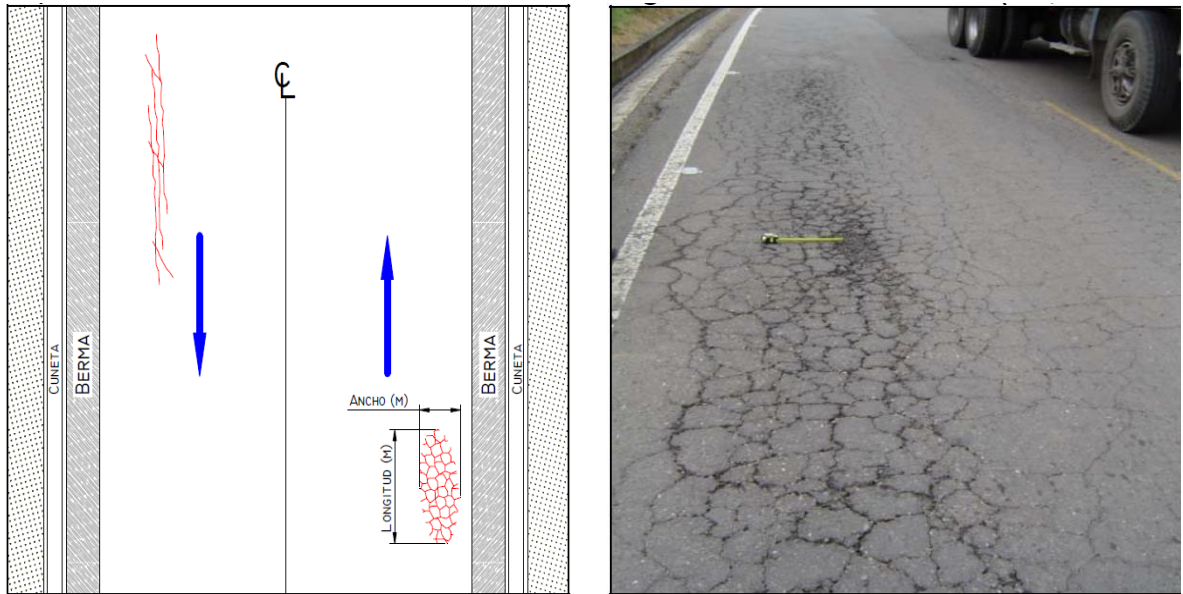


Figura 8. Fisuras Piel de Cocodrilo.

FUENTE: Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C.

La siguiente ecuación es la utilizada en la MEPDG para predecir la cantidad de fisuramiento de piel de cocodrilo en función de un área ^[28]:

$$FC_{Bottom} = \frac{1}{60} \left(\frac{C_4}{1 + e^{(C_1 C_1^* + C_2 C_2^* \text{Log } DI_{Bottom} * 100)}} \right) \quad (4.0.4)$$

Dónde:

FC_{Bottom} = Área del fisuramiento de piel de cocodrilo que inicia en la parte inferior de las capas de HMA, % del área total del carril,

DI_{Bottom} = Índice de daño acumulado en la parte inferior de las capas de HMA y

$C_{1,2,4}$ = constantes de regresión de la función de transferencia; $C_4 = 6,000$; $C_1 = 1.00$; $C_2 = 1.00$.

$$C_1^* = -2C_2^*$$

$$C_2^* = -2.40874 - 39.748(1 + H_{HMA})^{-2.856}$$

Dónde:

H_{HMA} = Espesor total de la HMA, en pulg.

4.4.1.3. FISURAS LONGITUDINALES

Corresponden a fisuras predominantes en la carpeta asfáltica y que se encuentran paralelas al eje de la vía y localizadas en áreas sujetas al tránsito vehicular (huellas del tránsito). Este indicativo expone la existencia de esfuerzos de tensión en alguna de las capas de la estructura que han superado la resistencia del material afectado. El fisuramiento se inicia en la superficie de las capas asfálticas y evoluciona en sentido descendente. Este daño se muestra en la figura 8.

Las causas más comunes de este tipo de deterioro son los altos esfuerzos horizontales de tensión producidos por las llantas de los vehículos pesados, así como una baja rigidez de la capa asfáltica superior, a causa de las altas temperaturas superficiales ^[33].



Figura 9. Fisuras Longitudinales.

FUENTE: Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C.

También se le llama fisuramiento de arriba hacia abajo, es decir, que se inicia en la superficie y se propaga hacia abajo. La relación utilizada para predecir la longitud de las fisuras longitudinales por fatiga en la MEPDG, es la siguiente ^[28]:

$$FC_{top} = 10.56 \frac{C_4}{1+e^{C_1-C_2 \text{Log } DI_{Top}}} \quad (4.0.5)$$

Dónde:

FC_{Top} = longitud de fisuras longitudinales que inician en la parte superior de la capa de HMA, pies/mi.,

DI_{Top} =índice de daño acumulado cerca de la parte superior de la superficie de HMA y

$C_{1,2,4}$ = constantes de regresión de la función de transferencia; $C_1 = 7.00$; $C_2 = 3.5$; y $C_4 = 1000$.

Los coeficientes de calibración son una función del espesor de la HMA, mientras que el daño DI_{Top} , se calcula usando la ley de Miner. También conocido como el principio de la suma lineal de los daños, donde el total de los daños en el pavimento después de un intervalo de tiempo es la suma acumulada de los daños y perjuicios individuales más pequeños causados durante el intervalo, y se expresa matemáticamente como ^[13]:

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{n_{fi}} \quad (4.0.6)$$

Dónde:

T = número total de períodos estacionales

n_i = tráfico real para el período i

n_{fi} = repeticiones de tráfico de una determinada carga que causa fallos en el período i

4.4.1.4. FISURAMIENTO TÉRMICO

Esta forma de deterioro involucra diversos tipos de fisuras, principalmente de tipo transversal, y en bloque, que aparecen en diversas áreas de la superficie del pavimento. Se diferencian de otros deterioros, como fisuras longitudinales por fatiga y fisuras piel de cocodrilo, porque se presentan en zonas donde no hay repeticiones permanentes de carga, aun cuando es evidente que éstas pueden aumentar su nivel de deterioro.

Este deterioro se presenta principalmente a causa de la contracción térmica de las capas asfálticas (ver figura 9), debido a los ciclos diarios de temperatura. También, por el uso de un tipo de asfalto inadecuado para las características climáticas de la zona ^[33].

Esta dificultad es causada también por los ciclos de calentamiento y enfriamiento que experimenta el pavimento. Las diferencias en las tasas de enfriamiento entre la superficie y las capas interiores de la mezcla asfáltica conducen a la formación de fisuras en una dirección perpendicular a las trayectorias de las ruedas. El EICM genera los perfiles de profundidad de temperatura en intervalos de una hora durante el período de análisis, y la teoría de la transformación viscoelástica se utiliza para determinar el cumplimiento de $D(t)$, que está relacionado con el módulo de relajación, E_r , de la mezcla asfáltica ^[12]. El conocimiento del E_r junto con los datos de temperatura de la EICM permite la predicción de la tensión térmica como una función del tiempo y la profundidad, dado por la siguiente ecuación;

$$\sigma(\xi) = \int_0^{\xi} E(\xi - \xi') \frac{d\varepsilon}{d\xi} d\xi' \quad (4.0.7)$$

Dónde:

$\sigma(\xi)$ = esfuerzo en el tiempo reducido ξ

ξ' = variable de integración

$E(\xi - \xi')$ = módulo de relajación en tiempo reducido $\xi - \xi'$

$d\varepsilon$ = deformación en el tiempo reducido $\xi = \alpha(T(\xi') - T_0)$

$T(\xi')$ = temperatura del pavimento en el tiempo reducido

T_0 = temperatura del pavimento cuando $\sigma = 0$

α = coeficiente lineal de expansión térmica



Figura 10. Fisuramiento Térmico.

FUENTE: Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras segunda edición – 2008 Invias.

El modelo de fisuramiento térmico es una versión mejorada del enfoque original desarrollado bajo el contrato de Investigación del Strategic Highway Research Program (SHRP) A-005 (Lytton, et al., 1993).

Las propiedades viscoelásticas de la mezcla de HMA se representan entonces como un modelo generalizado de Maxwell a través de un desarrollo en serie de Prony, con la función de relajación del módulo obtenido a través de la transformación de una función de deformación por fluencia. La cantidad de propagación de fisuras inducida por un ciclo de enfriamiento térmico es pronosticada utilizando la ley de París de propagación de fisuras ^[28].

$$AC = A(\Delta K)^n \quad (4.0.8)$$

Dónde:

AC = cambio en la profundidad de la fisura debido al ciclo de enfriamiento,

ΔK = cambio en el factor de intensidad de esfuerzo debido al ciclo de enfriamiento

y

A, n = parámetros de fractura para la mezcla del HMA.

El grado de fisuración es pronosticado por el MEPDG utilizando una relación asumida entre la probabilidad de distribución del logaritmo de la profundidad de la fisura para la relación de espesor de la capa de HMA y el porcentaje de fisuramiento.

La forma final del modelo de fisuramiento implementado en el MEPDG se da como:

$$TC = \beta_{t1} N \frac{1}{\sigma_d} \text{Log} \frac{Cd}{H_{HMA}} \quad (4.0.9)$$

Dónde:

TC = extensión observada del fisuramiento térmico, en pies/mi,

β_{t1} = coeficiente de regresión determinada a través de la calibración global (400),

$N(z)$ = distribución normal estándar evaluada en el (z),

σ_d = desviación estándar del logaritmo de la profundidad de las fisuras en el pavimento (0.769), en pulg,

Cd = profundidad de la fisura en pulg, y

H_{HMA} = espesor de las capas de HMA, en pulg

El uso de este modelo tiene una limitación. Teóricamente se puede predecir el fisuramiento térmico de hasta sólo cuatro quintas partes de la longitud total del pavimento ^[28]. En la práctica sin embargo, no puede ir más de un 50% de este valor, se nota entonces como el criterio de fallo asignado es violado.

4.4.1.5. AHUELLAMIENTO

El ahuellamiento es una depresión de la zona localizada sobre la trayectoria de las llantas de los vehículos. Con frecuencia se encuentra acompañado de una elevación de las áreas adyacentes a la zona deprimida y de fisuración (ver figura 11).

Un ahuellamiento significativo puede llevar a la falla estructural del pavimento y posibilitar el hidropilaje por almacenamiento de agua.

El ahuellamiento ocurre principalmente debido a la deformación permanente de alguna de las capas de pavimento o subrasante, generada por deformación plástica del concreto asfáltico o por deformación de la subrasante debido a la fatiga de la estructura ante la repetición de cargas., la deformación tiende a aumentar en climas cálidos, puede darse de igual manera por compactación inadecuada de las capas durante la construcción y por el uso de asfaltos blandos o agregados redondeados ^[34].

Esta deformación se recupera parcialmente cuando la llanta deja de oprimir pero tal recuperación nunca es total, siempre queda un remanente que conduce a una deformación permanente y por lo tanto aumenta el costo de operación y aumenta la ruptura y fisuramiento.

El enfoque utilizado en el MEPDG está basado en el cálculo de los incrementos en la distorsión o ahuellamientos dentro de cada subcapa. En otras palabras, el ahuellamiento se calcula para cada capa a una profundidad media dentro de la estructura del pavimento. La deformación plástica para una determinada capa es la suma de las deformaciones plásticas verticales.

El modelo para calcular la deformación permanente total utiliza la deformación plástica vertical bajo condiciones específicas del pavimento para el número total de camiones que corresponden a esa condición. Las condiciones varían de un mes a otro, por lo que es necesario utilizar un enfoque especial llamado “endurecimiento por deformación” que incorpora esas deformaciones plásticas verticales en un subsistema de deformación acumulada en cada mes ^[28].

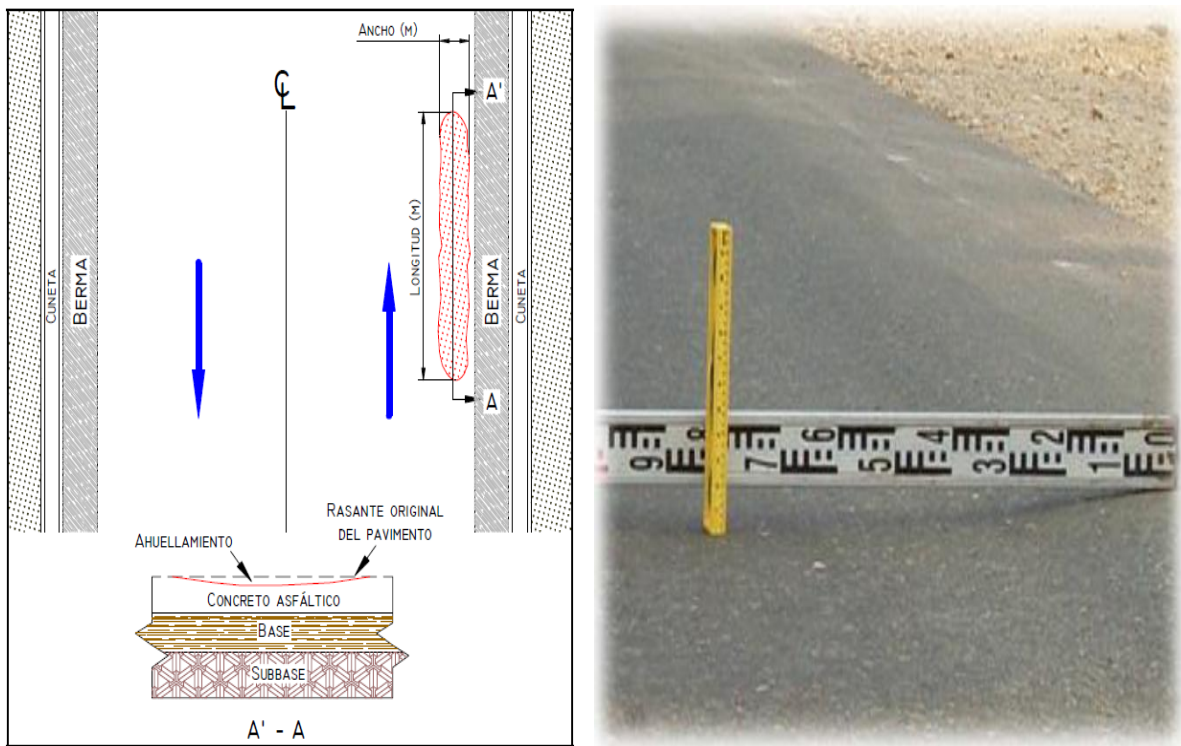


Figura 11. Ahuellamiento.

FUENTE: Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles, octubre de 2006. Bogotá D.C.

Para las capas de mezcla asfáltica en caliente (HMA)

La tasa o la acumulación de deformación plástica es medida en el laboratorio utilizando ensayos triaxiales de deformación permanente por carga repetida tanto para mezclas de HMA como materiales no ligados. La relación derivada del laboratorio es luego ajustada para que sea igual a la profundidad del ahuellamiento medida en la vía. La formación de ahuellamientos en la capa

asfáltica y subcapas se expresa como una relación entre las deformaciones plásticas y elásticas por lo tanto [28];

$$\frac{\varepsilon_p \text{ HMA}}{\varepsilon_r \text{ (HMA)}} = \beta_{1r} k_z 10^{k_{1r}} N^{k_{2r}} T^{k_{3r}} k^{3r} \beta_{3r} \quad (4.0.10)$$

Dónde:

$\varepsilon_p \text{ (HMA)}$ = Deformación unitaria permanente o plástica axial acumulada en la subcapa/capa de HMA, en pulg/pulg.

$\varepsilon_r \text{ (HMA)}$ = Deformación unitaria resiliente en la subcapa/capa de HMA, en pulg/pulg.

N = número de repeticiones de carga por eje 80kN.

T = temperatura de la mezcla del pavimento, en °F,

k_z = factor de confinamiento de profundidad,

$K_{1r,2r,3r}$ = parámetros de calibración global de campo

$B_{1r,f2,f3}$ = constantes de calibración locales o de mezcla en el campo; para la calibración global, estas constantes fueron establecidas con un valor de 1.

La mayoría de los ahuellamientos ocurren a temperaturas elevadas cuando la rigidez del asfalto es más baja. Los ahuellamientos totales que se forman en la capa de HMA están dados por Quintus et al como [35];

$$PD = \sum_{i=1}^n \varepsilon_p^i h_i \quad (4.0.11)$$

Dónde:

PD = deformación permanente, pulg

n = número de sub-capas

ε_p^i = Deformación total plástica en la sub-capas i

h_i = espesor de subcapa i

Para las capas no ligadas dentro de la estructura de pavimento;

La ecuación matemática calibrada en campo y que es usada para calcular la deformación vertical plástica dentro de todas las subcapas de pavimentos no ligados y el suelo de fundación o terraplén se presenta como ^[28],

$$\Delta p_{soil} = \beta_{s1} k_{s1} \epsilon_v h_{soil} \frac{\epsilon_o}{\epsilon_r} \exp^{-\frac{\rho}{N}} \quad (4.0.12)$$

Dónde:

$\Delta p_{(soil)}$ = deformación permanente plástica para la capa/subcapa, en pulg

N = número de repeticiones de carga por eje,

ϵ_o = intercepción determinada de los ensayos de deformación permanente de carga repetida en el laboratorio en pulg/pulg

ϵ_r = deformación unitaria resiliente impuesta en el ensayo de laboratorio para obtener las propiedades del material ϵ_o , β y ρ (constantes de calibración) en pulg/pulg

ϵ_v = deformación unitaria vertical resiliente o elástica promedio en la capa/subcapa y calculada por el modelo de respuesta estructural, en pulg/pulg.

h_{soil} = espesor de la capa/subcapa no ligada, en pulg

k_{s1} = coeficiente de calibración global; $k_{s1} = 1.673$ para materiales granulares y 1.35 para materiales de grano fino

β_{s1} = Constante de calibración local para la formación de ahuellamiento en las capas no consolidados (base o subbase), la constante de calibración local presenta un valor de 1. Tenga en cuenta que β_{s1} representa la capa de subrasante mientras β_{B1} representa la capa de base.

A diferencia de la superficie de HMA (mezcla asfáltica en caliente), la base se ve directamente afectada por la humedad del suelo y esto se tiene en cuenta en la ecuación anterior por el parámetro de material, β que se expresa como;

$$\text{Log}\beta = -0.61119 - 0.017638 (Wc) \quad (4.0.13)$$

Dónde:

Wc = contenido de agua, en %

$$\rho = 10^9 \frac{C_o}{1 - 10^9 \beta} \frac{1}{\beta}$$

$$C_o = \text{Ln} \frac{a_1 M_r^{b_1}}{a_9 M_r^{b_9}} = 0.075$$

Mr = Módulo resiliente de la capa unida o subcapa, psi

a₁, a₉ = constantes de regresión; a₁ = 0.15 y a₉ = 20

b₁, b₉ = constantes de regresión; b₁ = 0,0 y b₉ = 0.0

Para la Subrasante

La subrasante es el terreno natural en el cual se apoyan las capas de una estructura de pavimento y se puede considerar como de profundidad infinita. El enfoque desarrollado y adoptado para el uso en la guía MEPDG da lugar al siguiente modelo de transición ^[35];

$$\epsilon_p(z) = (\epsilon_{p,z=0}) \exp^{-kz} \quad (4.0.14)$$

$\epsilon_p(z)$ = deformación plástica vertical a la profundidad z (medida desde la parte superior de la subrasante)

$\epsilon_{p,z}$ = deformación plástica vertical en la parte superior de la subrasante (Z = 0)

z = profundidad medida desde la parte superior de la subrasante, pulg

k = constante obtenida a partir de análisis de regresión

k está limitado por un valor de 0.000001 para evitar inconsistencias, la deformación permanente total en la capa de subrasante se obtiene resolviendo la siguiente integral;

$$\sigma_{soil} = \varepsilon_{p,z} = 0 \int_0^{h_{bedrock}} \exp(-kz) dz = \frac{1 - \exp(-kh_{bedrock})}{k} \varepsilon_{p,z} = 0 \quad (4.0.15)$$

Dónde:

σ_{soil} = deformación plástica total de la subrasante, pulg

$h_{bedrock}$ = profundidad hasta la roca madre, pulg

4.4.1.6. REGULARIDAD SUPERFICIAL

Es una medida del comportamiento funcional de un pavimento, a veces la única característica que percibe el usuario de la carretera, fundamentalmente, a través de la sensación de mayor o menor comodidad en la circulación. Se puede definir como el conjunto de efectos causados en los vehículos por las variaciones en el perfil longitudinal real de la calzada, respecto del teórico del proyecto.

El IRI es una medida de la influencia de la uniformidad del perfil longitudinal de la carretera sobre la calidad de la rodadura, que representa la vibración de un vehículo típico de pasajeros como resultado de la falta de regularidad de la superficie de la vía ^[33]. El comportamiento típico del IRI en un pavimento a lo largo de la vida útil se muestra en la figura 12.

La metodología de medición de la rugosidad en la MEPDG se implementa utilizando el índice de regularidad internacional (IRI), a partir del modelo de regresión que consta de 4 factores principales que contribuyen a la construcción de la siguiente expresión ^[12];

$$IRI = IRI_0 + \Delta IRI_D + \Delta IRI_F + \Delta IRI_S \quad (4.0.16)$$

Donde,

IRI = Índice de rugosidad internacional

IRI_0 = IRI inicial

ΔIRI_D = aumento del IRI debido al daño

ΔIRI_F = aumento de IRI debido al levantamiento de la subrasante por heladas potenciales

ΔIRI_S = aumento IRI debido al potencial de hinchamiento de la subrasante

La ecuación anterior es genérica, puesto que los parámetros que presenta poseen variaciones en función del tipo de la obra, (ya sea nueva o rehabilitada).

La premisa del diseño incluido en la MEPDG para predecir la degradación de la regularidad superficial es que la aparición de daños en la superficie trasciende a un aumento de la rugosidad (aumento del valor del IRI), o en otras palabras, una reducción de la regularidad superficial. Las ecuaciones para pavimentos flexibles y rígidos se desarrollaron a partir de datos recogidos dentro del programa LTPP - Long Term Pavement Performance (estudio del comportamiento del pavimento a largo plazo) y están incluidos en el MEPDG para predecir el IRI en el tiempo para pavimentos de superficie de HMA ^[28].

Ecuación para pavimentos asfálticos nuevos

$$IRI = IRI_0 + 0.0150(SF) + 0.400(FC_{Total}) + 0.0080(TC) + 40.0 (RD) \quad (4.0.17)$$

Dónde:

IRI_0 = IRI inicial después de la construcción, en pulg/millas

SF = factor sitio

FC_{Total} = área de fisuramiento por fatiga (fisuramiento combinado de piel de cocodrilo, longitudinal y por reflejo en la huella del neumático), porcentaje del área total del carril. Todas las fisuras relacionadas con la carga están combinadas en un área base; la longitud de las fisuras es multiplicada por 1 pie para convertir la longitud en un área base.

TC = longitud de fisuramiento transversal (incluyendo el reflejo de las fisuras transversales en pavimentos existentes de HMA), en pies/millas y

RD = Promedio de la profundidad del ahuellamiento, en pulg

El factor SF es calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$SF = \text{Age} (0.02003(PI+1) + 0.007947(\text{Precip}+1) + 0.000636(FI+1)) \quad (4.0.18)$$

Dónde,

Age = Edad del pavimento, en años

PI = Índice de porcentaje de plasticidad del suelo

FI = índice promedio del congelamiento anual, en °F días y

Precip = precipitación o pluviosidad promedio anual, en pulg.

Ecuación para casos de recapeo con mezcla asfáltica sobre pavimentos rígidos:

$$IRI = IRI_0 + 0.00825(SF) + 0.575(FC_{Total}) + 0.0014(TC) + 40.8(RD) \quad (4.0.19)$$

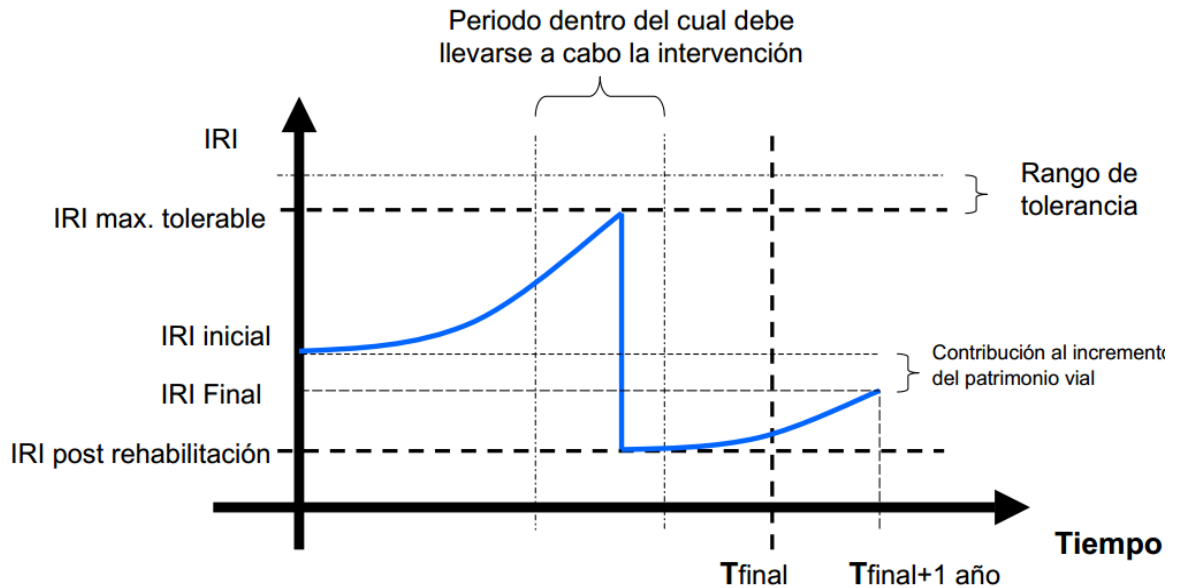


Figura 12. Comportamiento del IRI.

FUENTE: Evaluación de Corredores Viales de Mantenimiento Integral - Instituto Nacional de Vías - Secretaria General Técnica 2004.

4.4.2. MODELOS DE DESEMPEÑO EN PAVIMENTOS RIGIDOS JPCP- JOINTED PLAIN CONCRETE PAVEMENT (PAVIMENTO DE CONCRETO CON JUNTAS SIMPLES) MEPDG

Las funciones de transferencia de daño y deterioro para pavimentos rígidos y recapados de concreto de cemento Pórtland fueron calibrados bajo el proyecto NCHRP 1-40D (NCHRP, 2006). A continuación se resume la metodología y los modelos matemáticos utilizados para cada indicador de desempeño.

4.4.2.1. FISURAMIENTO TRANSVERSAL DE LOSAS (ABAJO HACIA ARRIBA Y ARRIBA HACIA ABAJO)

Fisuramiento de la losa que ocurre aproximadamente perpendicular al eje del pavimento, o en forma oblicua a este, dividiendo la misma en dos planos (ver figura 13). Las causas de este tipo de deterioro son las excesivas repeticiones de

cargas pesadas (fatiga), deficiente apoyo de las losas, ausencia de juntas transversales, asentamiento en la fundación, excesiva relación longitud/ancho de la losa o deficiencias en la construcción de estas ^[36].

El fisuramiento transversal de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo generado en los pavimentos rígidos es calculado por el MEPDG como un porcentaje del número total de las losas. Este tipo de fisura no está relacionada con las cargas por neumático, que es predominantemente perpendicular a la línea central del pavimento, es en cambio causada por las bajas temperaturas o gradientes térmicos.

Cualquier losa se fisura ya sea de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo, pero no de ambos modos. Por lo tanto, la predicción por separado de las fisuras de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo no tiene mucho significado y el fisuramiento combinado se reporta excluyendo la posibilidad de que ambos modos de fisuras ocurran en la misma losa.

El porcentaje de losas con fisuras transversales (incluyendo todos los niveles de severidades) en un carril determinado se utiliza como medida del fisuramiento transversal y se predice utilizando la siguiente ecuación global, tanto para las fisuras de abajo hacia arriba como para las de arriba hacia abajo ^[28]:

$$CRK = \frac{1}{1+(DI_F)^{-1.98}} \quad (4.0.20)$$

Dónde:

CRK = Cantidad pronosticada de fisuramiento de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo (fracción) y

DI_F = daño por fatiga.

La expresión general para las acumulaciones de daño por fatiga considerando todos los factores críticos para el fisuramiento transversal del JPCP se conoce como hipótesis de Miner y se describe a continuación ^[28]:

$$DIF = \frac{n_{i,j,k,l,m,n,o}}{N_{i,j,k,l,m,n,o}} \quad (4.0.21)$$

Dónde:

$n_{i,j,k,l,m,n,o}$ = número de repeticiones de aplicaciones de carga en la condición

i,j,k,l,m,n

$N_{i,j,k,l,m,n,o}$ = número permitido de aplicaciones de carga en la condición

i,j,k,l,m,n

i = Edad (considerado para el cambio en el módulo de PCC de rotura y elasticidad, fricción entre losa y base, deterioro de la LTE de la banquina)

j = Mes (considerado para los cambios en el módulo elástico de la base y el módulo dinámico efectivo de la reacción de la subrasante)

k = Tipo de Eje (sencillo, doble y triple para fisuramiento de abajo hacia arriba; distancia ejes corta, mediana y larga para fisuramiento de arriba hacia abajo)

l = Nivel de carga (carga incremental para cada tipo de eje) y

m = diferencia de temperatura equivalente entre las superficies de PCC superior e inferior.

n = distancia de la carga al borde de la losa y

o = Fracción horaria del tránsito de camiones



Figura 13. Fisuramiento Transversal en Losas.

FUENTE: Curso básico de diseño de Pavimentos Fernando Sanchez Sabogal.

El número permitido de aplicaciones de carga se determina utilizando la siguiente ecuación para fatiga de PCC [28]:

$$\text{Log } N_{i,j,k,l,m,n} = C_1 \cdot \frac{MR_i}{\sigma_{i,j,k,l,m,n}}^{C_2} \quad (4.0.22)$$

Dónde:

$N_{i,j,k,l,m,n}$ = Número permitido de aplicaciones de carga en la condición i,j,k,l,m,n

MR_i = módulo de rotura del concreto en la edad i , en psi,

$\sigma_{i,j,k,l,m,n}$ = Esfuerzo aplicado en la condición i,j,k,l,m,n

C_1 = constante de calibración 2.0 y

C_2 = constante de calibración 1.22

Una vez que los daños de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba son calculados, el fisuramiento total combinado se determina utilizando la siguiente ecuación [28]:

$$\text{TCRACK} = (\text{CRK}_{\text{Bottom-up}} + \text{CRK}_{\text{Top-down}} - \text{CRK}_{\text{Bottom-up}} * \text{CRK}_{\text{Top-down}}) * 100\% \quad (4.0.23)$$

Dónde:

TCRACK = Fisuramiento transversal total (porcentaje, todas las severidades)

CRK_{Bottom-up} = Cantidad pronosticada de fisuramiento transversal de abajo hacia arriba (fracción)

CRK_{top-down} = Cantidad pronosticada de fisuramiento transversal de arriba hacia abajo (fracción)

4.4.2.2. ESCALONAMIENTO PROMEDIO EN JUNTAS TRANSVERSALES

Es una falla que corresponde a un desnivel de la losa en su junta con respecto a una losa vecina por efecto del tránsito (ver figuras 14 y 15).

Las principales causas del escalonamiento entre losas, son: deficiencia en el traspaso de cargas entre las losas o trozos de losas, erosión de la base en las inmediaciones de la junta o grieta, asentamiento diferencial de la subbase o subrasante y falta de capacidad de soporte de la subrasante. El escalonamiento de las juntas puede ocasionar fractura de la losa si éste se combina con bombeo del material de base ^[34].

El escalonamiento promedio en juntas transversales en el MEPDG se predice mes a mes utilizando un enfoque incremental. El incremento del escalonamiento se determina cada mes y el nivel actual de escalonamiento afecta la magnitud del incremento. El escalonamiento en cada mes se determina como la suma de los incrementos del escalonamiento de todos los meses anteriores en la vida del pavimento desde la fecha de apertura al tráfico usando las siguientes ecuaciones [28].

Calculo del incremento de escalonamientos al final de cada mes:

$$\Delta\text{Fault}_i = C_{34} * (\text{FAULTMAX}_{i-1} - \text{Fault}_{i-1})^2 * \text{DE}_i \quad (4.0.24)$$

$\Delta Fault_i$ = cambio incremental (mensual) en el escalonamiento en junta transversal promedio durante el mes i, en pulg

$FAULTMAX_{i-1}$ = escalonamiento máximo

$Fault_{i-1}$ = escalonamiento acumulativo al comienzo del mes

DE_i = Energía diferencial (para todos los tipos de eje y nivel de carga)

$$C_{34} = C_3 + (C_4 * FR^{0.25})$$

$$C_3 = 0.001725, C_4 = 0.0008$$

FR = Índice base de congelamiento definido como porcentaje del tiempo en que la temperatura superior de la base está por debajo de la temperatura de congelamiento (32°F)

Escalonamiento acumulado al final de cada mes:

$$Faultt_m = \sum_{i=1}^m \Delta Fault_i \quad (4.0.25)$$

$$FAULTMAX_i = FAULTMAX_0 + C_7 * \sum_{j=1}^m DE_j * Log 1 + C_5 * 5.0^{EROD} C_6 \quad (4.0.26)$$

$$FAULTMAX_0 = C_{12} * \delta_{curling} * Log 1 + C_5 * 5.0^{EROD} * Log \frac{P_{200} * WetDays}{Ps} C_6$$

(4.0.27)

Dónde:

$FAULTMAX_i$ = Escalonamiento máximo en junta transversal promedio para el mes i, en pulg,

$FAULTMAX_0$ = Escalonamiento máximo inicial en junta transversal promedio, en pulg,

EROD = Factor de erosionabilidad de la base/subbase,

DE_i = Energía diferencial (para todos los tipos de eje y nivel de carga)

$\delta_{curling}$ = Deflexión máxima promedio mensual hacia arriba de la esquina de la losa de concreto debido al alabeo por temperatura y humedad.

Ps = sobrecarga en la subrasante, en libras,

P_{200} = Porcentaje del material de subrasante que pasa el tamiz #200

WetDays = Número promedio de días húmedos al año (más de 0.1 pulg. De lluvia)
y

$C_{1,2,3,4,5,6,7,12,34}$ = constantes de calibración global ($C_1 = 1.29$; $C_2 = 1.1$; $C_5 = 250$; $C_6 = 0.4$; $C_7 = 1.2$)

$$C_{12} = C_1 + C_2 * FR^{0.25}$$

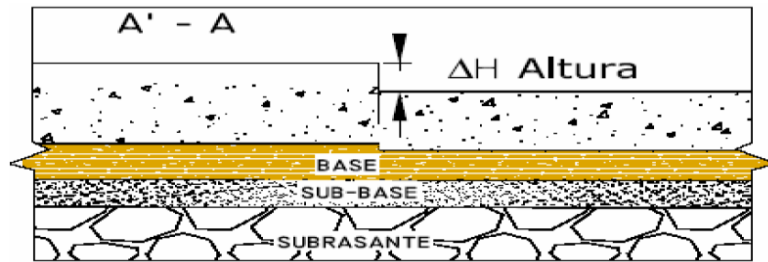


Figura 14. Vista en perfil: Detalle del Escalonamiento.

FUENTE: Manual para la inspección visual de Pavimentos Rígidos, octubre de 2006. Bogotá D.C.

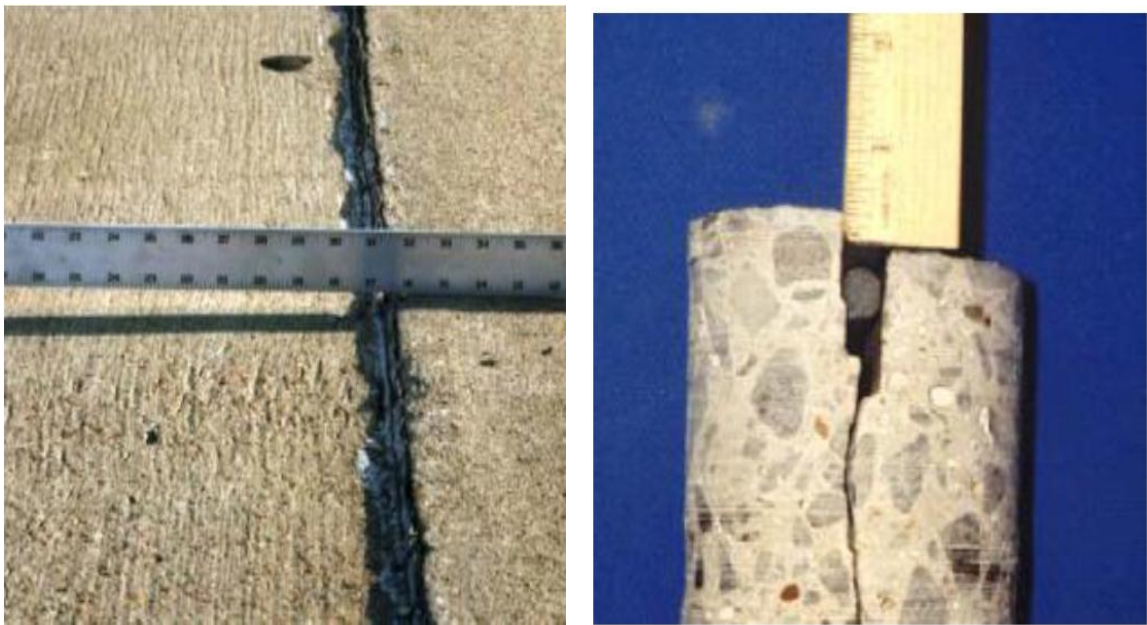


Figura 15. Escalonamiento.

FUENTE: Curso básico de diseño de pavimentos Fernando Sanchez Sabogal.

4.4.2.3. REGULARIDAD SUPERFICIAL EN JPCP - JOINTED PLAIN CONCRETE PAVEMENT (PAVIMENTO DE CONCRETO CON JUNTAS SIMPLES)

En la MEPDG, la regularidad superficial se predice como una función del perfil inicial del pavimento como se construyó y cualquier cambio en el perfil longitudinal en el tiempo y el tránsito debido a deterioros y movimientos del terreno de fundación. El modelo IRI fue calibrado y validado utilizando datos de campo del LTPP para asegurar que se produzcan resultados validos bajo una variedad de condiciones climáticas y de campo. La siguiente ecuación es el modelo final calibrado ^[28].

$$IRI = IRI_i + 0.8203*CRK + 0.4417*SPALL + 0.4929*TFAULT + 25.24*SF \quad (4.0.28)$$

Dónde:

IRI = IRI pronosticado, en pulg/mi

IRI_i = regularidad superficial inicial medida como IRI, en pulg/mi

CRK = Porcentaje de losas con fisuras transversales (totales las severidades),

SPALL = Porcentaje de juntas con descamado (severidades medianas y altas),

TFAULT = Total acumulado del escalonamiento de la junta por milla, en pulg y

SF = Factor sitio

$$SF = AGE*(1+0.5556*FI)*(1+P_{200})*10^{-6} \quad (4.0.29)$$

AGE = edad del pavimento, en años

FI = Índice de congelamiento, en °F-días y

P₂₀₀ = Porcentaje de material subrasante que pasa el tamiz No 200.

El descamado de la junta transversal se determina de acuerdo con la ecuación que se calibro utilizando el LTPP y otros datos.

$$SPALL = \frac{AGE}{AGE+0.01} \frac{100}{1+1.005^{-12*AGE+SCF}} \quad (4.0.30)$$

Dónde:

SPALL = Porcentaje de juntas con descamado (severidades medianas y altas),

AGE = edad del pavimento desde su construcción, en años y

SCF = Factor de escala basado en la relación con el sitio, diseño y clima.

$$SCF = -1400 + 350 * AC_{PCC} * (0.5 + PREFORM) + 3.4f'c*0.4 - 0.2 (FTcycles*AGE) + 43 H_{PCC} - 536 WC_{PCC} \quad (4.0.31)$$

AC_{PCC} = Contenido de aire en el PCC, en %

AGE = Tiempo desde la construcción, en años,

PREFORM = 1 si el sellador preformado está presente; 0 si no lo está,

$f'c$ = Resistencia del PCC a la compresión, en psi

FTcycles = Número promedio anual de ciclos de congelamiento-descongelamiento,

H_{PCC} = Espesor de la losa PCC, en pulg y

WC_{PCC} = Relación de agua/cemento del PCC.

4.4.3. MODELOS DE DESEMPEÑO EN PAVIMENTOS RIGIDOS CRCP – CONTINUOUSLY REINFORCED CONCRETE PAVEMENT (PAVIMENTO DE CONCRETO CONTINUAMENTE REFORZADO) MEPDG

4.4.3.1. PUNZONAMIENTO

Es la falla más importante en pavimentos de hormigón con armadura continua.

Esto ocurre, en general, en el borde externo del carril más transitado por los camiones Este corresponde a un esfuerzo tangencial originado por una carga

localizada en una superficie pequeña de un elemento bidireccional de hormigón, alrededor de su soporte (ver figura 16). Este esfuerzo produce un efecto puntual sobre su plano de apoyo. En CRCP son el resultado de la formación longitudinal de fisuras de arriba hacia abajo cuando ocurre la fatiga entre 2 fisuras adyacentes. Normalmente ocurren cerca de los extremos de las carreteras, cuando la superficie del pavimento es cóncava y la transferencia de cargas entre la losa y la vereda es baja. A veces se encuentran evidencias de bombeo cerca de los sectores punzados. La ocurrencia del punzonamiento involucra una serie de pasos similares al cálculo del escalonamiento (considerando las variaciones que ocurren en cada mes)^[37]. El siguiente modelo predice el punzonamiento del CRCP como una función acumulada del daño por fatiga debido a los esfuerzos de arriba hacia abajo en la dirección transversal^[28]:

$$PO = \frac{A_{PO}}{1 + \alpha_{PO} * DI_{PO}^{\beta_{PO}}} \quad (4.0.32)$$

Dónde:

PO = Número total pronosticado de punzonamientos/milla de mediana y alta severidad,

DI_{PO} = Daño por fatiga acumulada (debido a la flexión de la losa en la dirección transversal) al final del y^{avo} año y

A_{PO}, α_{PO}, β_{PO} = constantes de calibración (195.789, 19.8947 y -0.526316 respectivamente)

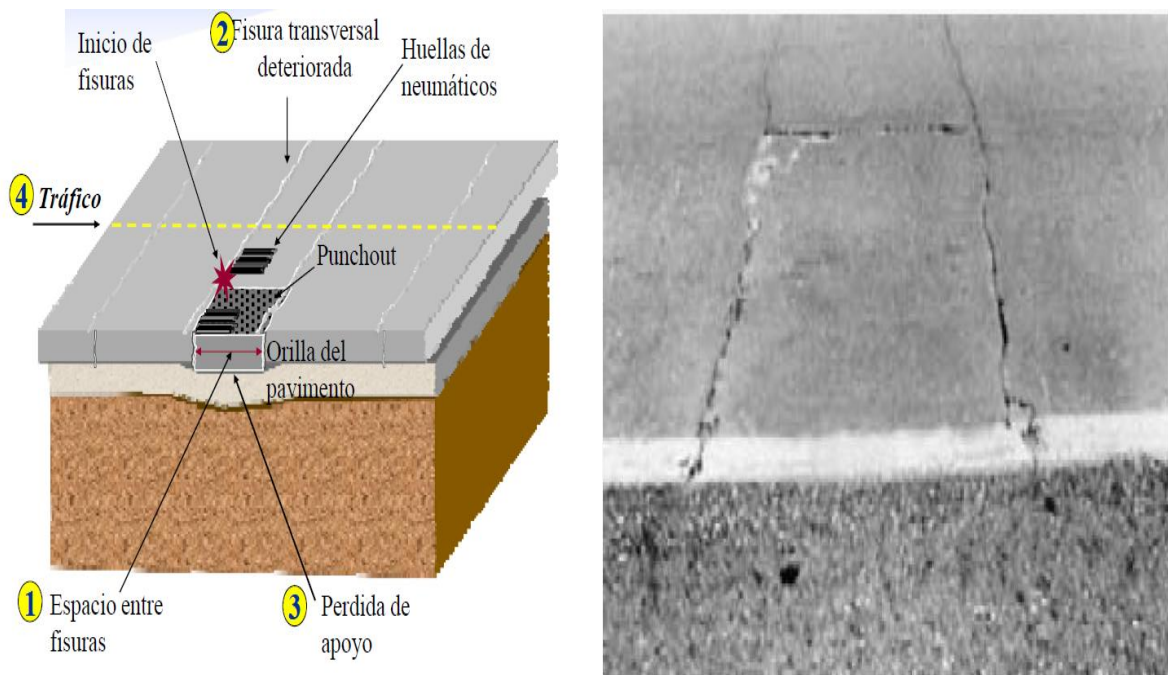


Figura 16. Punzonamiento.

FUENTE: Curso básico de diseño de pavimentos Fernando Sánchez Sabogal.

Para cada nivel de carga en cada configuración de equipo o de espectros de carga por eje, el esfuerzo de tracción en la parte superior de la losa se utiliza para calcular el número de repeticiones de carga permisible, $N_{i,j}$ debido a este nivel de carga durante este incremento de tiempo como ^[28]:

$$\text{Log } N_{i,j} = \frac{MR_i}{\sigma_{i,j}}^{1.22} - 1 \quad (4.0.33)$$

Dónde:

$N_{i,j}$ = número de repeticiones de carga permisible

MR_i = Módulo de rotura del PCC en la edad i , en psi y

$\sigma_{i,j}$ = Esfuerzo aplicado en incremento del tiempo i debido a la magnitud de la carga j , en psi.

4.4.3.2. REGULARIDAD SUPERFICIAL EN CRCP – CONTINUOUSLY REINFORCED CONCRETE PAVEMENT (PAVIMENTO DE CONCRETO CONTINUAMENTE REFORZADO)

El cambio de regularidad superficial CRCP es el resultado de una combinación de perfil inicial del pavimento como fue construido y cualquier cambio en el perfil longitudinal en el tiempo y el tráfico debido al desarrollo de los deterioros y los movimientos de la fundación. Los deterioros claves que afectan el IRI para el CRCP incluyen punzonamientos. El modelo global del IRI para el CRCP se da de la siguiente manera ^[28]:

$$IRI = IRI_i + 3.15 * PO + 28.35 * SF \quad (4.0.34)$$

Donde;

IRI_i = IRI inicial, en pulg/mi

PO = Numero de punzonamientos/milla de severidad mediana y alta

SF = Factor sitio

$$SF = AGE * (1 + 0.556 * FI) * (1 + P_{200}) * 10^{-6} \quad (4.0.35)$$

Donde;

AGE = Edad del pavimento, en años,

FI = Índice de congelamiento, en °F días, y

P_{200} = Porcentaje del material subrasante que pasa el tamiz No 200.

CAPÍTULO 5

MODELO CLIMÁTICO .ICM - “MECÁNISTICO-EMPÍRICO”

En este capítulo se muestra el formato .icm (input climate model) compatible con el MEPDG y se consideran los 5 factores ambientales que influyen en la respuesta y el rendimiento de los pavimentos de forma horaria (temperatura, velocidad del viento, porcentaje de cielo claro, precipitación y profundidad del nivel freático). Además de lo anterior, se exponen otros parámetros como la latitud, longitud, altitud, radiación solar, la hora de salida y puesta del sol, las cuales son obtenidas a partir de las coordenadas geográficas, entre otros.

Para la elaboración de los archivos climáticos .icm se utilizan los registros de cada factor que el departamento de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia “IDEAM” ofrece. La información climática suministrada por el Servicio Meteorológico de nuestro país en comparación con la base de datos de cerca de 851 estaciones meteorológicas que presenta Estados Unidos es muy rudimentaria, todo esto debido al hecho de que el IDEAM no maneja toda la información en forma horario como requiere el ICM, por lo que se realizaron ajustes concienzudos de los parámetros en aras de obtener los resultados esperados.

En la realización de este proyecto se usaron tres municipios de Colombia cada uno con un piso térmico diferente: Cálido, Frio y Paramo.

La clasificación climática empleada es la de Caldas (1802), en la cual se presentan cinco pisos térmicos: páramo alto, páramo bajo, frío, templado y cálido.

Tabla 5. Clasificación Climática- Caldas.

Piso Térmico	Símbolo	Rango Altura, m	Temperatura, °C
Cálido	C	0- 1000	≥ 24
Templado	T	1001-2000	$24 > T \geq 17,5$
Frío	F	2001 a 3000	$17,5 > T \geq 12$
Páramo bajo	Pb	3001 a 3700	$12 > T \geq 7$
Páramo alto	Pa	37001 a 4200	< 7

Teniendo en cuenta la tabla anterior se toman tres municipios de Colombia con características, cálido, frío y Paramo:

Tabla 6. Caracterización de municipios de Colombia utilizados para el modelamiento climático.

Piso térmico	Sitio	Departamento	msnm	Temperatura
Cálido	Apartadó	Antioquia	30	29°C
Frío	Santa Rosa de Osos	Antioquia	2550	13°C
Páramo	Paramo de Sumapaz	Cundinamarca Huila y Meta	3610	11°C

La guía de diseño requiere un mínimo de 24 meses de datos climáticos para fines de cálculo ^[38]. Dado que las condiciones ambientales deben tenerse en cuenta durante todo el período de diseño del pavimento, los datos de sólo 24 meses, (cantidad mínima de datos climáticos requeridos para ejecutar el MEPDG), pueden no representar las condiciones climáticas de forma adecuada para un lugar determinado.

La información de cualquier estación meteorológica puede presentar un comportamiento inusualmente caliente o frío, o tener encima o por debajo las precipitaciones medias. Si un número relativamente pequeño de meses se utilizan para representar los datos del clima, se vuelve sensible a los valores atípicos, que pueden referirse a condiciones climáticas anormales o datos pobres. Aun así, 116 meses puede no ser suficiente para representar las condiciones climáticas en un solo lugar ^[39].

Teniendo en cuenta las consideraciones antes plasmadas y lo costoso que es la información climática en Colombia, se utilizan para este proyecto solo 2 años de

información para la elaboración de los tres archivos climáticos de modo que se ejecute el software MEPDG o DG2002 - AASHTO 2002 Design Guide (guía de diseño AASHTO 2002) y se obtengan los resultados esperados.

En el siguiente gráfico se muestra el formato .icm con todas las variables de entrada.

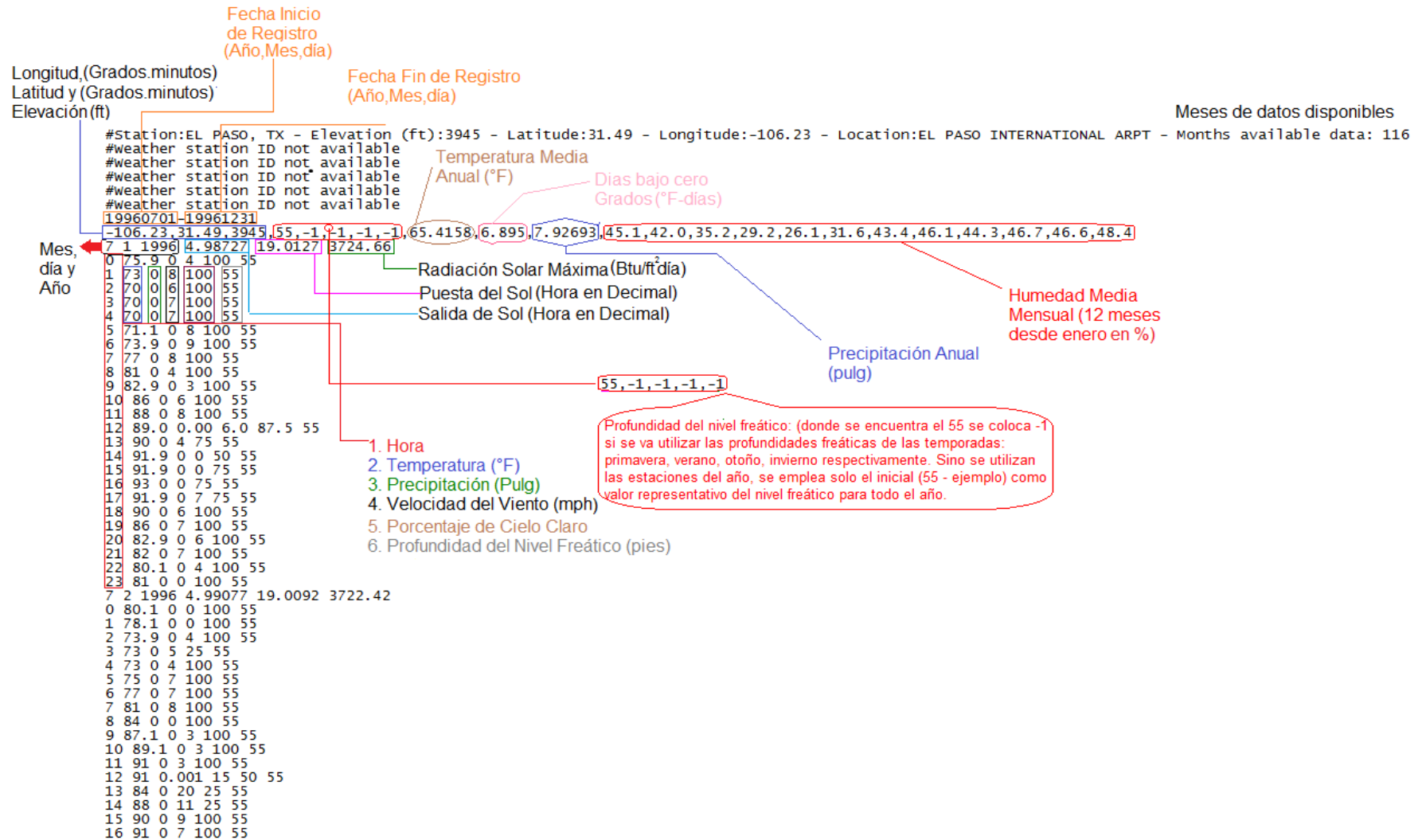


Figura 17. Formato .icm

5.1. FACTORES HORARIOS

5.1.1. PRECIPITACIÓN

Precipitación (unidad MEPDG: pulgadas), es uno de los factores ambientales claves para llevar a cabo un buen diseño de pavimentos. Sin embargo, junto con los demás factores su completa integración en el proceso de diseño es un evento reciente. En la MEPDG se emplea la cantidad de precipitación acumulada para la hora anterior. Por ejemplo, el valor a las 6:00 a.m. representaría el período de tiempo entre 5:00 y 6:00 a.m. ^[40].

La dificultad de la incorporación de la precipitación, y los otros componentes climáticos en el proceso de diseño se puede atribuir a la compleja interacción entre ellos y elementos de diseño como son: materiales, diseño estructural etc.

Cabe destacar que la recolección y/o la disponibilidad de registros climáticos también representan un reto, ya que las carreteras se construyen para durar varios años, de forma que la obtención de los diferentes patrones del clima puede resultar a veces insegura para el proceso de diseño ^[29].

La precipitación es cualquier forma de hidrometeoro que cae del cielo y llega a la superficie terrestre. Toma varias formas, incluyendo las heladas, el granizo, la lluvia y la llovizna. Este estudio considera que la forma de precipitación en el ICM es la lluvia¹.

5.1.1.1. Efectos de la Precipitación

Los pavimentos asfálticos y rígidos son susceptibles a los cambios de precipitación en sus formas más extremas, como durante las inundaciones

¹ [http://es.wikipedia.org/wiki/Precipitaci%C3%B3n_\(meteorolog%C3%ADa\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Precipitaci%C3%B3n_(meteorolog%C3%ADa))

repentinas, tanto, que la lluvia puede desgastar mecánicamente estructuras enteras del pavimento.

Las capas inferiores de la estructura de pavimento que se componen de materiales naturales como la grava en las bases y de la tierra cruda para sub-base, llevan la peor parte debido a las variaciones en el contenido de la humedad. [12].

La humedad presente en el suelo puede generar ciertos tipos de inconvenientes, como son:

- Afectación de la subrasante mediante la destrucción del enlace entre partículas de suelo, haciéndola más susceptible a las cargas de los vehículos.
- Afectación del estado de tensión en el suelo a través de la succión o la presencia de presión de poros, y esto es más acentuado para los suelos insaturados.
- En lugares templados o de congelación del agua el suelo presenta expansión y formación de lentes de hielo, que a su vez generan fisuramiento térmico transversal en el pavimento.

La consideración de los efectos de humedad en las capas del pavimento no ligadas depende en gran medida de la capacidad de las capas para recuperar su forma original cuando se someten a ciclos de carga-descarga, que se cuantifica con el módulo de resiliente, debido a la importancia de M_r se realiza un análisis de este posteriormente.

El contenido de humedad volumétrica de diferentes tipos de suelos se obtiene utilizando la siguiente ecuación propuesta por la Autoridad Federal de Carreteras (FHWA) [11].

$$\theta = a_1 + a_2 K a + a_3 K_a^2 + a_4 k_a^3 \quad (5.1.1)$$

Dónde:

a_i = correlación que dependen del tipo de suelo, coeficientes ya sea grueso o fino

K_a = constante dieléctrica del suelo

θ = el contenido de humedad volumétrica

5.1.1.2. Humedad y succión del suelo

El contenido de humedad se refiere a la cantidad de agua en el suelo. Se puede expresar de dos maneras; gravimétrica o volumétricamente. El contenido gravimétrico de humedad, w es la relación entre la masa de agua y la de los sólidos, mientras que el contenido de humedad volumétrico, θ es la relación entre el volumen de agua por el volumen de sólidos. Observamos aquí como w y θ se relacionan mediante la siguiente ecuación propuesta por Quintero ^[11];

$$\theta = w \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (5.1.2)$$

Dónde:

θ = contenido de humedad volumétrica

w = contenido de humedad gravimétrico

P_d = densidad del suelo seco

P_w = densidad del agua

Para tener claridad de los términos anteriores se define la saturación, S , como la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos del suelo. A menudo se expresa como un porcentaje. La siguiente ecuación se utiliza para determinar el grado de saturación:

$$S = \frac{w}{\frac{p_w}{p_d} \frac{1}{G_s}} \quad (5.1.3)$$

Dónde:

G_s = Gravedad específica de los sólidos

El movimiento del agua en los suelos se rige por las fuerzas de atracción entre las partículas de agua y el suelo, y las presiones resultantes dependen de la saturación del suelo. Wilson define succión como la diferencia entre el agua y las presiones de aire si la presión osmótica debido a las sales disueltas no está incluida. Estas relaciones se expresan con la siguiente ecuación ^[24]:

$$\Psi = h_m + h_s \quad (5.1.4)$$

Dónde:

Ψ = succión total

h_m = succión matricial = $u_a - u_w$

h_s = soluto de succión o presión osmótica debido a las sales disueltas

u_a = presión de poro de aire

u_w = presión del agua intersticial

Las presiones de aire y de agua se ven afectadas por la temperatura, por lo tanto el flujo de la humedad en los suelos parcialmente saturados es una función de las presiones de la temperatura, la conductividad hidráulica, aire y agua ^[11]. Varias ecuaciones pueden usarse para describir el flujo de la humedad en el suelo. La ley de clásica de Darcy es una de ellas;

$$q = -k \theta \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (5.1.5)$$

Dónde:

q = velocidad del agua m/s
 k = conductividad hidráulica
 θ = contenido de humedad volumétrico
 $\partial\phi/\partial x$ = gradiente hidráulico

Del mismo modo se muestra la relación del gradiente de presión de aire de forma más detallada en el modelo formulado por Dakshanamurthy y Fredlund ^[11];

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} = -C_a \frac{\partial u_w}{\partial t} + C_a^u \frac{\partial \phi}{\partial x} + C_{at} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (5.1.6)$$

Dónde:

u_a = presión del aire
 u_w = presión del agua
 T = temperatura
 C_{at} = coeficiente de interacción de temperatura asociada con la fase de aire
 C_a^v = coeficiente de consolidación con respecto a la fase de aire
 C_a = coeficiente de interacción asociado con la fase de aire

El tema de interés para los ingenieros de pavimento en los últimos años ha sido el contenido de humedad de las diferentes capas del pavimento que no necesariamente tienen una correlación directa con la precipitación incidente.

5.1.1.3. Curva Característica agua - suelo (Soil water characteristic curve - SWCC)

La (SWCC) es una representación gráfica que describe la relación entre la succión del suelo y el contenido de humedad, definida por Witczak et al. como la variación de la capacidad de almacenamiento de agua dentro de los poros micro y macro de un suelo con respecto a la succión ^[47].

Esta relación se representa gráficamente con frecuencia con w , θ ó S vs. la succión.

Un gráfico típico de la SWCC se muestra a continuación;

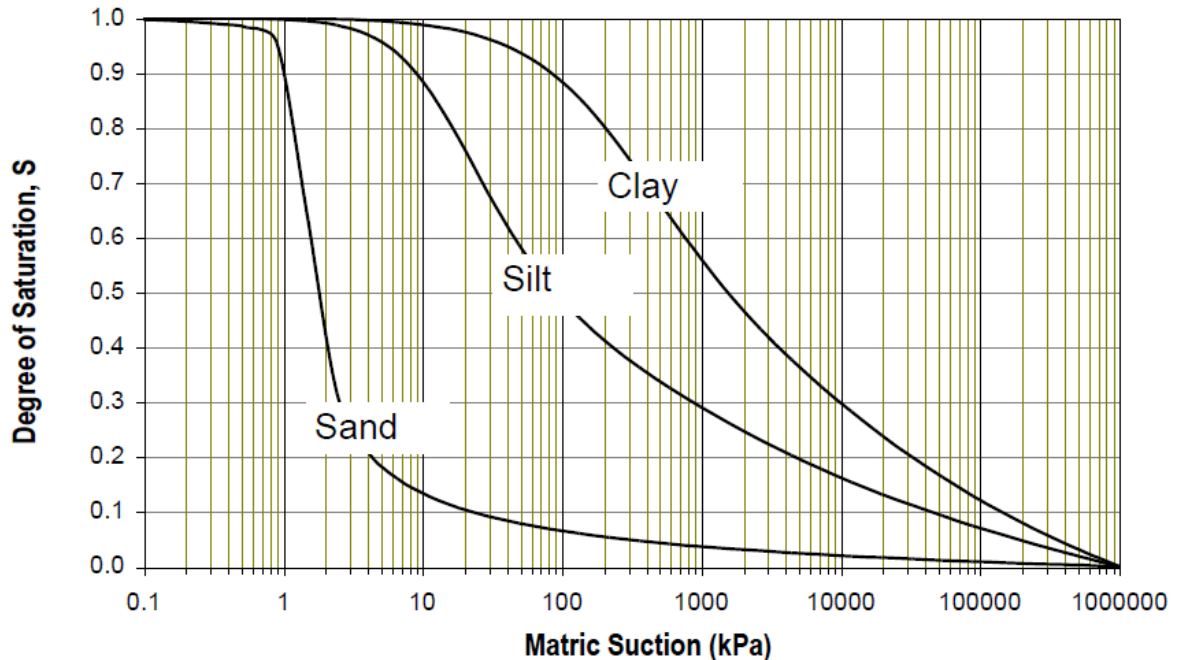


Figura 18. Curva característica Suelo – Agua.

FUENTE: NCHRP 1-40D Final Report Models incorporated into the current enhanced Integrated Climatic Model.

La SWCC es dependiente del tipo de suelo. La SWCC resulta ser vital para modelar el flujo de la humedad en los suelos no saturados y por lo tanto predecir el contenido de humedad en el diseño del pavimento ^[47]. El SWCC es de gran importancia ya que este es el principal módulo implementado en la EICM para predecir la humedad.

Módulo Resiliente (M_r)

Es la energía máxima recuperable por unidad de volumen que puede ser almacenada elásticamente, y está representada por el área bajo la curva en la región elástica de la curva tensión-deformación ^[12]. Es una medida de la respuesta

del pavimento y su valor está muy influenciado por la variación en el contenido de humedad de las capas no ligadas. Aplicado tanto en la investigación empírica y en el diseño, se utiliza para definir las propiedades fundamentales de los materiales, formular modelos constitutivos, predecir el esfuerzo, la deformación, los desplazamientos y el desarrollo de modelos de desempeño.

5.1.1.4. Modelos de precipitación existentes

Como se detalla en el capítulo 3, la Colaboración histórica del Modelo de Lluvia Africana (CHARM) es una herramienta específica de predicción tiempo-lluvia que se basa en los campos de reanálisis y para lo cual se interpolan los datos del medidor con los resultados de los modelos orográficos.

En la evaluación de la respuesta y el rendimiento, la determinación del contenido de humedad de las capas no ligadas y por lo tanto sus módulos elásticos son de vital importancia para predecir la deformación permanente y otras deformaciones relacionadas.

Una gran cantidad del esfuerzo ingenieril se ha dedicado al seguimiento de los cambios en los módulos elásticos de materiales de pavimento con fluctuaciones en su contenido de humedad.

La complejidad de estas evaluaciones surgen por el hecho de que diferentes tipos de suelos reaccionan de manera diferente a la humedad, dando lugar a modelos separados para los agregados finos y gruesos. Entre los modelos del M_r más sobresalientes son los de Li y Selig^[48] que son de la forma cuadrática y se expresan como:

$$\text{Log } \frac{M_r}{M_{ropt}} = 0.98 - 0.28 w - w_{opt} + 0 - 0.029 w - w_{opt}^2 \quad (5.1.7)$$

Dónde:

M_r = Módulo resiliente con el contenido de humedad w , y la densidad seca como

$M_{r_{opt}}$

M_{opt} = módulo resiliente de la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptima w_{opt} .

Los coeficientes de la ecuación anterior varían dependiendo del esfuerzo de compactación y si se consideran o no el M_r y el M_{opt} en la gradación de material [12]. Existe irracionalidad en los modelos donde $w - w_{opt} = 0$, ya que dan el valor de la relación $M_r/M_{r_{opt}} = 0,98$ (o más baja para suelos de grano fino) en lugar de la unidad como se espera.

En el EICM la variación estacional del módulo resiliente se obtiene mediante la siguiente ecuación [12],

$$\text{Log } \frac{M_r}{M_{r_{opt}}} = a + \frac{b-a}{1 + \exp \ln \frac{b}{a} + km(S - S_{opt})} \quad (5.1.8)$$

Dónde:

$M_r/M_{r_{opt}}$ = proporción del módulo resiliente

M_r = módulo resiliente en cualquier tiempo dado

$M_{r_{opt}}$ = módulo resiliente en una condición de referencia

a = mínimo de $\log(M_r/M_{r_{opt}})$

b = máximo de $\log(M_r/M_{r_{opt}})$

km = parámetro de regresión

S = Grado de saturación en cualquier momento

S_{opt} = Grado óptimo de saturación

El módulo M_{ropt} es suministrado por el usuario en el EICM, y es el valor obtenido del óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca de los sólidos en el suelo. La anterior ecuación no asume que cambios ocurren dentro el estado de esfuerzos del suelo, así el M_{ropt} es constante. Sin embargo, el efecto del esfuerzo es tomado en consideración computando el M_{ropt} , y esto es dado por el modelo constitutivo universal así;

$$M_{ropt} = k_1 Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{k_3} \quad (5.1.9)$$

Dónde:

K_1, K_2, K_3 = parámetros de regresión

Pa = presión atmosférica

θ = esfuerzo mayor

τ_{oct} = esfuerzo cortante octaédrico

Se ha invertido un gran esfuerzo de investigación en el desarrollo de mejores modelos del Mr , donde el más reciente es el de Liang et al. en 2008, el cual presenta una ecuación que incluye la humedad y el estado de esfuerzos así ^[49],

$$Mr = k_1 Pa \left(\frac{\theta + Xw\psi_m}{Pa} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{k_3} \quad (5.1.10)$$

Dónde:

Ψ_m = succión matricial

Xw = Parámetro de esfuerzo efectivo de Bishop's

K_1, K_2, K_{pre} = parámetros de regresión

Pa = presión atmosférica

θ = esfuerzo mayor

τ_{oct} = esfuerzo cortante octaédrico

El EICM fue desarrollado con las regiones que experimentan condiciones invernales (incluido en el modelo CRREL – Cold Regions Research and Engineering Laboratory / Laboratorio de ingeniería dedicado a la Investigación de las regiones frías). La congelación y descongelación tienen un gran impacto en los módulos resilientes de los suelos, el efecto de congelación puede llegar a incrementar el módulo de entre 20 a 120 veces su valor. La formación de películas de hielo puede conducir a la generación de deterioros sobre los pavimentos, cuando se produce esto estructuralmente el pavimento es mucho más susceptible a daños ^[12].

Para tener en cuenta las variaciones de congelamiento sobre el pavimento, el motor interno del EICM subdivide el pavimento en células pequeñas con nodos y asigna un factor de ajuste ambiental (F_{env} - Environmental adjustment factor) a cada nodo, si el nodo es de descongelamiento (f_u), congelación (F_f) y recuperación (F_r). El F_{env} es un índice que está compuesto por los tres estados del suelo, además es uno de los principales productos de la EICM y se utiliza también para determinar el módulo resiliente del pavimento, como una función del tiempo t y la posición x , usando la siguiente relación ^[12],

$$M_r(x,t) = F_{env} * M_{ropt} \quad (5.1.11)$$

Para tener en cuenta los efectos del esfuerzo, los factores del entorno y el módulo resiliente, se dispuso la siguiente ecuación

$$M_r = F_{env} . k_1 P_a \frac{\theta}{P_a}^{k_2} \frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1^{k_3} \quad (5.1.12)$$

La Curva Característica agua-suelo (SWCC) se utiliza para obtener el contenido volumétrico de la humedad instantánea como una función de la succión. La SWCC se obtiene para un suelo determinado con la medición de la succión de una muestra representativa en el laboratorio usando papel filtro o el ensayo de placa.

Este procedimiento es tedioso y puede durar entre 3 días a una semana. La determinación en el laboratorio de la SWCC es necesaria con el objetivo de tener todas las herramientas especiales y disminuir la dificultad asociada al proceso. Cuando se realiza una familia de curvas en función de los tipos de suelos se obtienen diferentes modelos para la SWCC, la ecuación utilizada para la aplicación dentro la EICM fue la realizada por Fredlung y Xing debido a su sensibilidad y fiabilidad y se presenta como ^[12];

$$\theta = \theta_s \frac{1}{\ln(e + \frac{\psi}{a})^n}^m \quad (5.1.13)$$

Dónde:

θ = contenido de humedad volumétrico (vmc)

θ_s = contenido volumétrico de humedad residual

Ψ = succión

a, n, m son parámetros de la SWCC

Los valores del vmc se alimentan en el programa de análisis estructural que posee la ME para la predicción de la deformación permanente de las capas no ligadas.

El modelamiento del movimiento del agua se observa en el siguiente gráfico.

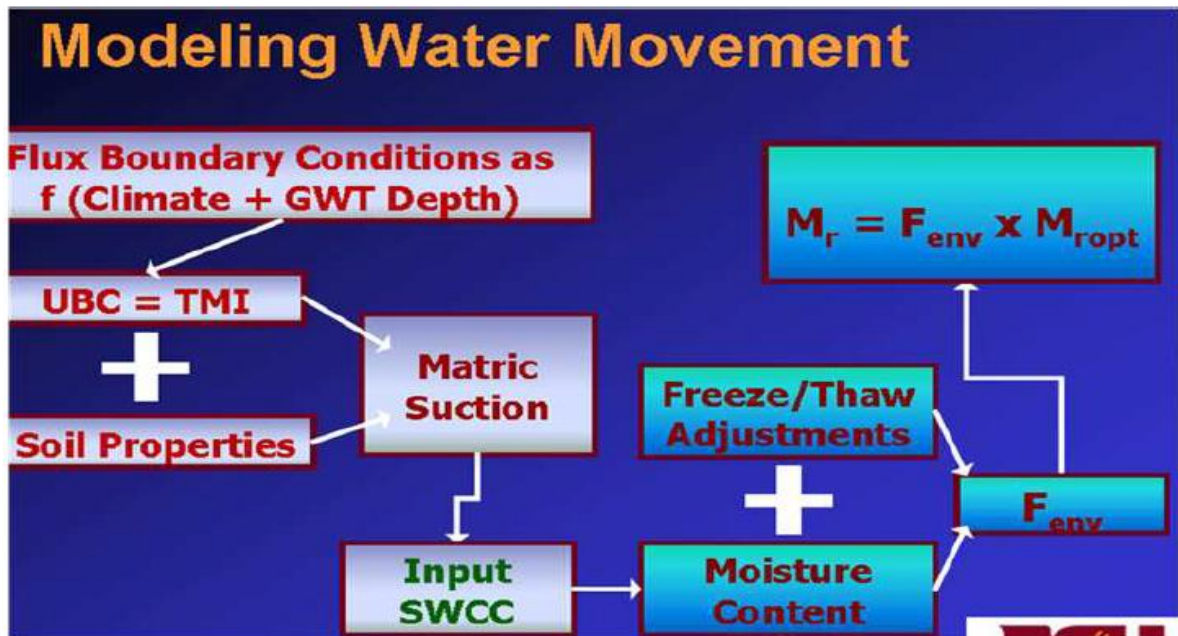


Figura 19. Modelamiento del movimiento del agua.

FUENTE: Witczak, M. W., Zapata, C.E., and Houston, W.N., *Models Incorporated Into The Current Enhanced Integrated Climatic Model NCHRP 9-23 Project Findings and Additional Changes After Version 0.7*, Inter Team Technical Report. Arizona State University, 2006.

El esquema anterior ilustra la interrelación entre el M_r y la SWCC, y su uso en la determinación de la F_{env} . El TMI se refiere al Índice de Humedad de Thornthwaite, una medida de la aridez / humedad de un sistema de suelo-clima, este es un índice utilizado por algunos métodos de diseño para predecir el potencial para el cambio de humedad del suelo y por lo tanto la magnitud de movimiento vertical potencial. La TMI mide el equilibrio de la humedad del suelo entre la evapotranspiración (demanda) y precipitación (la oferta) ^[11].

La succión del suelo está influenciada por el contenido de agua del suelo, que es a su vez relacionada con factores climáticos (Coleman 1965; Russam y Coleman 1961). Estos factores pueden combinarse en un índice climático llamado la humedad Thornthwaite Index (TMI), que indica la humedad del suelo y la condición de clima asociada (Thornthwaite 1948). La TMI depende de la naturaleza cíclica de humectación y secado en un sitio (es decir, precipitación y evapotranspiración). La TMI se calcula utilizando la siguiente ecuación ^[42].

$$TMI = (100q - 60DF) / Pe$$

(5.1.14)

Dónde:

q = la escorrentía de agua (cm)

DF = déficit de agua para el año (cm)

Pe = evapotranspiración potencial del agua para el año (cm).

5.1.1.5. Precipitaciones medias mensuales de los sitios de Estudio

Las precipitaciones medias mensuales del periodo (2001-2012), son determinadas con las precipitaciones mensuales adquiridas en el IDEAM, estas son muy variables a lo largo del año. Se observa que hay meses en los que se concentran un poco más (Abril, Mayo y Junio) y un poco menos como en (Enero, Febrero, Marzo). El Valor medio de la precipitación es de 169.70 mm.

Además se evidencia que las máximas precipitaciones se presentan sobre el municipio de Apartadó, seguido de Santa Rosa Osos y Sumapaz.

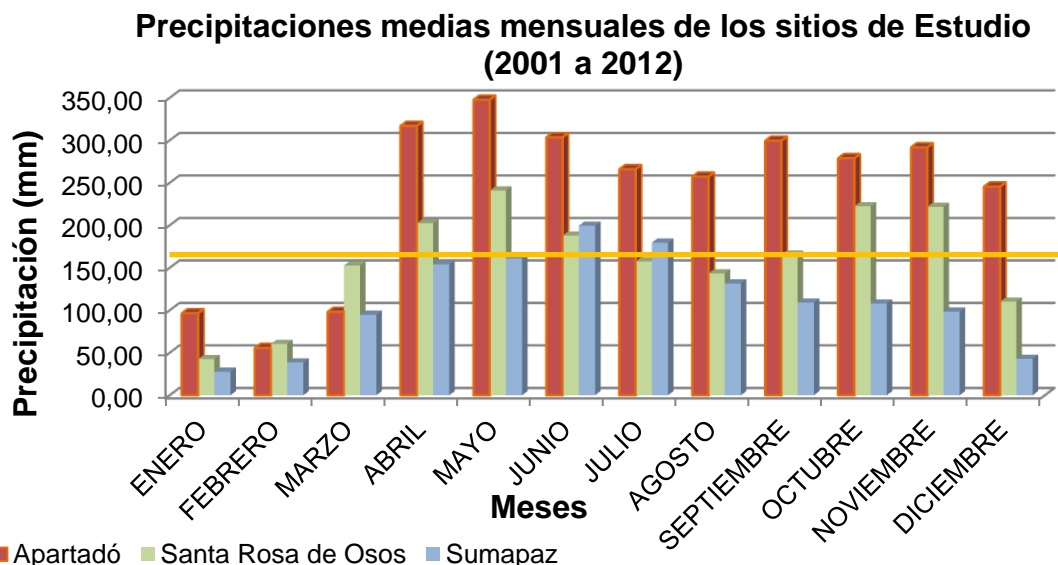


Figura 20. Precipitaciones medias mensuales de los sitios de Estudio (2001 a 2012).

FUENTE: Propia.

5.1.1.6. Distribución espacio-temporal del número de días con lluvia en Colombia

Desde el punto de vista climatológico, una de las características más representativas de las lluvias la constituye el número de días en que se presenta este fenómeno durante un mes determinado.

Este parámetro ha sido en general, poco estudiado en nuestro país, ya que la mayor parte de la atención de los climatólogos se ha dedicado al estudio de la cantidad total de lluvia medida en milímetros bien sea a nivel diario, mensual y anual ^[45].

La distribución espacio temporal de la precipitación total anual promedio multianual (mm) en Colombia se muestra en la figura 21.

Región Caribe

El centro y norte de La Guajira registran la menor frecuencia de días con lluvia con menos de 50 días al año. Igual número se registra en lugares aislados del litoral en Atlántico y Magdalena.

La mayor parte del centro de la región, correspondiente a los departamentos de Atlántico, Magdalena, norte de Sucre, Cesar y Córdoba, presenta valores de 50 a 100 días con lluvia, mientras que sobre la parte sur de estos mismos departamentos se registran entre 100 y 150 días con lluvia. Igual frecuencia muestran sectores montañosos de la región como son la Sierra Nevada de Santa Marta, Serranía del Perijá y Serranía de San Jacinto.

Región Andina

Las áreas con menor número de días con lluvia se concentran en los valles del alto Magdalena y alto Cauca en los departamentos de Huila, Tolima y Valle del

Cauca. También a lo largo de los valles de los ríos Chicamocha, Sogamoso y Patía, al sur del país y en gran parte del departamento de Norte de Santander.

Estas áreas presentan entre 100 y 150 días con lluvia al año, aunque es posible identificar núcleos aislados en el rango de 50 a 100 días. En las estribaciones de las cordilleras el número de días con lluvia crece paulatinamente hasta aproximarse a 200 días. Los núcleos de mayores frecuencias están localizados en el centro y occidente de Antioquia, sur de Santander y oriente de Cundinamarca y Boyacá, así como en lugares aislados ubicados en el Macizo Colombiano y Eje Cafetero. En estos sitios, el número de días con lluvia puede estar entre 200 y 250.

Orinoquia-Amazonia

El sector central de los departamentos de Casanare y Meta, así como el norte de Arauca, registra entre 100 y 150 días con lluvia.

El resto de la región orinoquense se sitúa en el rango de 150 a 200 días y en sectores del piedemonte puede ser algo mayor a 200. En la Amazonia, se presentan 200 a 250 días con lluvia en Caquetá, Amazonas, Vaupés y Putumayo. Hacia el piedemonte la frecuencia puede llegar a 300 días con lluvia al año.

Región Pacífica

La frecuencia es consistente con la alta pluviosidad de esta región, en la cual llueve más de 200 días al año. Algunos núcleos con más de 300 días de lluvia pueden ubicarse sobre el piedemonte de Nariño y en sectores de los litorales de Valle, Cauca y Chocó ^[45].

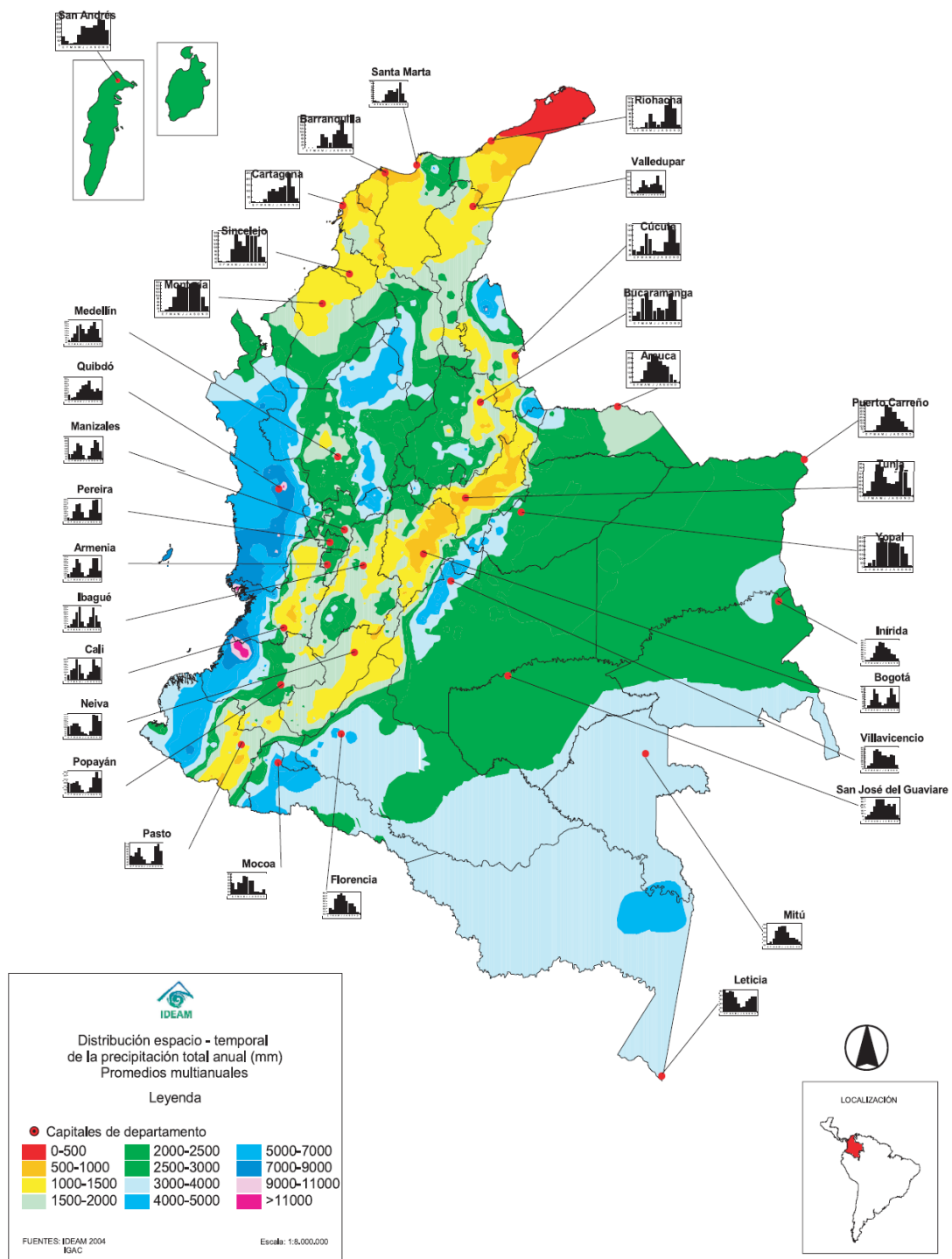


Figura 21. Distribución espacio – temporal de la precipitación total anual (mm) promedios multianuales.

FUENTE: Atlas Climatológico de Colombia. IDEAM. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales República de Colombia.

5.1.2. TEMPERATURA

Temperatura de aire (unidad MEPDG: grados Fahrenheit), la temperatura del aire es medida aproximadamente a 2 metros sobre la superficie del suelo ^[40].

La temperatura es uno de los principales factores climáticos que se incorporan de forma horaria y que afectan el comportamiento, respuesta, y el rendimiento de una estructura de pavimento ^[12].

En el modelo climático también se incluye la temperatura media anual, la cual se obtiene sumando todas las temperaturas mensuales de un registro determinado y dividiendo por 12.

La influencia de las variaciones de la temperatura se percibe sobre todo en la mezcla asfáltica que en las capas inferiores ^[12]. Esto es en gran parte porque el asfalto exhibe una propiedad viscoelástica, 'disminución de su consistencia' con el aumento de la temperatura y el endurecimiento cuando se enfría. En efecto muestra una propiedad líquida a temperaturas elevadas.

Las fluctuaciones en la temperatura de un pavimento por lo tanto tienen mayor influencia cuando la superficie reacciona a las cargas de los vehículos que circulan por él. El factor determinante en este caso es la propiedad de la rigidez del cemento asfáltico, más concretamente referido como el módulo dinámico, E , y se define como la relación entre la tensión y la deformación bajo carga sinusoidal continua ^[20].

Las estaciones meteorológicas tradicionales cuentan con sensores de calor robustos como el termistor, este es útil cuando la estructura de pavimento debe ser instrumentada y se basa en la conductividad eléctrica del material para así

determinar los cambios de temperatura ^[11]. La siguiente expresión determina lo expuesto anteriormente ^[50],

$$R = R_0 \exp \beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (5.1.15)$$

Dónde:

R = resistencia a la temperatura T

R₀ = resistencia a la temperatura T₀

β = constante que depende de la conductividad eléctrica del material.

Algunas de los daños asociadas con la temperatura del pavimento incluyen fisuramiento térmico (generalmente en climas templados), formación de surcos y fisuras de fatiga.

5.1.2.1. Modelos de temperatura existentes

La relación entre la temperatura del aire y la temperatura del pavimento no es necesariamente lineal. Esto es debido a que el perfil de temperatura del material asfáltico y la temperatura del aire son complicados de calcular, requiriendo a menudo información detallada acerca de las propiedades térmicas del asfalto y las condiciones ambientales ^[51], además de muchos otros factores como la intensidad de la radiación solar, las condiciones ambientales del viento, la geometría y la dirección del pavimento ^[52].

El problema se complica aún más cuando otras capas del pavimento (base, sub-base y subrasante) con diferentes propiedades se consideran. Uno de los modelos que describe el movimiento de calor en el suelo es la ecuación del calor unidimensional desarrollada por Wilson ^[24] y se expresa como;

$$\zeta \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(k_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) - Lv \frac{u_a + u_v}{u_a} \frac{\partial}{\partial z} D_v \frac{\partial u_v}{\partial z} \quad (5.1.16)$$

Dónde:

T = temperatura

u_a = presión atmosférica

u_v = presión de vapor

ζ = capacidad volumétrica de calor específico como una función del contenido de humedad

k = conductividad térmica del suelo como una función del contenido de humedad

Lv = calor latente

Dv = coeficiente de difusión del agua que fluye a través del suelo.

La ecuación anterior describe el flujo de calor debido a la conducción y la transferencia de calor latente que se genera por un cambio de fase. Yavuzturk y Ksaibati desarrollaron un modelo que puede predecir fiablemente la temperatura del pavimento asfáltico en su superficie, a una profundidad de 20 mm, utilizando para ello un procedimiento numérico bidimensional para temperaturas máximas y mínimas. Su modelo se expresa a continuación [52]:

Para la temperatura mínima del pavimento:

$$T_{surface} = -1.56 + 0.72T_{air} - 0.004Lat^2 + 6.26\log_{10} H + 25 - z \cdot 4.4 + 0.5\sigma^2 \frac{1}{2}$$

(5.1.17)

Donde:

Latitud = latitud del lugar

T_{air} = temperatura baja del aire en °C

H = profundidad a la superficie en mm

z = -2,055 para el 98% de confiabilidad

$T_{surface}$ = temperatura en la superficie del pavimento

σ = desviación estándar de la temperatura del aire baja y media

Para la temperatura máxima del pavimento:

$$T_{20\text{mm}} = (T_{\text{air}} - 0.00618 \text{ Lat}^2 + 0.2289\text{Lat} + 44.2) (0.9545) - 17.78 \quad (5.1.18)$$

Dónde:

Lat = latitud del lugar

T_{air} = los siete días de la temperatura media del aire alta en °C

$T_{20\text{mm}}$ = temperatura del pavimento a una profundidad de 20 mm.

El modelo para la temperatura máxima se crea con el objetivo de conocer de mejor manera los pavimentos en climas calientes y áridos por parte de los ingenieros y diseñadores. La limitación fundamental del modelo anterior para la consideración de las temperaturas máximas es que fue creado a una profundidad de 20 mm.

Los perfiles de temperatura dentro de las diferentes capas de un pavimento se transmiten a las funciones de transferencia (modelos de predicción de daño). En el análisis de los daños, se asigna un valor representativo de una sola temperatura llamada temperatura eficaz T_{eff} , que puede ser definida como ^[53];

"Es una temperatura única de ensayo en la que una cantidad de un determinado tipo de daños dentro de un sistema de pavimento dado sería equivalente a la que se produce a partir de la fluctuación de la temperatura estacional durante todo el ciclo anual de temperatura".

Este valor es entonces una de las entradas que se incorporan en las funciones de transferencia para un período de análisis. El modelo inicial de T_{eff} , es una ecuación de regresión predictiva múltiple, fue formulada por Witczak y tiene la siguiente forma ^[54];

$$T_{eff} = 58.0 - 5.5 (z) + 0.92 (MAAT) \quad (5.1.19)$$

Dónde:

T_{eff} = temperatura efectiva en °F

z = cualquier profundidad crítica deseada

MAAT = temperatura media anual del aire

La validación de este modelo mostró un acuerdo razonable entre el campo observado y la predicción de la propagación de baches generados en algunos casos por la temperatura. Sin embargo, en climas más cálidos, las grandes diferencias existían en los valores que arrojaba el modelo al realizar la predicción del rendimiento.

El-Basyouny y Jeong más tarde refinaron este modelo T_{eff} . incorporando para ellos las influencias de la frecuencia de la carga de tráfico, la precipitación, el sol y el viento. Su modelo final se da como ^[53],

$$T_{eff} = -13.995 - 2332 (\text{Freq})^{0.5} + 1.006 (MAAT) + 0.876 (\sigma \text{ MMAT}) - 1.186 (\text{viento}) + 0.549 (\text{sol}) + 0.071 (\text{lluvia}) \quad (5.1.20)$$

Dónde:

Freq = frecuencia de la carga del tráfico, Hz

Precipitación = profundidad anual de la precipitación acumulada, pulg

Viento = velocidad del viento media anual, mph

Sol = porcentaje de sol anual

σ MMAT = desviación típica de las temperaturas del aire medias mensuales

En el EICM se incorpora un calor dimensional y el modelo de flujo de la humedad. El componente calor es implementado como una ecuación en diferencias finitas tal y como se muestra en la siguiente expresión ^[35];

$$T_{(i,t+\Delta t)} = T_{(i,t)} + \frac{k\Delta t}{\gamma d} C \Delta z^2 (T_{(i+1,t)} + T_{i-1,t} + T_{i,t}) \quad (5.1.21)$$

Dónde:

T = temperatura en °F

t = tiempo

Δ t = tiempo de incremento

Δ z = profundidad de los incrementos

k = conductividad térmica en BTU / (h - ft² - F)

γd = densidad seca

C= masa específica de calor en BTU / (h - F)

z = coordenada vertical

Reconociendo la importancia de los datos meteorológicos por hora en el diseño, se desarrolló un modelo para simular los datos horarios diarios de máxima y mínima temperatura desde la perspectiva de la distribución de temperatura del aire por hora durante los equinoccios del (21 de marzo y el 23 de septiembre) para 4 años y para una ubicación predefinida en los EE.UU. (Hawaii) (ver figura 22).

El estudio desarrolló el siguiente modelo para simular la función coseno de los registros horarios diarios de temperatura de mínima-máxima así ^[55];

$$Th = \frac{T_{max}+T_{min}}{2} + \left(\frac{T_{min}-T_{max}}{2}\right) - \cos \frac{(H-H_0)\pi}{12} \quad (5.1.22)$$

Dónde:

Th = temperatura instantánea en la hora h

Tmax = temperatura máxima registrada en un día determinado

Tmin = temperatura mínima registrada en un día determinado

H = Número de horas de medianoche

Ho = hora correspondiente a la cantidad de temperatura máxima

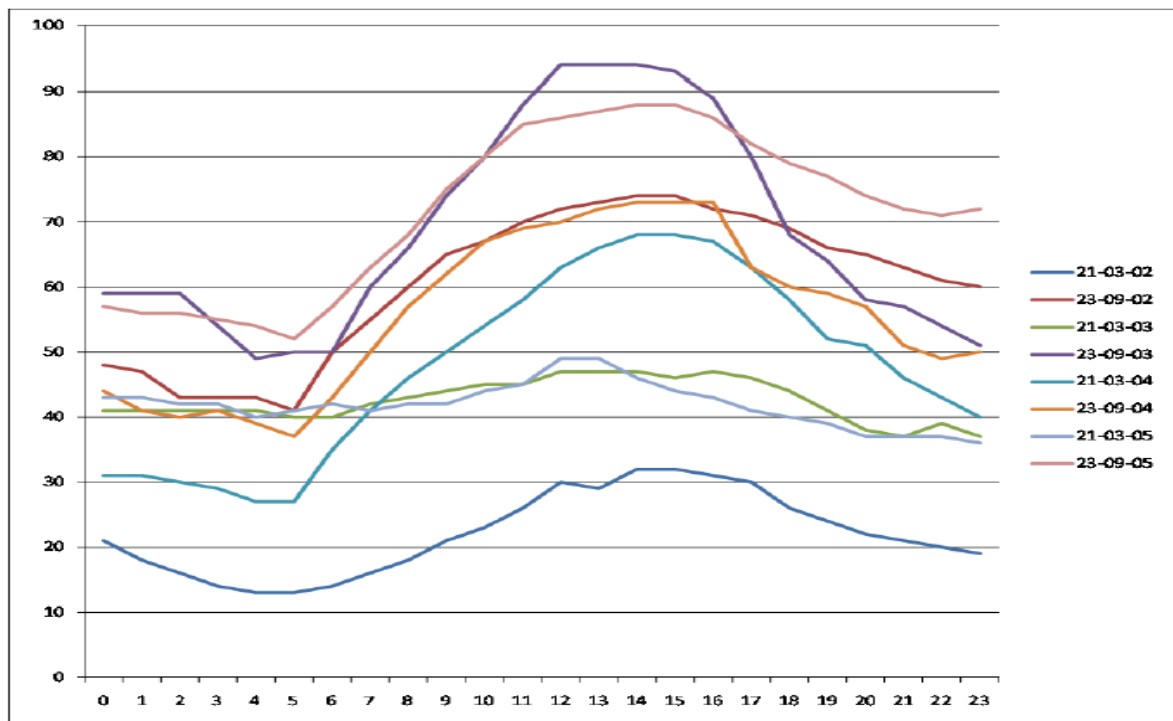


Figura 22 Variaciones de Temperatura (°F) de más de 24 horas en Hawai durante los equinoccios (2002-2005).

FUENTE: Koppen Climate Classification, on Wikipedia.

5.1.2.2. Temperaturas medias mensuales de los sitios de Estudio

Las temperaturas medias mensuales del periodo (2001-2012), muestran que la máxima temperatura se encuentra sobre la zona de Apartadó, Ant con una media de 27°C, seguido del Municipio de Santa rosa de Osos, Ant con 13.5°C y por último la localidad de Sumapaz, Cund con 9.3°C. Lo anterior se evidencia en la siguiente figura:

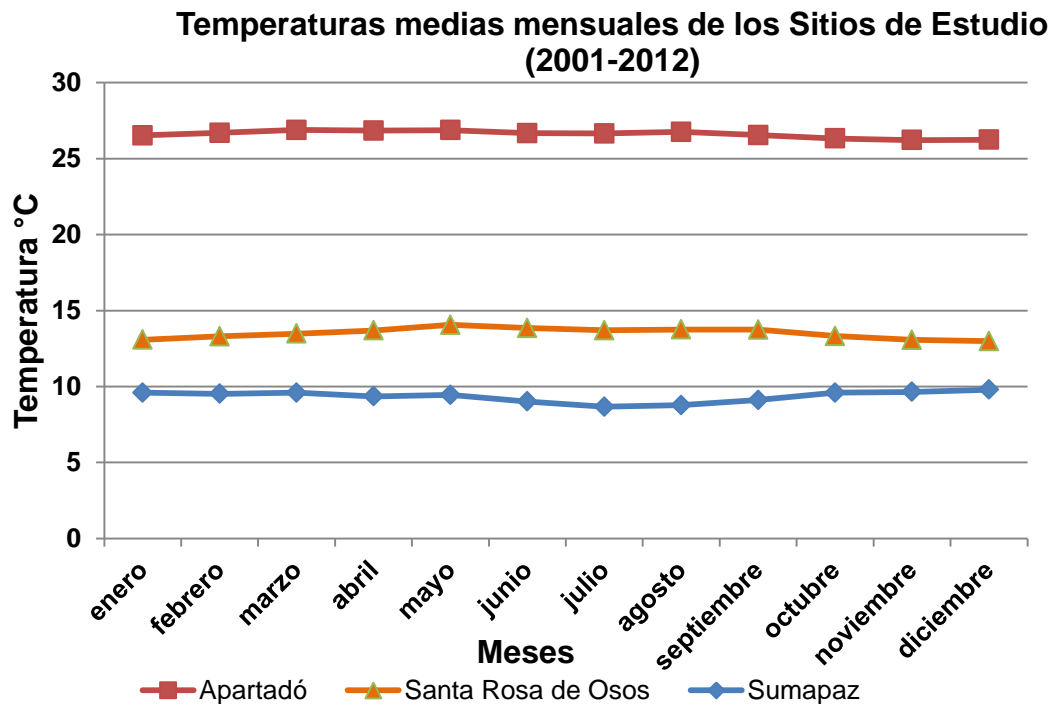


Figura 23. Temperaturas medias mensuales de los Sitios de Estudio (2001-2012).
FUENTE: Propia.

5.1.2.3. Variabilidad espacial de la temperatura del aire en Colombia ^[45]

Región Caribe

Los mayores valores de temperatura media del aire, entre 28°C y 32°C, se presentan en la alta y media Guajira, en la parte central del Cesar y Bolívar y en el sur de los departamentos de Magdalena, Atlántico y Sucre. En el resto de la región, exceptuando la Sierra Nevada de Santa Marta y sus alrededores, las temperaturas medias oscilan entre los 24°C y los 28°C (ver figura 24).

Región Andina

La temperatura media se caracteriza por la presencia de los llamados pisos térmicos, causados por la disminución de la temperatura con el aumento de altura sobre el nivel del mar. En los valles de los principales río como el Magdalena, el

Cauca, el Patía y el Sogamoso, se registran los más altos valores, entre 24°C y 28°C, mientras que en los altiplanos de Cundinamarca, Boyacá y Nariño, la zona montañosa del centro de Antioquia, Cauca y el Viejo Caldas se presentan valores bajos, entre 12°C y 16°C. En la alta montaña se registran valores inferiores a 8°C.

Región Pacífica

En la región se registran temperaturas medias comprendidas entre 24°C y 28°C. En la franja litoral, las temperaturas son ligeramente inferiores a las de la llanura costera.

Orinoquia

En esta región no existen accidentes orográficos notables, siendo bastante homogénea la distribución de temperatura, la cual presenta valores entre 24°C y 28°C. El área del piedemonte presenta la mayor variabilidad térmica con valores que oscilan entre 8°C y 20°C.

Amazonia

Se caracteriza por tener una fisiografía muy homogénea y por tanto las temperaturas poco varían espacialmente. En la mayor parte del territorio de la Amazonia se registran valores entre 24°C y 28°C. Hacia el piedemonte los registros oscilan entre 12°C y 20°C, en dependencia de la elevación.

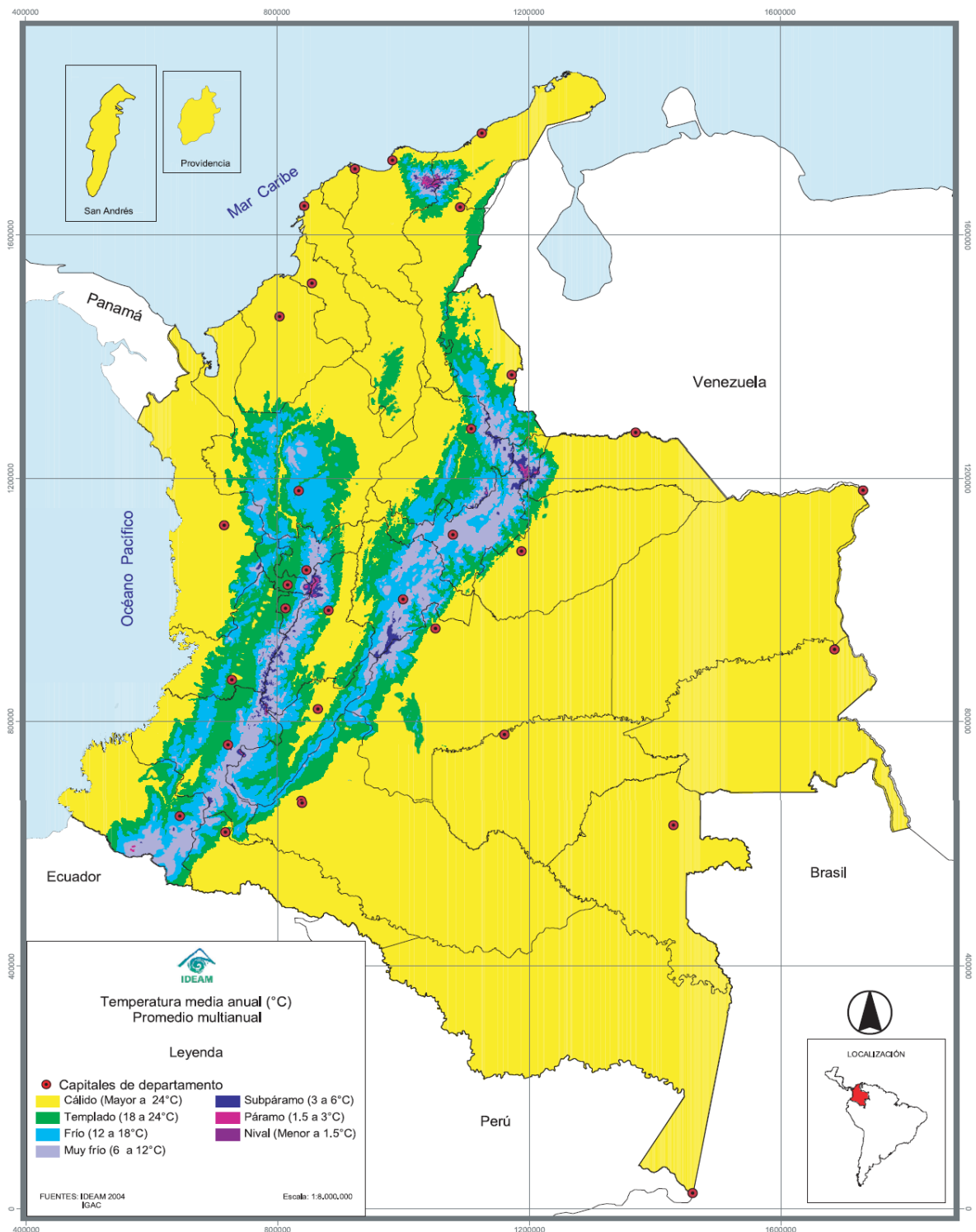


Figura 24. Temperatura media anual (°C) Promedio multianual.
FUENTE: Atlas Climatológico de Colombia. IDEAM. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales República de Colombia.

5.1.3. PORCENTAJE DE CIELO CLARO Ó NUBOSIDAD

Porcentaje de sol (0% es nublado y el 100% está claro), mientras que el formato icm del MEPDG esta como "brillo solar", se puede considerar como el opuesto, el porcentaje de cobertura de nubes (nubosidad). La técnica utilizada para medir la cobertura de nubes es con las ASOS - Automated Surface Observation System (sistema automático de observación de superficie) / sensores AWOS - Automated Weather Observation System (sistema automático de observación meteorológica) cambiado durante el intervalo de tiempo de 40 años de estudio. Los sensores actuales intentan estimar un valor mayor de la cobertura del cielo produciendo cuatro categorías distintas de cobertura del cielo en tres alturas ^[40].

La duración de insolación se utiliza para calcular la cobertura de nubes. Esta tiene un efecto modificador de la temperatura (energía térmica) en los modelos EICM ^[12]. La mayor fuente de energía térmica en las capas del pavimento es el sol, y los modos primarios de su transferencia son la radiación solar incidente, la convección (entre la superficie del pavimento y el fluido en contacto con ella), la conducción dentro del pavimento, la radiación de onda larga y térmica entre la superficie del pavimento y el cielo (ver figura 25) ^[52].

Con estos diversos mecanismos de transferencia, la necesidad de conservar la energía ha dado lugar a muchos modelos de balance energético. En la superficie del pavimento, el concepto básico en todos los modelos es que la suma de todo el calor de energía ganado debe ser igual al calor conducido en el pavimento. La ecuación de balance de energía genérico tiene la siguiente forma ^[12]:

$$Q_i - Q_r + Q_a - Q_e \pm Q_c \pm Q_h \pm Q_g = 0 \quad (5.1.23)$$

Dónde:

Q_i = radiación entrante de onda corta

Q_r = radiación reflejada de onda corta

Q_a = radiación entrante de onda larga

Q_e = radiación reflejada de onda larga

Q_c = transferencia de calor por convección

Q_h = efectos de la transpiración, evaporación, sublimación y condensación

Q_g = energía absorbida por el suelo

La expresión anterior muestra que el pavimento absorbe y emite energía de calor dependiendo de la temperatura ambiente. Toda radiación de onda en la superficie se da entonces por:

$$Q_n = Q_s - Q_l \quad (5.1.24)$$

Dónde:

Q_s = radiación neta de onda corta

Q_l = radiación neta de onda larga,

Con $Q_s = Q_i - Q_r$ y $Q_l = Q_a - Q_e$.

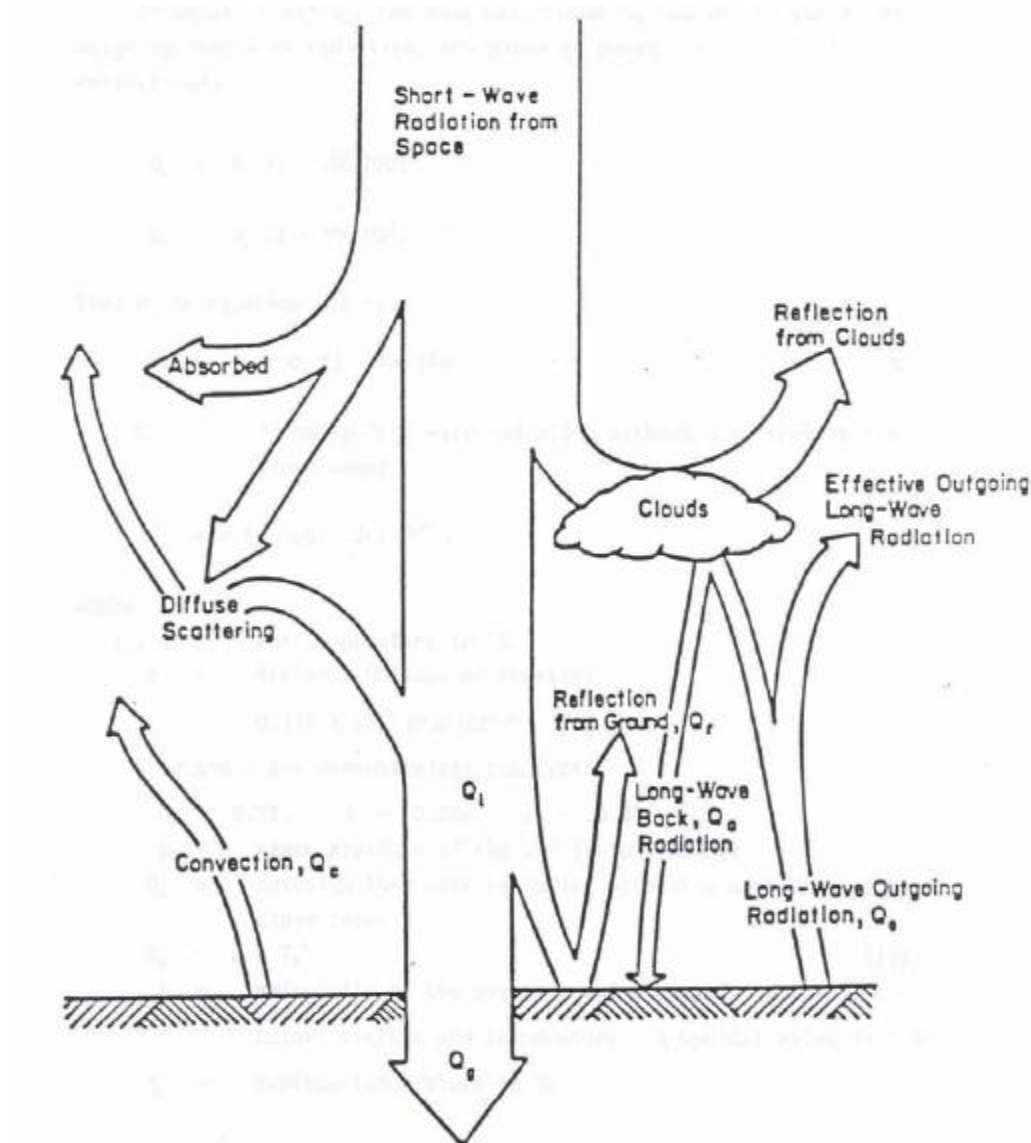


Figura 25. Transferencia de calor entre la superficie del pavimento y el aire en un día soleado.

FUENTE: Guide for Mechanistic- Empirical Desing - Of new and rehabilitated pavement structures”. Part 2. Desing inputs. Final report NCHRP. 2004.

La presencia de nubes mejora la reflexión de la energía solar irradiada por el sol de manera que no alcance el pavimento, sin embargo, de manera similar contribuye al efecto de invernadero, atrapando las radiaciones reflejadas y emitidas fuera del suelo del pavimento. El porcentaje de sol, S_c , contribuye a la obtención de la nubosidad que se implementa en el MEPDG como una función de

la propiedad del material, como la capacidad de absorción corta y onda larga, la emisividad y reflectividad. La ecuación que representa lo anterior es la desarrollada por Baker y Haines ^[12]:

$$Q_s = a_s R^* A + B \frac{S_c}{100} \quad (5.1.25)$$

Dónde:

a_s = capacidad de absorción de la superficie del pavimento de onda corta

R^* = radiación extraterrestre incidente sobre la superficie horizontal de la atmósfera exterior

A, B = constantes de contabilidad para la dispersión difusa y la adsorción de la atmósfera

S_c = % de sol influyente en la cubierta de las nubes

R^* en la ecuación anterior depende de la posición N o S del ecuador, y solo es una función de la época del año.

La saliente y la entrante radiación de onda larga implica una cobertura de nubes con un factor de corrección igual a $1 - \frac{NW}{100}$, de modo que los valores en la ecuación quedan así:

$$Q_a = Q_z \left(1 - \frac{NW}{100}\right) \text{ y } Q_e = Q_x \left(1 - \frac{NW}{100}\right), \text{ así } Q_l = Q_z - Q_x \left(1 - \frac{NW}{100}\right) \quad (5.1.26)$$

$$Q = \sigma s b T_{air} G - \frac{J}{10\rho p} \quad (5.1.27)$$

Dónde:

N = base de la nube cubierta (aproximadamente 0.9-0.8 por nubes entre 1000-6000ft)

W = 100 - S_c = cubierta media durante el día y la noche

T_{air} = temperatura del aire en Rankine

σ_{sb} = constante de Stefan-Boltzman = $1.72 \times 10^{-8} \text{ Btu.hr}^{-1} \cdot \text{ft}^{-2} \cdot \text{R}^{-1}$

G, J y p son constantes = 0.77, 0.28 y 0.074, respectivamente,

p = presión de vapor del aire, que oscila entre 1 a 10 mmHg

Q_x = radiación de onda larga saliente sin corrección de la cubierta de nubes

La guía ^[12] muestra que la radiación de onda larga Q_x no corregida, se da por la siguiente formula;

$$Q_x = \sigma_{sb} \varepsilon T_s^4 \quad (5.1.28)$$

Dónde:

ε = Emisividad de la superficie del pavimento (valor típico = 0,93)

T_s = temperatura de la superficie del pavimento en Rankine, ε en la ecuación anterior es una función del color de pavimento, textura y temperatura.

El IDEAM suministra la nubosidad en unidad de medida OCTA, que corresponde a la octava parte de la bóveda celeste.

La escala utilizada para cifrar la nubosidad es la que se muestra a continuación²:

Tabla 7. Escala de Nubosidad.

OCTAS	PORCENTAJE (%)	DESCRIPCIÓN
0/8	0	No hay nubes - Cielo completamente despejado
1/8	12.5	Despejado
2/8	25	despejado
3/8	37.5	Parcialmente nuboso
4/8	50	Parcialmente nuboso
5/8	62.5	Parcialmente nuboso
6/8	75	Nuboso
7/8	87.5	Nuboso
8/8	100	Cielo cubierto completamente de nubes

² <http://foro.tiempo.com/como-se-observan-las-nubes-la-nubosidad-t38696.0.html>

5.1.4. VIENTO

La velocidad del viento (unidad MEPDG: millas por hora). Este valor es normalmente una velocidad del viento promedio durante un período de dos minutos en lugar de un valor instantáneo ^[40].

En el proceso de diseño la velocidad del viento es necesaria para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección, H ^[12]. Generalmente, un aumento en la velocidad del viento en contacto con una superficie mejora la transferencia de calor de la superficie con el efecto de enfriamiento. La temperatura de una superficie de pavimento se reduce cuando el viento sopla sobre ella. De ello se deduce que el calentamiento de las capas internas conducirá calor hacia afuera, lo que conduce al enfriamiento global gradual de todo el pavimento.

Patel señaló que el viento no es constante en cualquier sitio, siendo influenciado por el sistema de clima, el terreno local de la tierra, y la altura sobre la superficie terrestre. La variación de la velocidad del viento se produce después de intervalos de muy corto plazo del orden de segundos.

Esto plantea un reto importante en su medición que lleva la mayoría de los autores a favor de un enfoque probabilístico para su cálculo. Patel sugirió que la mejor manera de describir la variación de la velocidad del viento es utilizar la función de distribución de probabilidad Weibull h , con dos parámetros, el parámetro k forma, y el c parámetro de escala ^[56].

Usando este método, la probabilidad de la velocidad del viento (v) durante cualquier intervalo de tiempo está dada por;

$$h v = \frac{k}{c} \frac{v}{c}^{(k-1)} e^{-\frac{v}{c}^k} \quad (5.1.29)$$

Básicamente, esto funciona a partir de la premisa de que la probabilidad de que la velocidad del viento será de entre cero y el infinito durante un período dado es la unidad, expresado matemáticamente como:

$$\int_0^{\infty} h \cdot dv = 1 \quad (5.1.30)$$

Dónde:

v = velocidad media diaria del viento m/s

h = función de distribución de probabilidad. La unidad de 'h' es horas por año por m/s, y la integral de la ecuación 5.1.30 se convierte en 8760 (número total de horas al año) en lugar de la unidad.

Matemáticamente, los efectos del viento implican la cuantificación de la expresión Q_c , mencionada anteriormente y se expresa como ^[12],

$$Q_c = H (T_{air} - T_s)$$

Dónde:

Q_c = tasa de transferencia de calor por convección

H = coeficiente de transferencia de calor por convección

T_{air} = temperatura del aire, en °F

T_s = temperatura de la superficie del pavimento, en °F

En la guía ME se señala que la determinación de H es difícil, debido a las muchas variables que influyen en ella, pero sugieren una formulación alternativa que involucra directamente a la velocidad del viento, expresada así ^[12],

$$H = 122.93 [0.00144 T_m^{0.3} U^{0.7} + 0.00097 T_s - T_{air}^{0.3}] \quad (5.1.31)$$

Dónde:

U = velocidad media diaria del viento, en m/s

T_{air} = temperatura del aire, en $^{\circ}C$

T_s = temperatura de la superficie del pavimento, en $^{\circ}C$

T_m = valor medio de T_{air} y T_s

Los criterios de estabilidad impuestos en los cálculos del EICM controlan parcialmente el valor máximo de H , aunque la guía de recomienda un coeficiente de transferencia de calor por convección de $3,0 \text{ Btu.hr}^{-1} \cdot \text{ft}^{-2} \cdot ^{\circ}F^{-1}$ [12].

5.1.4.1. Velocidad del viento en Colombia

La velocidad del viento determina el desplazamiento del aire en un tiempo determinado.

Una observación de viento está caracterizada por la dirección y la velocidad. La velocidad, es decir la distancia recorrida por una partícula de aire en la unidad de tiempo, se expresa en metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h) [45].

En ausencia de instrumentos o cuando el equipo disponible está averiado, la forma más sencilla de estimar la velocidad es observando directamente el efecto del viento en la superficie terrestre.

Con este fin se utiliza la escala Beaufort, la cual sirve para evaluar la velocidad del viento con base en las características observadas. Hay varios instrumentos para medir y registrar la dirección y velocidad del viento en superficie, en general conocidos como anemómetros y anemógrafos [45].

Tabla 8. Escala Beaufort para la Fuerza del Viento, con Indicación de las Velocidades Equivalentes en Metros por Segundo.

ESCALA	Velocidad Promedio m/s	CARACTERISTICAS
0	0.1	Calma; el humo sube verticalmente
1	0.9	Ventolina; la dirección se muestra por la dirección del humo. Las veletas no alcanzan a moverse.
2	2.4	Brisa muy débil; se siente el viento en la cara, las hojas de los árboles se mueven; las veletas giran lentamente.
3	4.4	Brisa débil; las hojas y las ramas pequeñas se mueven constantemente; el viento despliega las banderas.
4	6.7	Brisa moderada; se levanta el polvo y los papeles del suelo; se mueven las ramas pequeñas de los árboles.
5	9.4	Brisa fresca: los árboles pequeños se mueven; se forman olas en las aguas quietas.
6	12.3	Brisa fuerte; se mueven las ramas grandes de los árboles; los paraguas se mantienen con dificultad.
7	15.5	Viento fuerte; los árboles grandes se mueven; se camina con dificultad contra el viento.
8	19	Viento muy fuerte; se rompen las ramas de los árboles, no se puede caminar en contra del viento.
9	22.6	Viento muy fuerte; el viento arranca tejados y chime, se caen arbustos; ocurren daños fuertes en las plantaciones
10	26.4	Temporal huracanado; raro en los continentes. Arranca los árboles y las viviendas sufren daños muy importantes.
11	30.5	Borrasca
12	32.7 o más	Huracán

FUENTE: Atlas Climatológico de Colombia. IDEAM. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales República de Colombia.

El instrumento más común para medir la dirección del viento es la paleta de viento. Las paletas de viento señalan la dirección desde la cual este sopla. Pueden ser de formas y tamaños diferentes: algunas con dos platos juntos en sus aristas directas

y dispersas en un ángulo (paletas separadas), otras con un solo platillo plano o una superficie aerodinámica vertical.

La velocidad del viento es un parámetro muy variable, tanto en el tiempo como en el espacio. Las velocidades son muy variables durante el transcurso del día y el patrón de comportamiento diario va cambiando durante el año. A pesar de esta gran variabilidad los promedios anuales multianuales atenúan la influencia de los altos valores. La velocidad media anual multianual varía en entre 0 km/h y unos 20 km/h, en términos generales, siendo mayor en las zonas costeras del norte del país, que alcanzan a recibir plenamente la influencia de los vientos Alisios del noreste durante el invierno boreal, cuando la ZCIT alcanza su posición más meridional. El occidente del país tiende a presentar los menores valores, tal como su posición relativa a la circulación general de la atmósfera en la zona tropical permite suponer^[45].

En gran escala, la velocidad media anual en superficie alcanza, en general, valores inferiores a los 15 km/h. Los valores superiores a esta velocidad se encuentran en el archipiélago de San Andrés y Providencia, en dos pequeños sectores costeros de la región Caribe, uno en el centro de La Guajira y otro en el occidente del departamento de Atlántico, así como un pequeño núcleo en la cuenca del río Moniquirá (Boyacá). En esas áreas la velocidad del viento varía entre 15 km/h y 20 km/h. Solo en San Andrés y en el occidente del Atlántico se registran valores de unos 21 km/h (ver figura 26).

La velocidad anual media varía entre 10 km/h y 15 km/h en áreas aledañas a las anteriores: un eje suroccidente-nororiente que incluye un sector del bajo Magdalena, el valle del Cesar y la Península de La Guajira, la franja costera del Caribe entre el sur de Cartagena y Ciénaga, la cuenca del río Moniquirá y algunas áreas cercanas (ver figura 26). Lo mismo sucede en el sur del Catatumbo, en el área del piedemonte llanero, donde la cordillera Oriental disminuye su altitud, entre

el sur del Sumapaz y el municipio de Colombia (Huila), así como en sectores aislados del centro del departamento de Nariño, en el valle del Magdalena y el noroccidente de Antioquia ^[45].

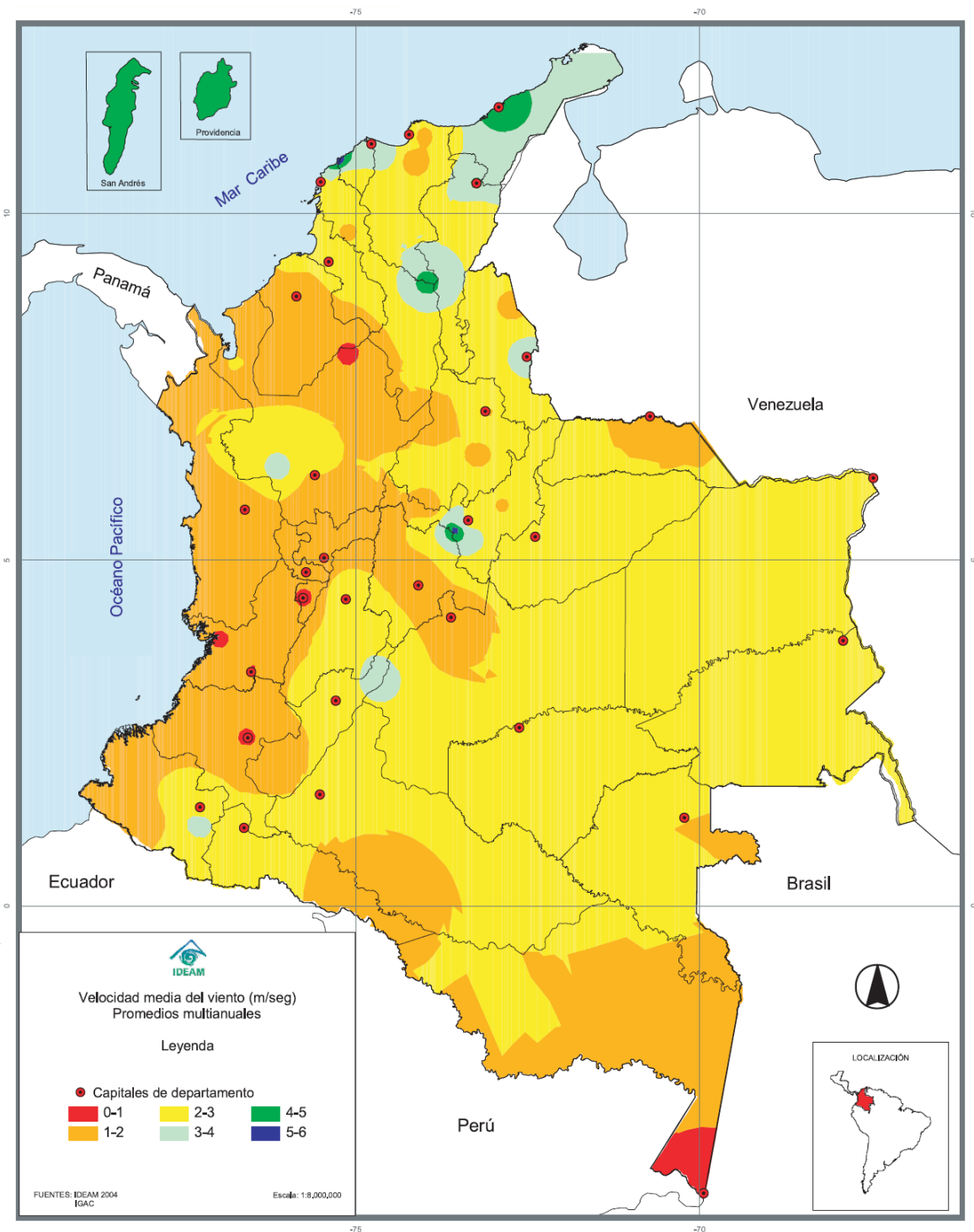


Figura 26. Velocidad media del viento (m/s) Promedios multianuales.
FUENTE: Atlas Climatológico de Colombia. IDEAM. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales República de Colombia.

5.1.5. PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO

Medición y significado en el diseño ME

La medición de la profundidad del nivel freático es vital ya que su fluctuación tiene una directa influencia en el módulo resiliente de los materiales no ligados del pavimento. Esta se considera como una condición límite para los modelos de flujo de la humedad ^[12]. Su medida se consigue utilizando el TDR - time domain reflectometry que es un dispositivo que usa ondas electromagnéticas para detectar la variación de la conductividad en un medio.

Es de señalar que si el nivel freático está a 2 pies de la superficie del suelo, el suelo puede llegar a ser totalmente saturado. La profundidad del nivel freático (GWT – ground water table) tiende a generar un impacto mínimo sobre los cálculos de la MEPDG cuando este es mayor de 10 pies. El efecto de la GWT ha sido disminuido con la inclusión del índice de humedad Thornwaith en los modelos de la MEPDG para la succión.

La profundidad del nivel freático está destinada a ser la mejor estimación de la profundidad promedio anual o la profundidad media de una temporada (un valor para cada una de las cuatro estaciones del año). En el Nivel 1 de entrada, se puede determinar a partir de perforaciones de caracterización del perfil antes de diseño. En el Nivel 3 de entrada, se puede estimar el valor medio anual de los promedios estacionales o puede ser proveída. Una fuente potencial para obtener estimaciones del nivel 3 es el suelo del lugar, teniendo en cuenta los informes elaborados de un estudio ^[12].

Algunos estudios indican que muchos factores afectan las condiciones de humedad, el tipo de suelo y los factores ambientales se indican como los más influyentes en el control de las condiciones de humedad. Las propiedades del

suelo, tales como Pasa 200, límite líquido (LL), límite plástico (PL), índice de plasticidad (IP), y la conductividad hidráulica varía con el tipo de suelo e influyen en las condiciones de humedad. Los factores ambientales que controlan las condiciones de humedad son: temperatura ambiente, precipitación, humedad relativa del aire, velocidad del viento, la radiación solar y la profundidad de nivel freático ^[41].

En 1965, Aitchison y Richards realizó un estudio en Australia a gran escala de las condiciones de humedad en las subrasantes de los pavimentos. En su momento se midió la succión matricial total y además de eso fueron recogidos 17 datos de subrasantes diferentes ubicadas en toda Australia con bloques de yeso y mediciones de laboratorio.

Los datos experimentales mostraron un acuerdo general entre el índice de humedad de Thornthwaite (TMI) y la succión del suelo en la zona de humedad estable bajo el pavimento. Se ha demostrado entonces que existe una relación entre la TMI-Succión y que es adecuado para las regiones áridas o semiáridas, donde la precipitación anual no exceda de 10 pulgadas o profundidad del agua subterránea es relativamente profunda.

El uso del modelo de la nueva Thornthwaite Índice de Humedad (TMI) en el software MEPDG hace que la entrada de la trayectoria de drenaje y la infiltración sean innecesarias ^[43].

En particular, la condición de humedad de equilibrio en el EICM se basa en un modelo de aspiración que depende de la profundidad del nivel freático y en una curva característica de agua del suelo (SWCC), modelo que es funcionalmente dependiente de las propiedades del suelo. Investigaciones anteriores indican que las fuentes de error en la predicción del contenido de humedad se derivan principalmente de la aplicación del modelo de succión en la EICM y que un

enfoque más preciso para cálculos de aspiración sería a través de la utilización del índice de humedad de Thornthwaite (TMI) en lugar de la utilización de la profundidad del nivel freático ^[44].

Otro aporte importante, es que se ha creído durante mucho tiempo que lo que afecta a las condiciones de humedad del suelo es la profundidad del nivel freático pero Russam y Coleman (1961) concluyeron que el suelo succiona cuando se está en equilibrio estático con la profundidad del nivel freático a menos de 10 a 15 pies o incluso 20 a 30 pies, de lo contrario esta profundidad no tiene efecto en la succión. Russam en (1965) describió tres recomendaciones de diseño para predecir las condiciones de humedad del subrasante sobre la base de estudios de la humedad del subsuelo ^[41].

1. Cuando el nivel freático se encuentra a 20 pies de la superficie del suelo, la succión depende solamente de la posición del nivel freático y la presión de sobrecarga.
2. Cuando el nivel freático es más profundo de 20 pies de la superficie y la precipitación estacional supera los 10 centímetros, la succión última de la subrasante se puede estimar a partir de la TMI y la textura del suelo. El índice de plasticidad se puede utilizar como guía para la textura del suelo y para un clima determinado la relación de contenido de humedad final de límite plástico tiende a ser constante.
3. Cuando el nivel freático es más profundo de 20 pies de la superficie y la precipitación anual es menor de 10 pulgadas la succión del suelo está controlada por la humedad atmosférica.

Para generar succión en los suelos de subrasante que se utilizarán en este proyecto se fijó una profundidad del nivel freático (GWT) de 6 pies por debajo de la superficie para todos los datos .icm creado, es decir, no hay variación estacional en la profundidad del nivel freático, esta consideración se tomó puesto que en

Colombia no se presentan estudios de identificación del nivel freático de forma horaria, ni estacional.

5.2. OTROS PARAMETROS DE ENTRADA

5.2.1. SALIDA Y PUESTA DEL SOL

Para hablar de salida y puesta del sol inicialmente se nombra el término crepúsculo, que es el intervalo antes de la salida o después de la puesta del Sol, durante el cual el cielo se presenta iluminado. El crepúsculo se produce porque la luz del Sol ilumina las capas altas de la atmósfera. La luz se difunde en todas direcciones por las moléculas del aire, llega al observador e ilumina todo su entorno. Existen dos eventos principales del sol³:

Crepúsculo matutino, el cual ocurre antes de la salida del Sol y se llama también amanecer, aurora o alba y,

Crepúsculo vespertino, que ocurre tras la puesta del Sol, también llamada atardecer u ocaso.

Para poder incorporar este parámetro en el MEPDG, las horas a.m. y p.m. tienen que ser convertidas a decimales. Toda la información del crepúsculo fue obtenida en la página web: (<http://www.sunrise-and-sunset.com/es/colombia>), para los dos años de estudio de los tres climas utilizados.

5.2.2. HUMEDAD

Es la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera y se mide mediante un higrómetro, aunque en los últimos tiempos se han desarrollado Termohigrómetros que además miden la temperatura ^[48].

³ <http://es.wikipedia.org/wiki/Crep%C3%BAsculo>

Humedad relativa (unidad MEPDG: por ciento), es la concentración medida de vapor de agua en la atmósfera en comparación con la capacidad potencial a la temperatura del aire medida ^[40].

Los pavimentos flexibles en el diseño no son susceptibles a la humedad ^[12], por lo que cualquier consideración de este factor en ellos es debatible. En los pavimentos rígidos se presenta deformación y además son afectados por la cantidad de humedad en el aire, teniendo mucha influencia en el comportamiento de fatiga pavimento.

La humedad relativa contribuye a la generación de daños en los Pavimentos rígidos, principalmente deformaciones y lisura, esta deformación se expresa ^[12]. Matemáticamente, así:

$$ETG_{SHi} = \frac{(3(\varphi\varepsilon_{su}).(S_{hi}-S_{haug}).hs \frac{h}{2} \frac{hs}{3})}{(\alpha.hs.100)} \quad (5.1.32)$$

Dónde:

ETG_{SHi} = diferencia de temperatura equivalente de desviación de deformación humedad en el mes i de % promedio anual

φ = Factor de contracción reversible

ε_{su} = encogimiento final

S_{hi} = factor de humedad relativa durante el mes i, con;

1. $S_{hi} = 1.1XRHa$ para $RHa < 30\%$
2. $S_{hi} = 1.4X0.01XRHa$ para $30\% \leq RHa < 80\%$
3. $S_{hi} = 3.0X0.03XRHa$ para $RHa > 80\%$

RHa = humedad media relativa ambiente

S_{havg} = factor de humedad promedio anual

hs = profundidad de la zona de contracción

h = espesor de la losa del pavimento

α = coeficiente de expansión térmica del PCC

Humedad relativa media mensual

La Humedad relativa media mensual, es el valor que se obtiene a partir del promedio del valor de la humedad para un mes determinado en (n) años de registro. Se expresa en porcentaje que van de cero (0) hasta el 100%. Los valores de humedad relativa dependen necesariamente de la temperatura del momento.

En las zonas tropicales continentales, en donde las variaciones de la temperatura durante el día son generalmente grandes, la humedad relativa cambia considerablemente en el curso del día. Para comparar diferentes estaciones, los datos de humedad relativa pueden emplearse únicamente si han sido observados a la misma hora y las temperaturas no son muy diferentes ^[45].

$$HR = (e/e_{s(t)}) \times 100 \quad (5.1.33)$$

Dónde:

e = tensión de vapor calculada

$e_{s(t)}$ = tensión saturante a la temperatura t

Las humedades medias mensuales del periodo (2001-2012), muestran que el lugar con mayor porcentaje de humedad es Sumapaz con valores hasta del 95%, seguido de Apartadó con 89% y Santa rosa de Osos con 87%.

En la MEPDG su incorporación se realiza para los 12 meses del año y para diferentes años de registro (2001-2012) en forma porcentual. Lo anterior se evidencia en la siguiente figura:

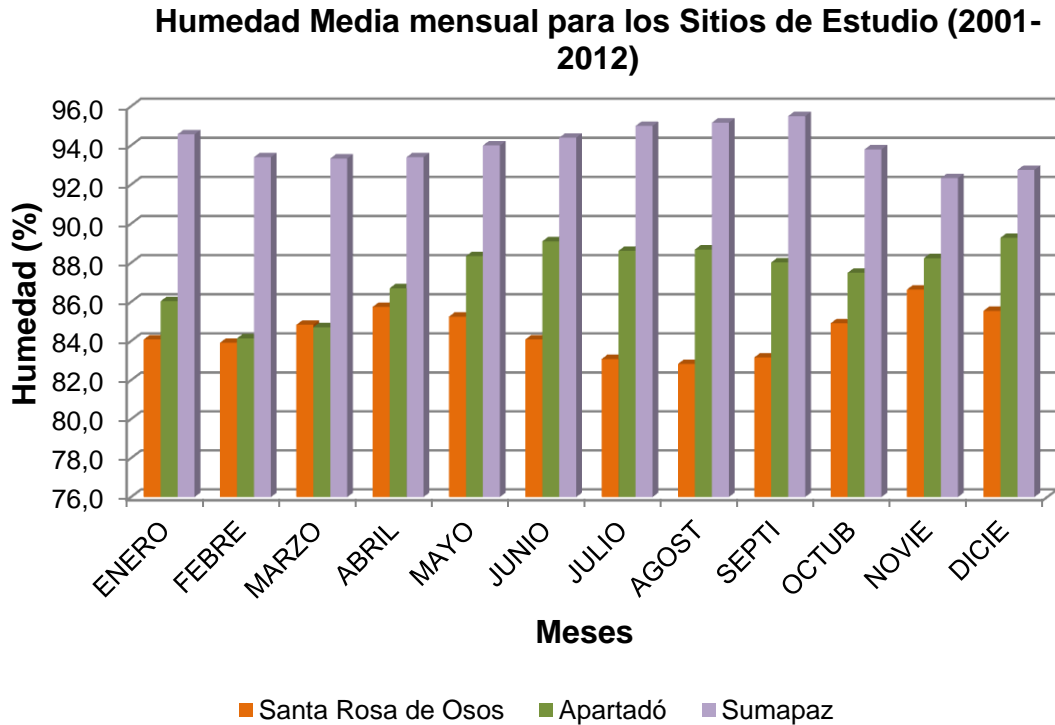


Figura 27. Humedad Media mensual para los Sitios de Estudio (2001-2012).

FUENTE: Propia.

5.2.2.1. Distribución Espacial y Temporal de la Humedad Relativa en Colombia

El parámetro humedad relativa es afectado por la presencia del relieve, que actúa como barrera que puede frenar el paso de masas húmedas a otras áreas y aumentar la presencia de la humedad en el área a donde llegan estas masas; pero en general las menores o mayores alturas no inciden en la presentación de máximos o mínimos de humedad directa ^[45].

Región Caribe

Los valores de humedad relativa disminuyen de sur a norte: hacia el norte y oriente de la región, en la península de La Guajira y el norte del departamento del

Cesar, se presentan los valores más bajos de humedad relativa, entre el 67% y 76%. En el área de la Sierra Nevada de Santa Marta el promedio de humedad anual puede llegar hasta el 90%. Hacia el sur, en el litoral y las sabanas de Córdoba y Sucre, la humedad oscila entre 76 y 85%. En el área insular, San Andrés y Providencia, el valor promedio de humedad es del 82% (ver figura 28). A través del año la humedad relativa, en general, presenta sus valores mínimos a comienzos de año, entre febrero y marzo, y los máximos hacia el final, entre septiembre y noviembre.

Hacia el mes de julio se presenta un descenso entre ligero y moderado de los valores de la humedad en casi toda la región

Región Pacífica

Posee las áreas más húmedas del país, localizadas principalmente en sectores del departamento del Chocó y los litorales del Valle y Cauca. La influencia del factor orográfico se presenta por la Serranía del Baudó y las estribaciones de la cordillera Occidental hacia el norte de la región; hacia el sur influye la cercanía al mar. En general, los registros de humedad son muy altos a lo largo del litoral, oscilan entre 83 y 92%; en la región los promedios son más bajos se encuentran entre el 73 y 79% (ver figura 28). A través del año, la humedad relativa permanece en valores casi constantes, con mínimos entre febrero y marzo y máximos al sur de la región en mayo y en el resto de la región entre octubre y diciembre.

Región Andina

En general, esta zona tan extensa es altamente afectada por la gran variación del relieve, con valores medios anuales de humedad relativa entre 66 y 87%; presenta los valores más altos, registros superiores al 80%, en áreas montañosas de los departamentos de Antioquia, Santander, Norte de Santander, Cundinamarca,

Cauca y Eje Cafetero y los mínimos, registros por debajo del 72%, en áreas de los valles interandinos de Huila, Tolima y Valle, además de los sectores de las cuencas de los ríos Chicamocha, Zulia y centro de Antioquia (ver figura 28).

El comportamiento a través del año es similar en toda la región, de tipo bimodal con dos picos máximos entre abril y mayo y al final del año, en los meses de noviembre y diciembre, y los mínimos entre febrero y marzo y entre julio y septiembre.

Orinoquia

Los valores de humedad relativa son influenciados al oeste de la región por la presencia de la cordillera Oriental. En el piedemonte llanero, los valores de humedad tienden a aumentar con respecto al centro de la región. En general, los registros van aumentando de norte a sur: en el norte, se tiene un 79% en promedio y hacia el sur más de 80% (ver figura 28).

A través del año, la humedad permanece casi constante; los valores máximos ocurren entre mayo y diciembre, en contraste con el período entre enero y marzo, cuando desciende a valores mínimos.

Amazonia

El comportamiento de la humedad relativa es bastante uniforme, en la mayor parte de la región, la cual se caracteriza por presentar humedades muy altas durante la mayor parte del año; los registros generalmente superan el 85%.

Temporalmente, el comportamiento de la humedad es similar en casi toda de la región, excepto en el Trapecio Amazónico, donde es casi constante entre enero y junio, para luego descender a mínimos hasta agosto, mientras que en el resto de la región presenta los mínimos entre enero y febrero y los máximos de mayo a julio y un leve descenso entre septiembre y octubre ^[45].

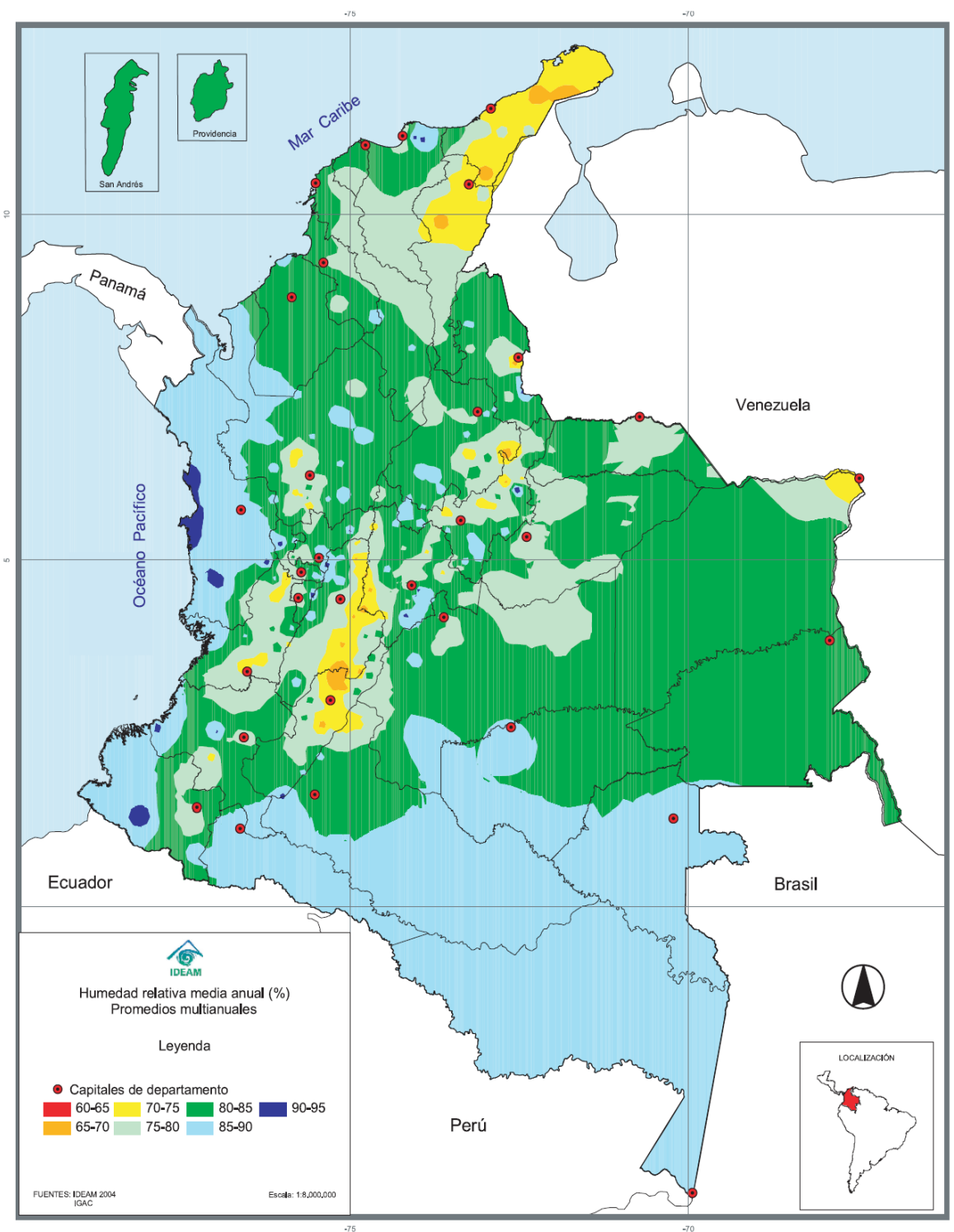


Figura 28. Humedad relativa media anual (%) Promedios multianuales.
FUENTE: Atlas Climatológico de Colombia. IDEAM. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales República de Colombia.

5.2.3. RADIACION SOLAR

Es la energía emitida por el Sol que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas y partículas. La medición de la radiación solar se realiza en forma instantánea como el cociente entre la cantidad de energía solar incidente en la unidad de área y de tiempo $\frac{Energia}{Área \cdot Tiempo}$ ($\frac{W}{m^2}$) (vatio por metro cuadrado).

La exposición radiante es la medida de la radiación solar, en la cual la irradiancia es integrada durante un lapso de tiempo como que normalmente es un día $\frac{Energia}{Área} = \frac{kWh}{m^2 \cdot día}$.

Para medir la radiación solar se utilizan radiómetros solares como los piranómetros o solarímetros y los pirheliómetros. Según sus características, pueden servir para medir la radiación solar global (directa más difusa), la directa (procedente del rayo solar), la difusa, la neta y el brillo solar^[46].

5.2.3.1. Distribución espacial de la radiación solar en Colombia

El conocimiento de la distribución espacial del potencial energético solar es necesario porque facilita la identificación de regiones estratégicas en donde es más adecuada la utilización de la energía solar para la solución de necesidades energéticas.

Sobre la mayor parte del territorio colombiano la incidencia de la radiación solar global tiene promedios entre 4,0 kWh/m² por día y 4,5 kWh/m² por día, especialmente sobre la Amazonia, la Orinoquia, sectores del centro y sur de la región Pacífica y gran parte de la región Andina (ver figura 29). Colombia, debido a

su posición geográfica, es favorecida con una gran disponibilidad del recurso solar.

Las zonas que reciben mayor intensidad de radiación solar global en Colombia, entre 4,5 kWh/m² por día y 6,0 kWh/m² por día, son: región Caribe, nororiente de la Orinoquia y sectores de los departamentos de Cauca, Huila, Valle, Tolima, Caldas, Boyacá, Santanderes, Antioquia y las Islas de San Andrés y Providencia. Los valores más altos (entre 5,5 kWh/m² por día y 6,0 kWh/m² por día) se presentan en los departamentos de La Guajira, norte y sur del Magdalena, norte de Cesar y reducidos sectores de Atlántico y Bolívar (ver figura 29).

Las zonas con menor intensidad de radiación solar global en Colombia, menores a 4,0 kWh/m² por día, se localizan en sectores de Chocó, Nariño, Putumayo, Caquetá, Cauca, Tolima, Eje Cafetero, Cundinamarca, Antioquia y Santanderes. Los valores más bajos (entre 3,0 kWh/m² por día y 3,5 kWh/m² por día) se presentan en el sur del departamento de Chocó, Altiplano Nariñense, occidente de Putumayo y pequeños sectores de Cauca, Tolima y Santander (ver figura 29) ^[45].

Las unidades de la radiación solar en los archivos .icm son unidades térmicas británicas ó de la insolación: (BTU/ft²*día). En el ICM de la MEPDG el parámetro que se utiliza es "la radiación solar máxima"⁴.

Para la conversión de bases de datos, utilicé la siguiente conversión. Ejemplo:

$$446 \frac{wh}{m^2} * \frac{3.412Btu}{1wh} * \frac{1m^2}{10.76ft^2} * \frac{24h}{1dia} = \frac{3394.24Btu}{ft^2 * dia}$$

⁴ <https://www.transportationresearch.gov/dot/fhwa/hcx/Lists/aDiscussion/DispForm.aspx?ID=505>

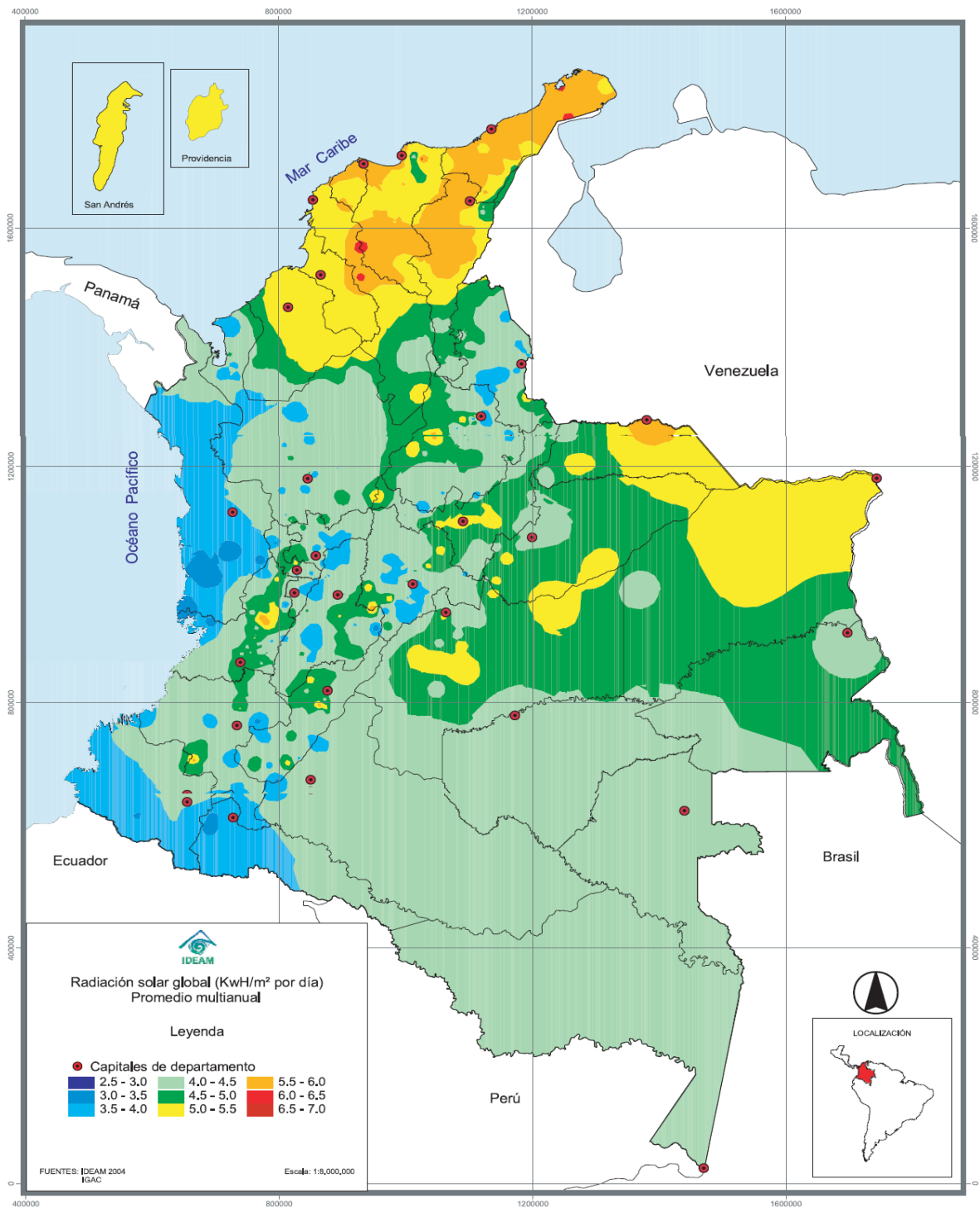


Figura 29. Radiación Solar global (Kwh/m² por día) Promedio multianual.
FUENTE: Atlas Climatológico de Colombia. IDEAM. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales República de Colombia.

5.2.4. LONGITUD, LATITUD Y ELEVACIÓN

La longitud expresa la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y el meridiano que se tome como 0° (es decir el meridiano base) medida a lo largo del paralelo en el que se encuentra dicho punto, una circunferencia cuyo centro es la intersección del eje de la Tierra con el plano del citado paralelo. Habitualmente en la actualidad el meridiano base es el meridiano de Greenwich. En ocasiones la longitud presenta signo negativo (-), lo que indica que el meridiano se encuentra al oeste de Greenwich o es una longitud del Hemisferio Occidental⁵.

La latitud es la distancia angular entre la línea ecuatorial (el ecuador), y un punto determinado del planeta, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra dicho punto. Según el hemisferio en el que se sitúe el punto, puede ser latitud norte o sur.

La latitud proporciona la localización de un lugar, en dirección Norte o Sur desde el ecuador y se expresa en medidas angulares que varían desde los 0° del ecuador hasta los 90°N del polo Norte o los 90°S del polo Sur⁶.

La longitud y la latitud geográfica se miden en grados (°), minutos (') y segundos (") generalmente la cartografía usa grados sexagesimales, minutos sexagesimales y segundos sexagesimales

En el ICM de la MEDPG la longitud y latitud corresponde a la ubicación de la estación influyente del sitio expresada en grados decimales.

⁵ <http://es.wikipedia.org/wiki/Longitud>

⁶ <http://es.wikipedia.org/wiki/Latitud>

La altitud es la distancia vertical de un punto de la Tierra respecto al nivel del mar, llamada elevación sobre el nivel medio del mar (msnm), en contraste con la altura, que indica la distancia vertical existente entre dos puntos de la superficie terrestre; y el nivel de vuelo, que es la altitud según la presión estándar medida mediante un altímetro, que se encuentra a más de 20 000 pies sobre el nivel medio del mar, la unidad en el MEPDG es el pie⁷.

Las estaciones climatológicas utilizadas en este proyecto son las siguientes:

Tabla 9. Estación Aragón en el Municipio de Santa Rosa De Osos – Antioquia – Colombia – IDEAM.

Código	Nombre	Corriente	Elevación	Tipo
4943	ARAGON [27015110]	GRANDE	2600.0	Climatológica Ordinaria

Tabla 10. Ubicación Geográfica Estación Aragón.

Latitud	Longitud
6.534	-75.827

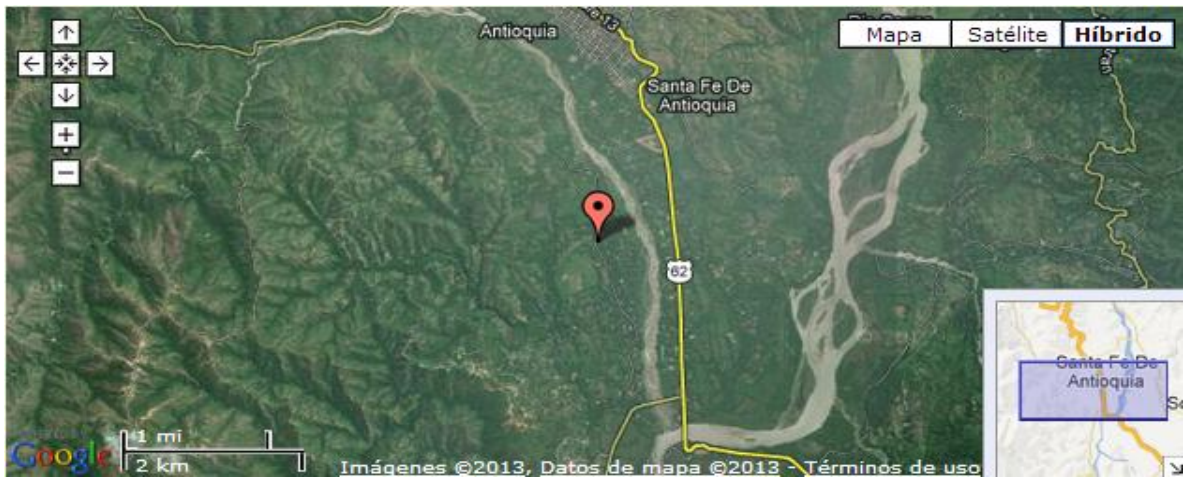


Figura 30. Estación Climatológica Aragón.

⁷ <http://es.wikipedia.org/wiki/Altitud>

Tabla 11. Estación Uniban en el Municipio de Apartadó – Antioquia – Colombia – IDEAM.

Código	Nombre	Corriente	Elevación	Tipo
710	UNIBAN [12015020]	ZUNGO	23.0	Agrometeorológica

Tabla 12. Ubicación Geográfica Estación Uniban.

Latitud	Longitud
7.8261	-76.6514

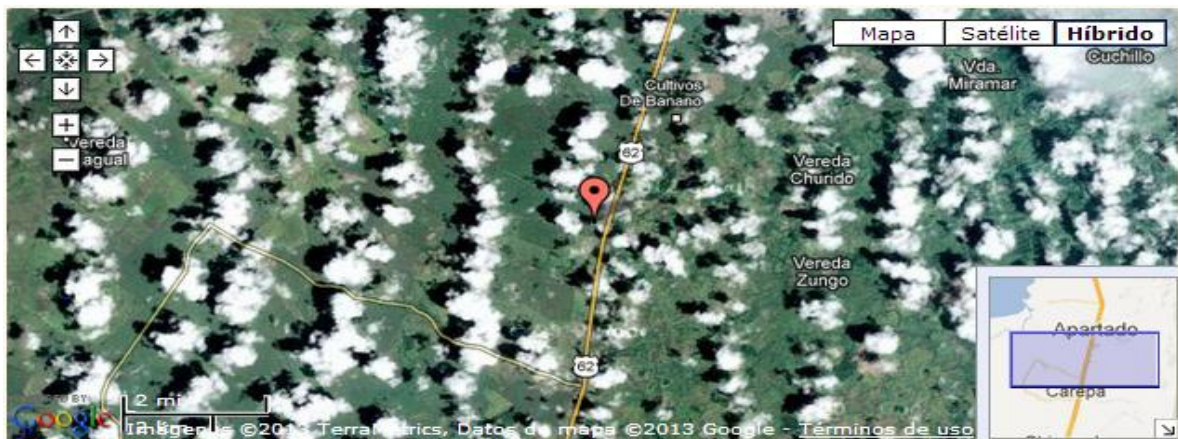


Figura 31. Estación Agrometeorológica Uniban.

Tabla 13. Estación Taques Los en la localidad de Sumapaz – Bogotá– Colombia – IDEAM.

Código	Nombre	Corriente	Elevación	Tipo
7361	TAQUES LOS [35025070]	SANTA ROSA	3150.0	Climatológica Ordinaria

Tabla 14. Ubicación Geográfica Estación Taques Los.

Latitud	Longitud
4.1967	-74.1909



Figura 32. Estación Climatológica Taques Los.

Después de realizar el previo pedido de la información el ideam ofrece todos los datos meteorológicos en forma bruta, así:

20121205072015; Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL

FECHA DE PROCESO : 2012/12/05
 LATITUD 0749 N
 LONGITUD 7639 W
 ELEVACION 0023 m.s.n.m

VALORES MEDIOS
 TIPO EST REGIONAL
 ENTIDAD 01 IDEAM
 REGIONAL 01 ANTIOQUIA

DIARIOS DE TEMPERATURA (oC)
 ANO 2010
 DEPTO ANTIOQUIA
 MUNICIPIO APARTADO
 CORRIENTE ZUNGO

ESTACION : 12015020 UNIBAN
 FECHA-INSTALACION 1977-AGO
 FECHA-SUSPENSION

DIA	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE
01	27.1	27.5	28.5		27.9	26.5	26.6	26.1	25.0	26.8	25.5	25.6
02	27.3	27.8	28.3	27.6	27.5	26.4	26.5	27.7	23.9	26.4	24.6	25.3
03	27.0	27.5	26.3			27.9	27.0	26.4	25.9	25.8	25.8	23.7
04	27.5	26.8	28.0			27.4	27.4	28.3	24.9	26.0	26.3	25.0
05	27.0	27.5	27.2	27.4	26.2	28.3	24.8	28.3	25.9	27.1	27.1	25.7
06	27.0	27.1	26.3	26.2	26.2	28.0	26.9	27.5	26.3	26.5	24.5	25.9
07	27.0	27.8	26.5	28.0	27.0	26.3	27.0	26.0	26.7	27.1	26.6	26.1
08	27.0	27.9	25.5		27.6	27.9	26.0	26.3	27.3	27.9	24.1	26.0
09	27.1	26.7	27.0	28.3	27.5	24.5	27.5	27.0	26.7	27.5	25.5	25.5
10	27.1	27.4	28.0	28.6	29.0	26.0	26.8	26.8	27.0	27.5	25.9	25.0
11	27.0	27.5	26.7	27.4	28.8	28.6	25.1	27.0	25.8	26.8	24.9	25.3
12	27.2	27.7	29.0		27.3	26.9	27.4	24.7	27.1	26.2	25.2	26.4
13	27.1	27.3	28.5		28.2	26.1	27.3	26.5	25.4	27.1	25.2	24.0
14	27.3	28.1	28.4	26.5		25.6	25.2	27.4	27.4	26.5	24.7	23.5
15	27.5	27.5	28.1	28.2		26.0	25.6	25.6	27.7	25.4	24.6	22.9
16	27.7	27.7	28.0	27.3	27.8	26.8	25.1	26.5	25.8	25.9	25.0	24.5
17	27.7	27.5	25.9	28.0	28.8	26.7	27.3	26.5	25.4	24.6	25.0	25.0
18	27.3	27.5	26.3	28.4	29.0	27.2	26.2	26.5	26.8	26.4	25.4	24.5
19	27.3	27.8	27.3	27.8	26.5	25.5	27.4	26.9	25.6	26.0	25.2	25.0
20	27.5	27.1	28.5	26.5	27.5	25.8	27.3	26.4	25.5	25.7	26.4	25.4
21	27.7	27.4	28.6		25.5	26.0	26.9	26.1	25.9	26.4	26.0	25.7
22	27.1	28.7	25.9	28.3	27.4	28.3	26.5	27.0	26.8	25.6	26.1	25.1
23	27.5	27.4	27.8	29.5	26.3	26.0	27.4	26.1	26.3	25.5	25.6	26.1
24	27.3	28.2	28.0	26.6	26.8	28.3	26.6	26.7	25.5	27.0	25.2	25.7
25	26.8	26.9	28.4		28.6	28.9	26.6	26.6	26.5	25.8	26.1	26.1
26	27.4	28.0	28.1	26.1	27.0	27.9	26.4	25.8	26.5	26.4	26.3	25.6
27	27.0	27.7	28.0	27.4	27.2	26.4	26.0	25.9	25.4	26.5	25.0	25.4
28	27.6	28.0	28.1	25.9	27.5	26.5	25.4	26.6	26.4	26.0	25.4	26.5

Figura 33. Registros meteorológicos entregados por el IDEAM en forma bruta.

El archivo que proporciona el instituto meteorológico solo se puede abrir utilizando los siguientes software: WordPad, Microsoft Excel y Bloc de Notas de Windows.

Al obtener la información necesaria para la elaboración de los archivos .icm por parte del **Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales** "IDEAM", estas fueron ordenadas y convertidas hacia cada una de las unidades exigidas dentro del modelo por medio del software Microsoft Excel, Ejemplo:

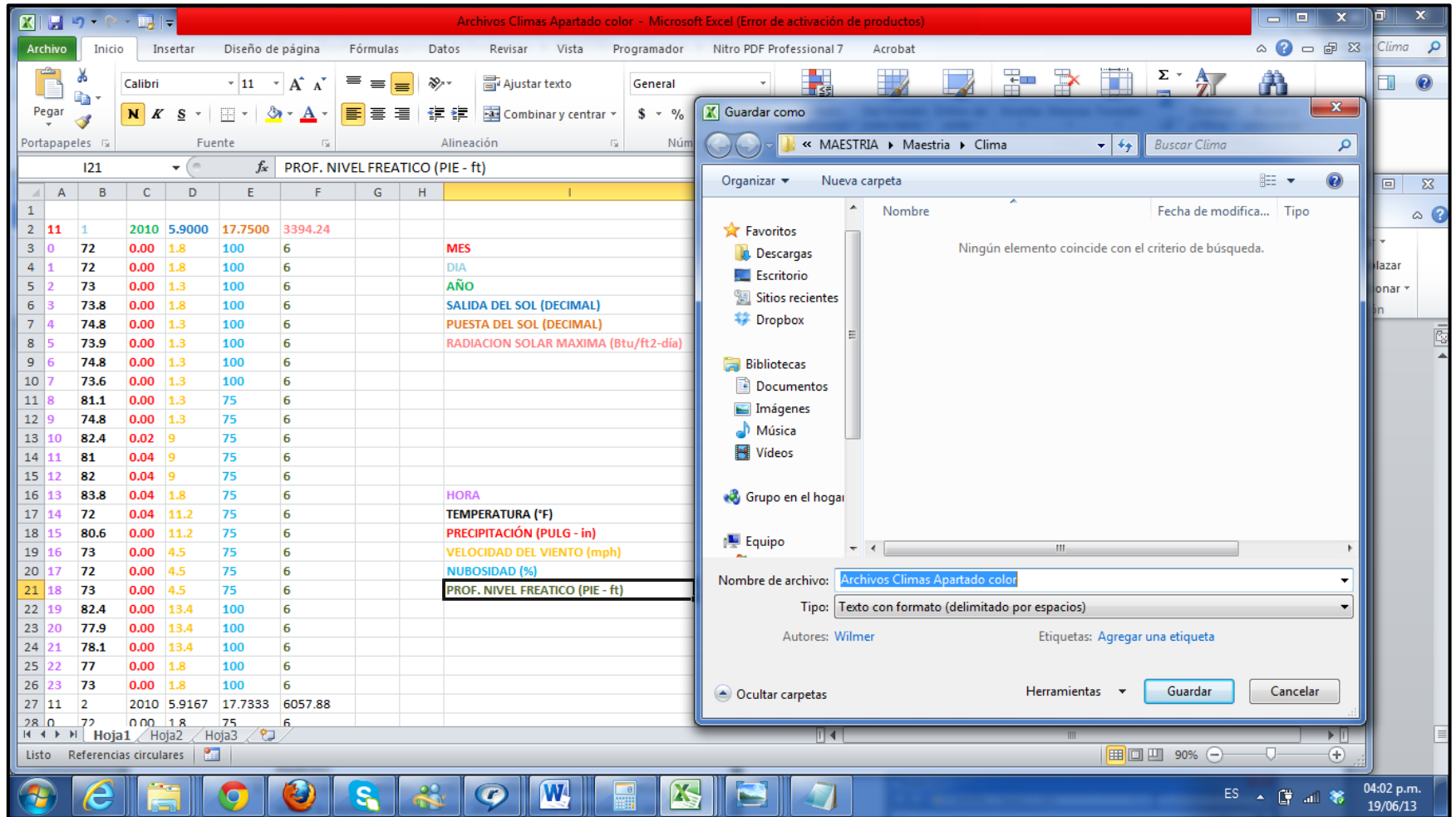


Figura 34. Ordenamiento de Archivos Climáticos en Excel.

Posterior al ordenamiento y con aras a obtener los archivos .icm definitivos se utilizaron los siguientes pasos:

1. Guardar desde Microsoft Excel como “ Texto con formato (delimitado por espacios)”
2. Abrir el archivo generado con el Bloc de Notas de Microsoft Windows y utilizar la pestaña “reemplazar todo”, de modo que se sustituyan los varios espacios generados en la exportación por solo uno de forma rápida, así:

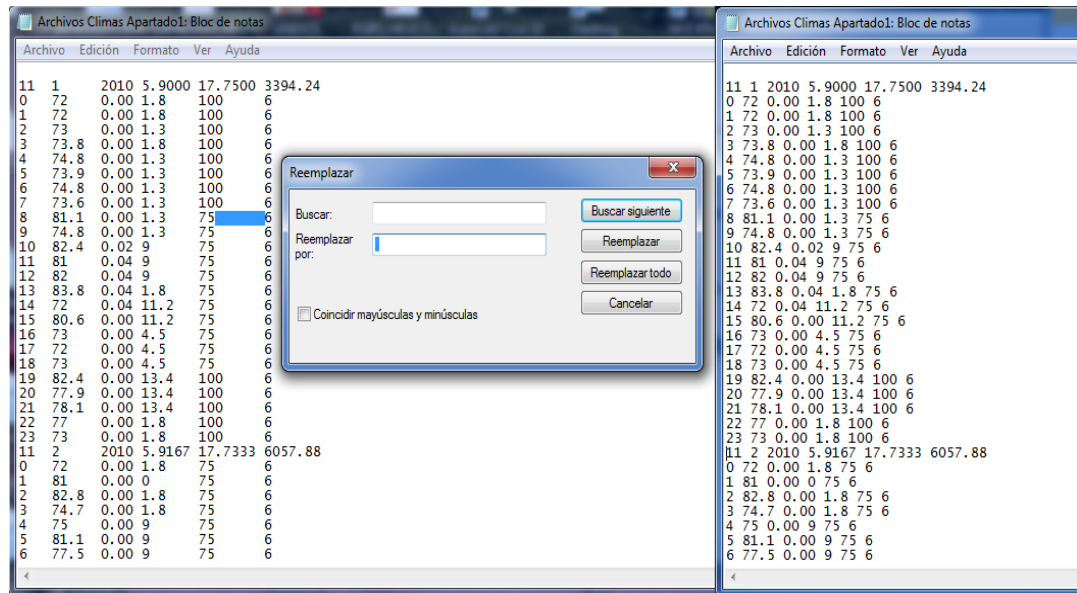


Figura 35. Reemplazo de espacios con Bloc de Notas de Windows.

3. Escribir los parámetros faltantes que se ubican en la parte superior del formato y que se tienen ordenados en formatos Excel de forma anticipada.

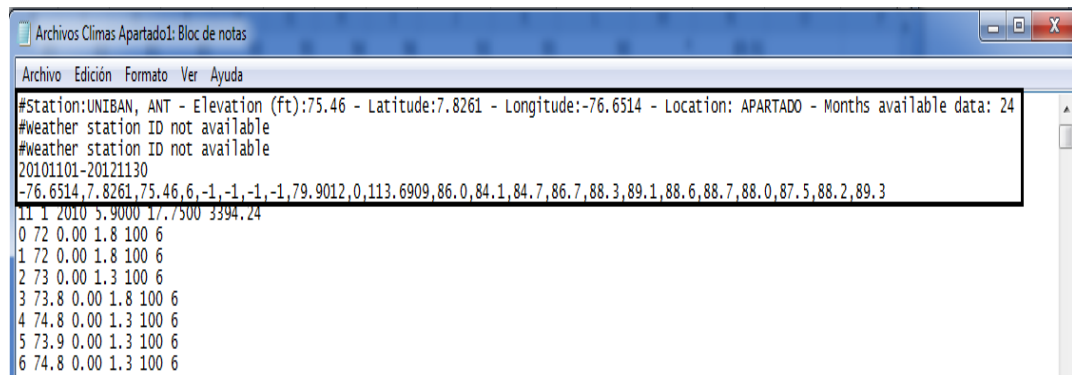


Figura 36. Ubicación de encabezado en los archivos .icm

4. Para finalizar, guardar este archivo con el nombre deseado y ubicar en lo último la extensión “.icm” con codificación ANSI (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares).

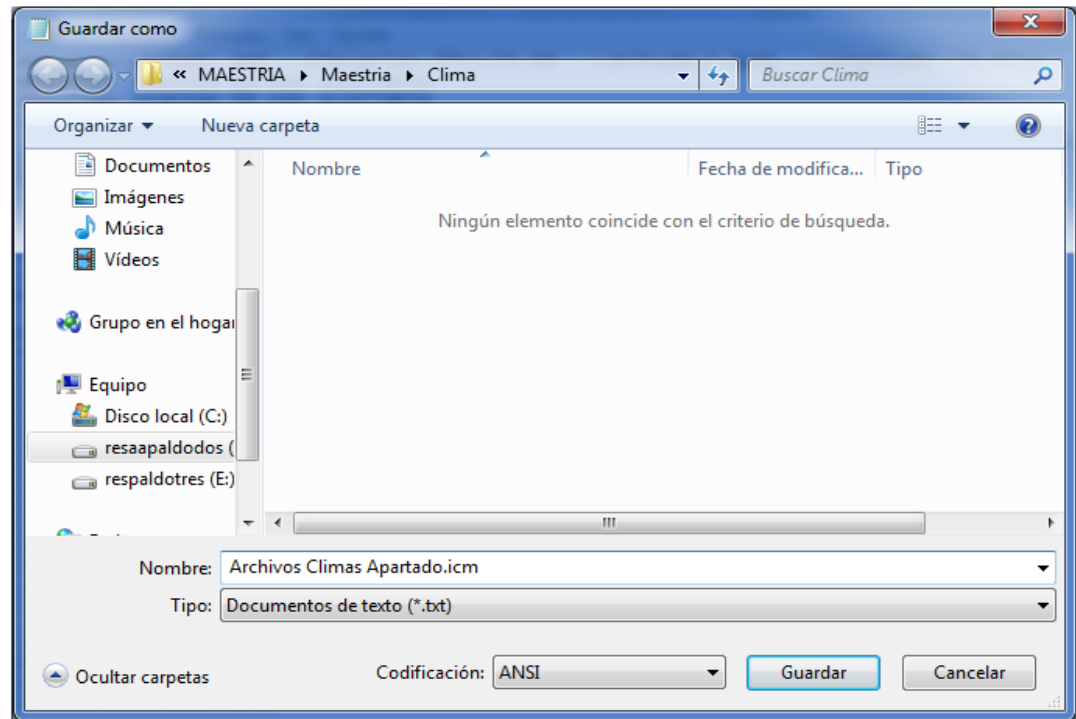


Figura 37. Extensión y codificación de archivos climáticos.

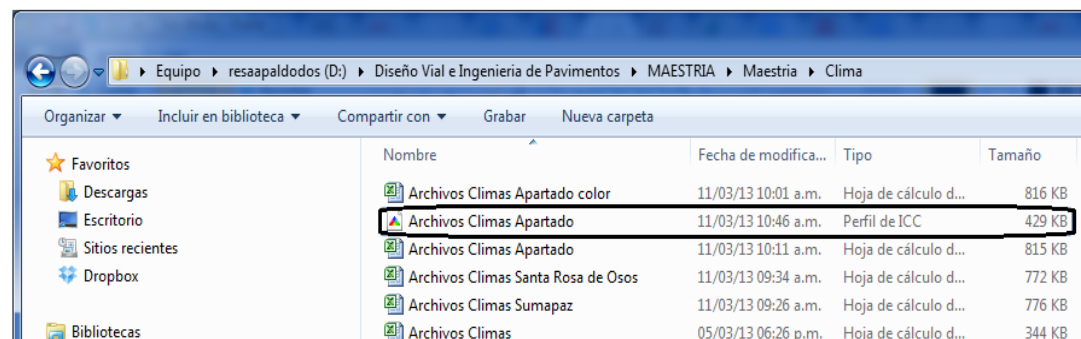


Figura 38. Archivo climático final (Perfil de ICC).

Siguiendo el procedimiento anterior se elaboraron los tres archivos clima con extensión .icm, (Apartadó, Santa Rosa de Osos y Sumapaz) que sirvieron para proponer los ejemplos de diseño utilizando el enfoque Mecánico – empírico.

5.3. EJEMPLOS DE DISEÑO MECANÍSTICO EMPÍRICO

5.3.1. PAVIMENTO FLEXIBLE

Para ilustrar el procedimiento de diseño ME, la centralidad de los modelos climáticos y los parámetros asociados se diseñan dos tipos de pavimentos: rígido y flexible, en los cuales se utilizaron espesores calculados por el método AASHTO 93. para estos diseños se tiene como única variable los tres modelos climáticos .icm ya creados.

Nota: en los ejemplos de diseño se emplean las disposiciones generales del Invias. Además, estos no corresponden a una situación en particular.

Problema de diseño: Se diseña un pavimento de Concreto Asfáltico (CA) con una vida útil de 10 años. La Base y sub-base se construyeron en Julio del 2012, la superficie prevista en Noviembre y el pavimento se abrió al tráfico en enero del año (2013).

Requisitos de Construcción

El pavimento tiene un IRI de 63 pulg/milla.

Parámetros para el análisis

Se espera que al final de los 10 años, el IRI sea no mayor a 158.5 pulg/milla, el límite para el fisuramiento longitudinal es de 1000 pies/milla, fisuramiento por fatiga de abajo hacia arriba 25%, fisuras térmicas de la carpeta asfáltica (fisuramiento transversal) de 1000 pies/milla. La deformación permanente total en el pavimento no debe exceder de 0.75 pulg. Estos criterios deben satisfacerse para un nivel de confiabilidad del 95%. El ahuellamiento utilizado para el diseño es del 0.25 pulg.

Ubicación

El pavimento se ubica teniendo en cuenta los tres sitios Medellín y Santa Rosa de Osos, Ant y Sumapaz, Cund.

Se construirán 26.9 millas de pavimento en dirección Este y se identifica a este proyecto como 74+300 a 101+200.

Tráfico

El ESAL es de 8'000.000. Se construyen dos carriles en cada dirección considerando el 90% de los camiones en el carril de diseño. El tráfico de camiones esta igualmente distribuido en ambas direcciones (50% de los camiones cada dirección). La velocidad de operación es de 38 mph.

Tabla 15. Configuración vehicular basada en el porcentaje de AADTT en el Diseño de pavimento flexible.

Clase Vehicular	Porcentaje de AADTT en clase
Clase 4	20.7
Clase 5	50.3
Clase 6	1.9
Clase 7	2.2
Clase 8	2.3
Clase 9	8.80
Clase 10	13.8

El patrón de tráfico para cada clase vehicular basado en valores diarios y mensuales es el mismo durante todo el año. Sin embargo, el trafico varia en periodos de 24 horas y esta variación es la misma que los valores estándar del rendimiento a largo plazo del Pavimento (LTPP)

Después del año base, el trafico incrementa en un 4.0% durante todo el periodo de diseño del pavimento.

La distribución de cargas por eje es idéntica a los valores estándar del LTPP para cada clase vehicular, tipo de eje, categoría de carga, y meses del año.

Asumo que la distancia promedio del neumático exterior se localiza a 18 pulgadas del borde del pavimento. La desviación estándar es de 10 pulg. El carril de diseño tiene un ancho de 12 pies.

La configuración de ejes es la siguiente:

- Ancho promedio de ejes (ft): 8,5
- Espaciamiento de neumático dual: 12 pulg

La presión de neumáticos simples y dobles es de 120 psi.

Tabla 16. Espaciamiento para ejes doble, triple y cuádruple en el Diseño de pavimento flexible.

Tipo de Eje	Espaciamiento del Eje (pulg)
Doble	51.6
Triple	49.2
Cuádruple	49.2

Clima

Se cargan los tres archivos climáticos generados para “Santa Rosa de Osos, Ant”, “Apartado, Ant” y “Sumpaz, Cund” con el objetivo de que el software prediga los gradientes de temperatura y humedad en los diseños. En mi caso, la profundidad del nivel freático general es de 6 ft.

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

Capa de concreto Asfáltico

Los datos del contenido asfáltico corresponden a un nivel 3. Asfalto con penetración 60/70 y un espesor de 7.5 pulg. Posee 5% de asfalto y 4.8% de vacíos de aire.

La mezcla tiene un peso específico de 143 lb/ft³. Se asume una conductividad térmica de 0.67 BTU-hr-ft-°F y calor específico de 0.23 BTU/lb-°F. El coeficiente de poisson es de 0.35. La temperatura de referencia es de 70°F.

El análisis granulométrico a ser utilizado en la mezcla indican que las mallas 1", ¾", ½", 3/8", No 4, No 10, No 40, No 80 y No 200 tienen respectivamente 0%, 0%, 7.3%, 8.1%, 21.5%, 24.0%, 18.9%, 11.7% y 2.3% del material retenido y 6.2 pasa por la malla #200.

Tabla 17. Especificaciones del cemento asfaltico MDC—2.

DISEÑO		ESPECIFICACION ART. 450-07	
% Asfalto:	5.20%	-	-
Densidad	143bs/pie3	-	-
Estabilidad	1178 kg	>750 kg	
Flujo	3.5 mm	2 mm	4.0mm
Vacios con aire	4.8%	3%	5%
Vacios agregado mineral	16.4%	>15%	
Vacios llenos con asfalto	70.0%	65%	78%
Llenante/Ligante	1.15	0.8	1.2
Estabilidad/flujo	330	300	500
Asfalto efectivo	11.60%		

Tabla 18. Granulometría MDC-2 ART 450 - INV 07.

TAMIZ		INV 2007 ARTICULO 450 "MDC - 2"					
Alternativo	Normal (mm)	Límite superior	Límite inferior	Peso retenido	% retenido	% ret Acumula.	% pasa
1"	25	100	100	0	0.0	0.0	100
¾"	19.000	100	100	0.0	0.0	0.0	100.0
½"	12.500	95	80	88.3	7.3	7.3	92.7
3/8"	9.500	88	70	98	8.1	15.4	84.6
No 4	4.750	65	49	260.2	21.5	36.9	63.1
No 10	2.000	45	29	290.4	24.0	60.9	39.1
No 40	0.425	25	14	228.7	18.9	79.8	20.2
No 80	0.180	17	8	141.6	11.7	91.5	8.5
No 200	0.075	8	4	27.8	2.3	93.8	6.2
P200				75			

Peso seco	1210
------------------	------

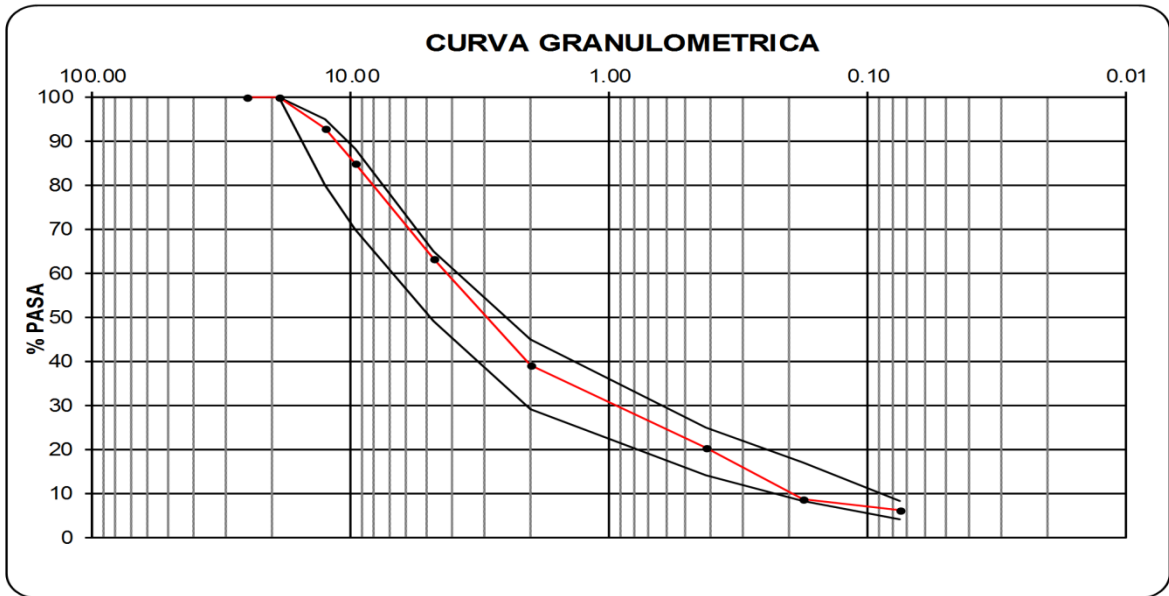


Figura 39. Curva Granulométrica MDC-2.

Base Granular

Los datos de la base granular corresponden a un nivel 3. Base Granular con un módulo de 28000 psi, es decir, CBR 80% y un espesor de 9 pulg. El coeficiente de poisson es de 0.4. Coeficientes de Empuje lateral de 0.67

Tabla 19. Coeficientes de Empuje lateral.

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad \text{Coeficiente de Poisson}$$

POISSON	K ₀
0.20	0.25
0.25	0.33
0.30	0.43
0.35	0.54
0.40	0.67
0.45	0.82
0.50	1.00

El análisis granulométrico a ser utilizado en la Base indican que en la malla No200 pasa el 13.2% y para la malla No4 el 48.2%. IP de 0% y LL de 0%.

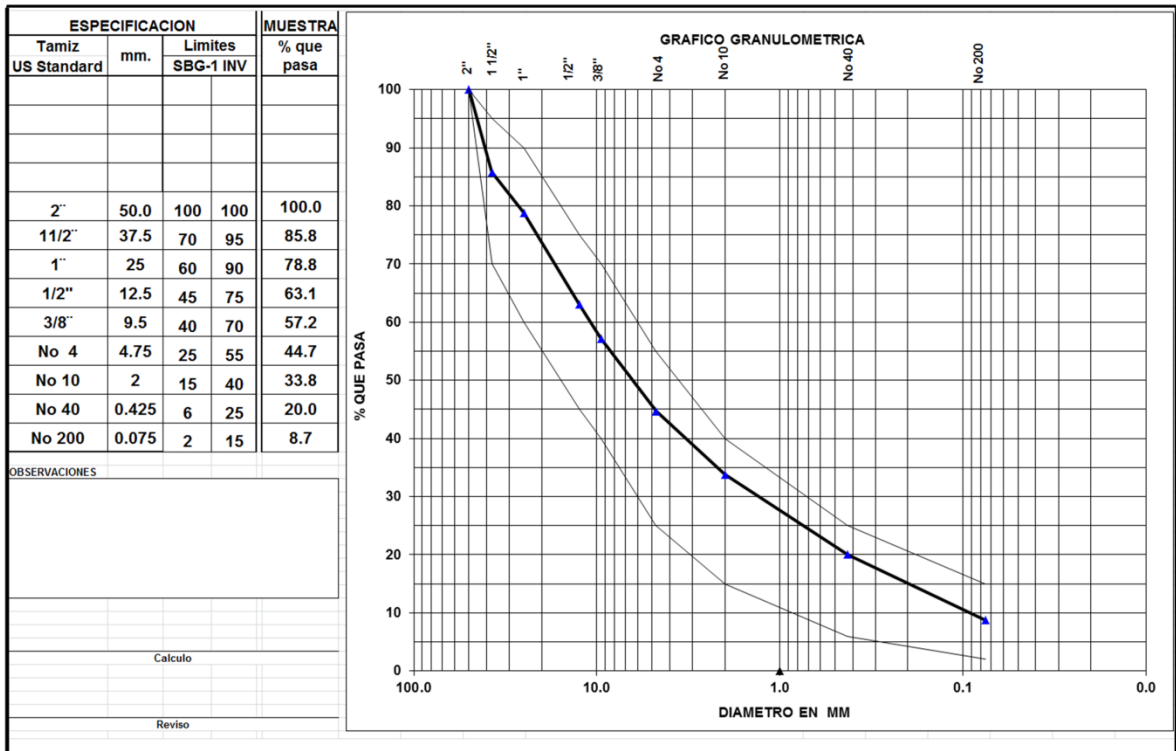


Figura 41. Curva Granulométrica Subbase Granular Pavimento Flexible.

Subrasante

La subrasante utilizada está clasificada según U.S.C como (SC) arena arcillosa y sistema AASHTO como A-2-6. El IP es de 16%. Los datos de la Subrasante corresponden a un nivel 3. Módulo Resiliente de 8134 psi. Las pruebas de granulometría indican que el 24.8% pasa la Malla No 200 y el 67.2% pasa la malla No 4. El D_{60} de este material es de 2.138 m. El espesor de la capa es infinito (última capa).

Tablas de resúmenes para el diseño con pavimento asfáltico y modelos climáticos.

Tabla 20. Resumen de daños y confiabilidad para el Municipio de Apartado, Antioquia – Pavimento Flexible.

Criterios de Desempeño	Daño Limite	Confiabilidad Deseada	Daño Pronost.	Confiabilidad Pronosticada	¿Aceptable?
IRI Terminal (pulg/mi)	158.5	95	100.9	97.87	Cumple
Fisuramiento Longitudinal (ft/milla):	1000	95	218	66.61	No Cumple
Fisuramiento por fatiga de abajo hacia arriba (%):	25	95	2.5	98.76	Cumple
Fisuras Térmicas (fisuramiento transversal) (ft/mi):	1000	95	1	99.999	Cumple
Deformación Permanente (Solo en la carpeta asfáltica) (pulg):	0.25	95	0.15	97.35	Cumple
Deformación Permanente (Totalidad del Pavimento) (pulg):	0.75	95	0.67	77.32	No Cumple

Tabla 21. Resumen de daños y confiabilidad para el Municipio de Santa Rosa de Osos, Antioquia – Pavimento Flexible.

Criterios de Desempeño	Daño Limite	Confiabilidad Deseada	Daño Pronost.	Confiabilidad Pronosticada	¿Aceptable?
IRI Terminal (pulg/milla)	158.5	95	102.6	97.4	Cumple
Fisuramiento Longitudinal (ft/milla):	1000	95	472	60.26	No Cumple
Fisuramiento por fatiga de abajo hacia arriba (%):	25	95	2.4	99.52	Cumple
Fisuras Térmicas (fisuramiento transversal)(ft/mi):	1000	95	1	99.999	Cumple
Deformación Permanente (Solo en la carpeta asfáltica) (pulg):	0.25	95	0.2	79.53	No Cumple
Deformación Permanente (Totalidad del Pavimento) (pulg):	0.75	95	0.73	58.93	No Cumple

Tabla 22. Resumen de daños y confiabilidad para la localidad de Sumapaz, Cundinamarca – Pavimento Flexible.

Criterios de Desempeño	Daño Limite	Confiabilidad Deseada	Daño Pronost.	Confiabilidad Pronosticada	¿Aceptable?
IRI Terminal (pulg/milla)	158.5	95	89.4	99.68	Cumple
Fisuramiento Longitudinal (ft/milla):	1000	95	0.5	99.93	Cumple
Fisuramiento por fatiga de abajo hacia arriba (%):	25	95	0.5	99.999	Cumple
Fisuras Térmicas (fisuramiento transversal) (ft/mi):	1000	95	1	99.999	Cumple
Deformación Permanente (Solo en la carpeta asfáltica) (pulg):	0.25	95	0.02	99.999	Cumple
Deformación Permanente (Totalidad del Pavimento) (pulg):	0.75	95	0.44	99.99	Cumple

Tabla 23. Cuadro Comparativo de Parámetros de Salida – Pavimento flexible.

Criterios de Desempeño	Daño Limite	Confiabilidad Deseada	Apartado		Santa R. O.		Sumapaz	
			Daño Pronost.	Confiabilidad Pronosticada	Daño Pronost.	Confiabilidad Pronosticada	Daño Pronost.	Confiabilidad Pronosticada
IRI Terminal (pulg/mi)	158.5	95	100.9	97.87	102.6	97.4	89.4	99.68
Fisu. Long. (ft/mi):	1000	95	218	66.61	472	60.26	0.5	99.93
Fisu. Fatiga de abajo hacia arriba (%):	25	95	2.5	98.76	2.4	99.52	0.5	99.999
Fisu Térmicas (fisu trans.) (ft/mi):	1000	95	1	99.999	1	99.999	1	99.999
Defor. Perm. (Solo en AC) (pulg):	0.25	95	0.15	97.35	0.2	79.53	0.02	99.999
Defor. Perm. (Tot. Pav) (pulg):	0.75	95	0.67	77.32	0.73	58.93	0.44	99.99

Para interpretar la información anterior se define inicialmente el concepto de Confiabilidad de diseño (R) como la probabilidad (P) que el daño pronosticado será menor que un nivel admisible durante el periodo de diseño.

$R = P$ (Daño a lo largo del Periodo de Diseño < Nivel admisible o Umbral de falla).

Una vez comparado los daños y confiabilidades se identifica que tanto para la zona de Apartado como la Santa Rosa de Osos (Depto. Antioquia) no se cumple con los siguientes criterios de desempeño: fisuramiento longitudinal y las deformaciones permanentes, es decir, estos dos tipos de fallas son más sensibles a los efectos del clima.

Para el caso de las deformaciones permanentes los daños pronosticados no superan el daño límite para la vida útil de diseño (10 años), además se observa que las confiabilidades pronosticadas no son igual o mayor que la confiabilidad deseada, por lo que la estructura de pavimento utilizada no cumple y se hace necesario modificar el diseño inicial para corregir el problema.

En cuanto al fisuramiento longitudinal, en el análisis se nota que el daño previsto para ambos municipios está dentro de los límites de diseño, pero la confiabilidad predecida es menor que la confiabilidad deseada y esta última consideración hace en últimas que el diseño del pavimento no se desempeñe de manera satisfactoria durante todo el periodo de diseño.

En la localidad de Sumapaz (Cundinamarca) se cumple con todos los criterios de desempeño tanto para la confiabilidad deseada como para los daños límites.

Análisis Apartadó

La fisura longitudinal presente en la zona de Apartadó posiblemente se encuentra asociada a las cargas aplicadas por el tráfico de 8 millones de ESAL, de modo que en el periodo de diseño el pavimento está simplemente “agotado” y necesita una

rehabilitación planificada, esto se evidencia en la figura 43 donde este fisuramiento se evidencia a los 5 meses de haberse dado a tráfico la estructura de pavimento.

En cuanto a la deformación permanente total, el no cumplimiento del ahuellamiento también pudo verse influenciado por las repetidas aplicaciones de las cargas al suelo natural, es decir, la subrasante, subbase o la base granular. El alto ahuellamiento en la capa asfáltica en cambio pudo haber sido causado por problemas de baja resistencia al corte en la mezcla asfáltica para soportar de forma repetida las cargas pesadas o también por las altas temperaturas y radiaciones solares presentes en el municipio de Apartadó, que influyen de cierto modo a la generación de fluencia sobre la mezcla y por ende mucha más profundidad de ahuellamiento.

En las figuras del diseño se evidencia como la estructura de pavimento flexible falla por ahuellamiento total a los 67 meses de la construcción (ver figura 46), es decir, no se cumple con la vida útil de diseño, haciendo indispensable el cambio de parámetros del proyecto en aras a cumplir con todos los criterios de desempeño.

Figura 42. IRI TERMINAL (pulg/mi) – Pavimento Flexible – Apartadó.

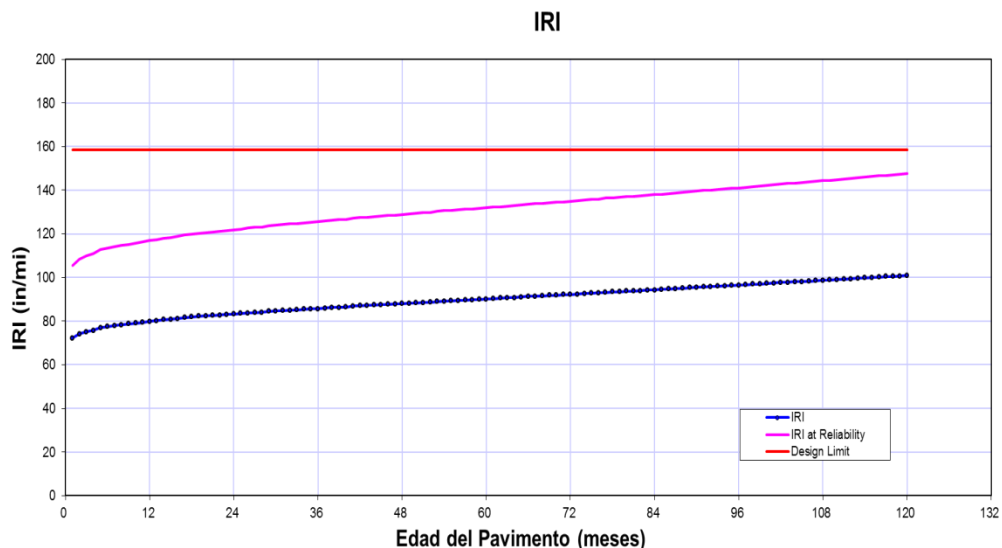


Figura 43. FISURAMIENTO LONGITUDINAL (ft/mi) – Pavimento Flexible – Apartadó.

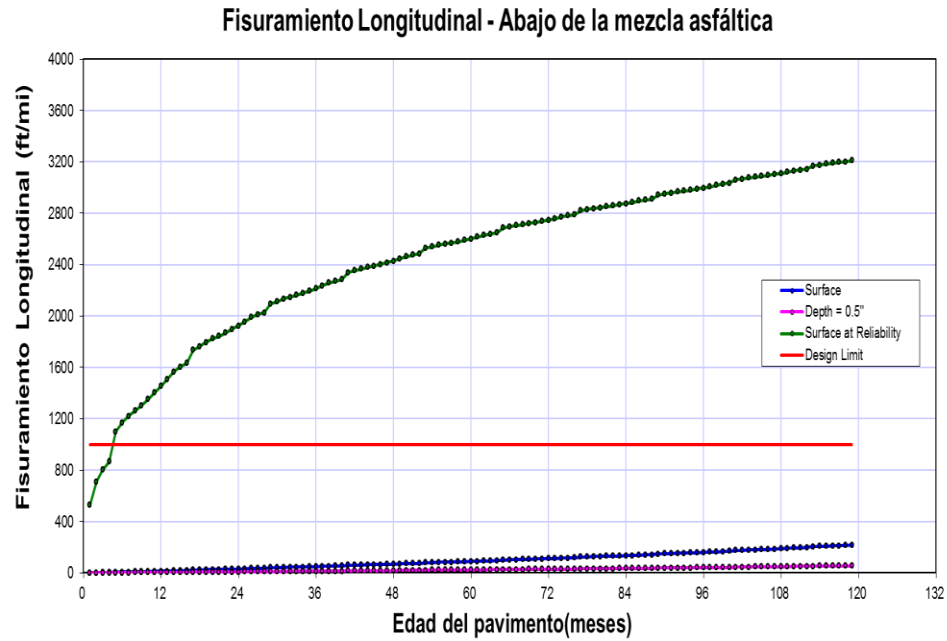


Figura 44. FISURAMIENTO PIEL DE COCODRILO (%) – Pavimento Flexible – Apartadó.

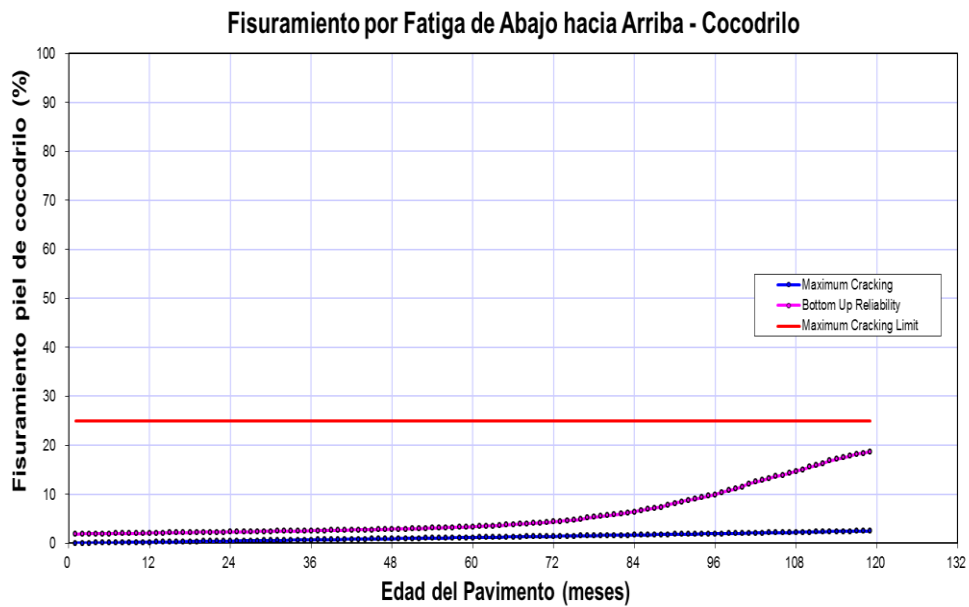


Figura 45. FISURAMIENTO TÉRMICO (TRANSVERSAL – ft/mi) – Pavimento Flexible – Apartadó.

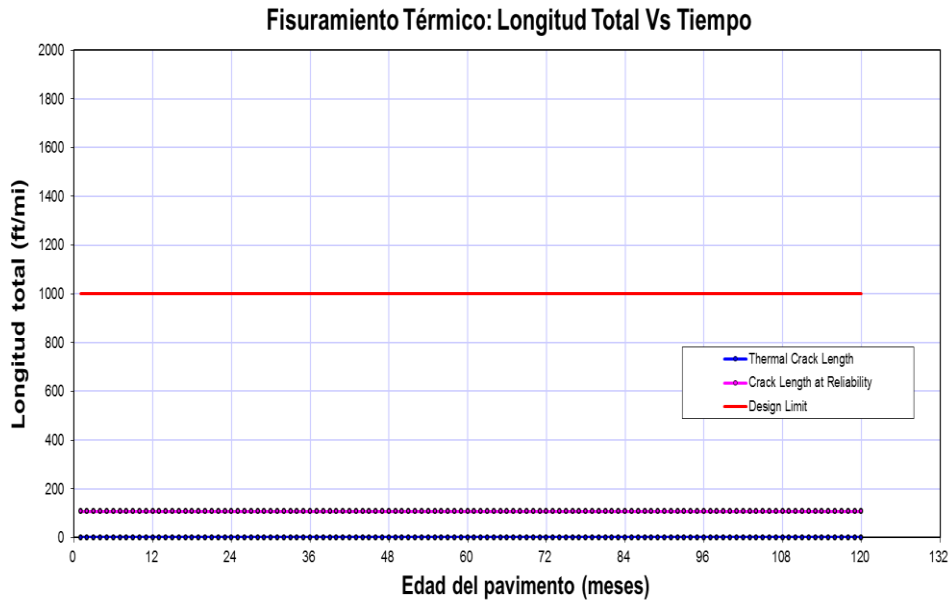
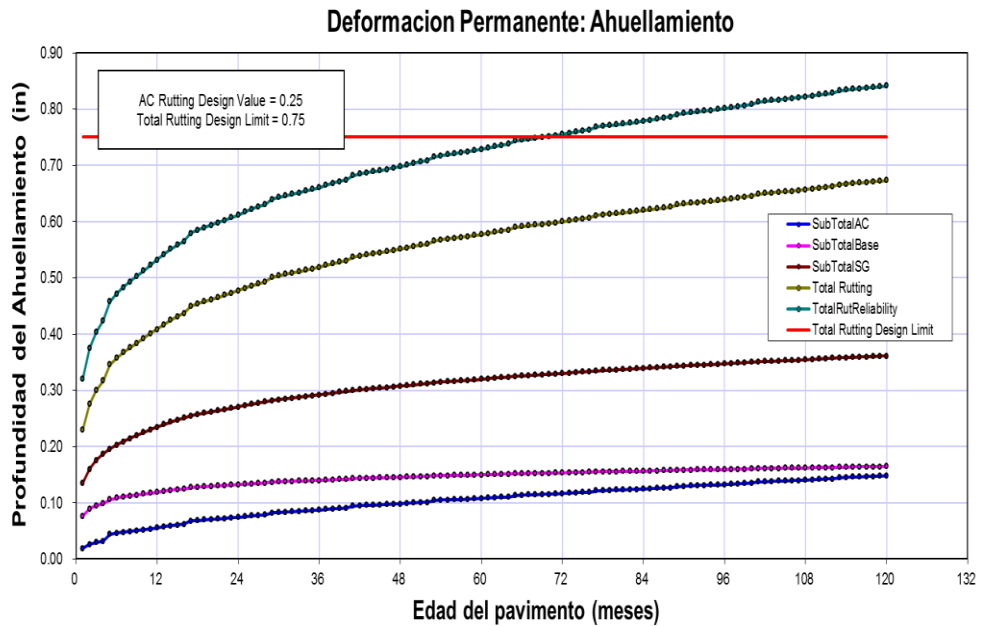


Figura 46. DEFORMACION PERMANENTE (pulg) – Pavimento Flexible – Apartadó.



La humedad que genera la alta precipitación del sitio sobre el suelo de subrasante también es un factor influyente en la generación de esta deformación, puesto que la lluvia destruye los enlace entre partículas de suelo, haciéndolo más susceptible a las cargas de los vehículo.

Análisis Santa Rosa de Osos

El fisuramiento longitudinal exhibido se asocia principalmente a las bajas temperaturas del municipio que a las cargas del tránsito, éstas fisuras se formaron ciertamente cuando la capa de pavimento asfáltico se contrajo, generando consigo esfuerzos de tracción dentro de la capa y excedencia de resistencia a la tracción, para dar en ultimas un fisuramiento. La figura 48 muestra que el pavimento en Santa Rosa de Osos solo cumple para 4 meses desde su puesta.

La alta deformación permanente se ve afectada principalmente por las cargas de tráfico del proyecto, como se expuso anteriormente, durando solo 53 meses para el ahuellamiento tota (ver figura 51).

Figura 47. IRI TERMINAL (pulg/mi) – Pavimento Flexible - Santa Rosa de O.

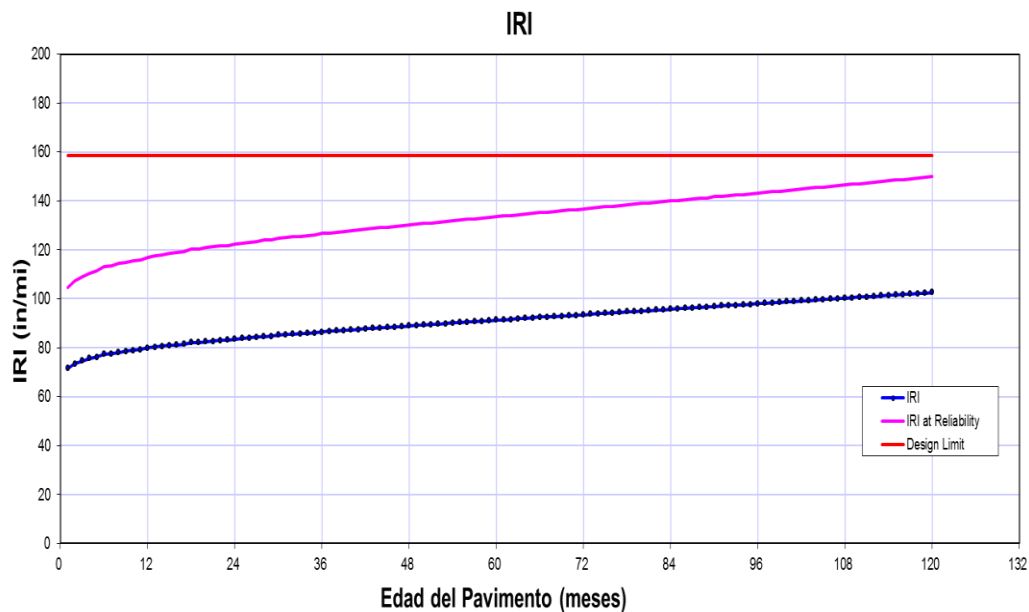


Figura 48. FISURAMIENTO LONGITUDINAL (ft/mi) – Pavimento Flexible - Santa Rosa de Osos.

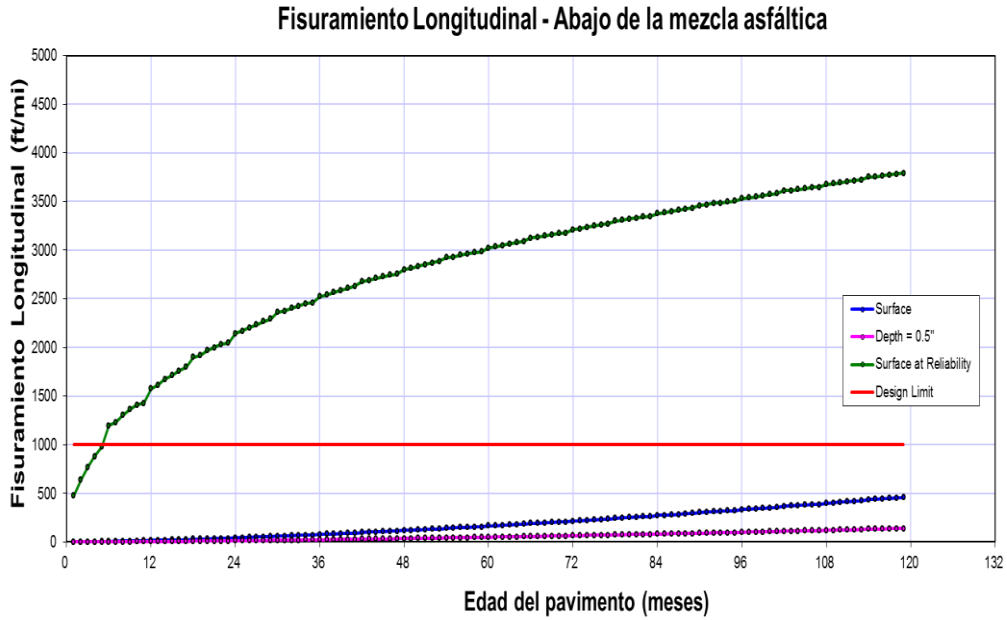


Figura 49. FISURAMIENTO PIEL DE COCODRILO (%) – Pavimento Flexible - Santa Rosa de Osos.

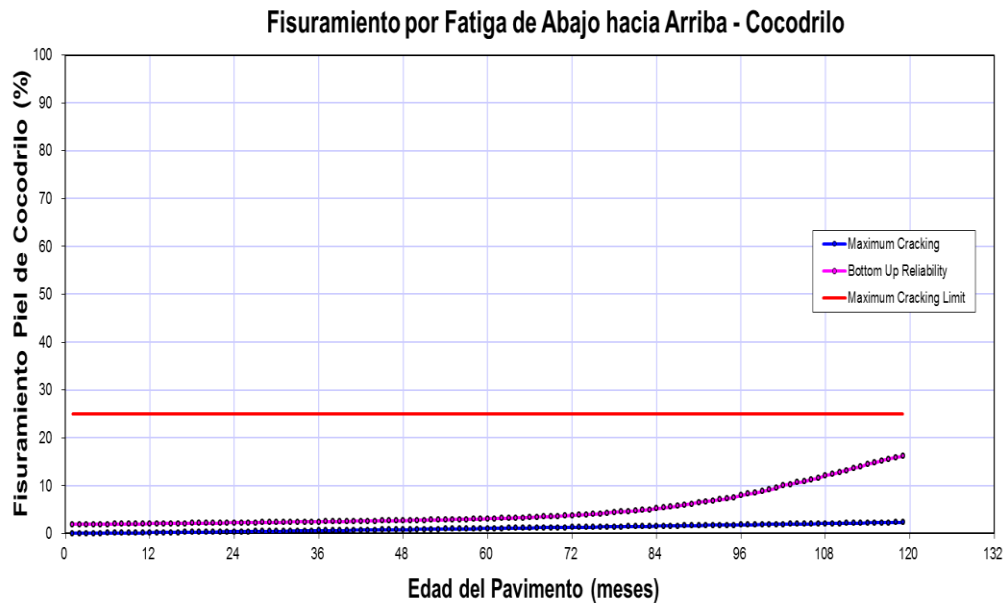


Figura 50. FISURAMIENTO TÉRMICO (TRANSVERSAL – ft/mi) – Pavimento Flexible - Santa Rosa de Osos.

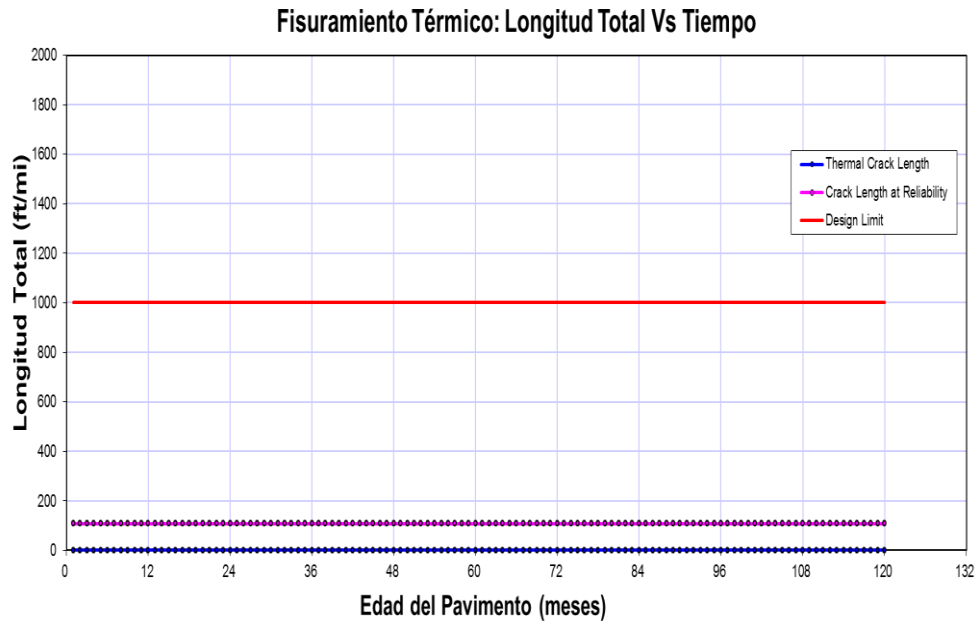
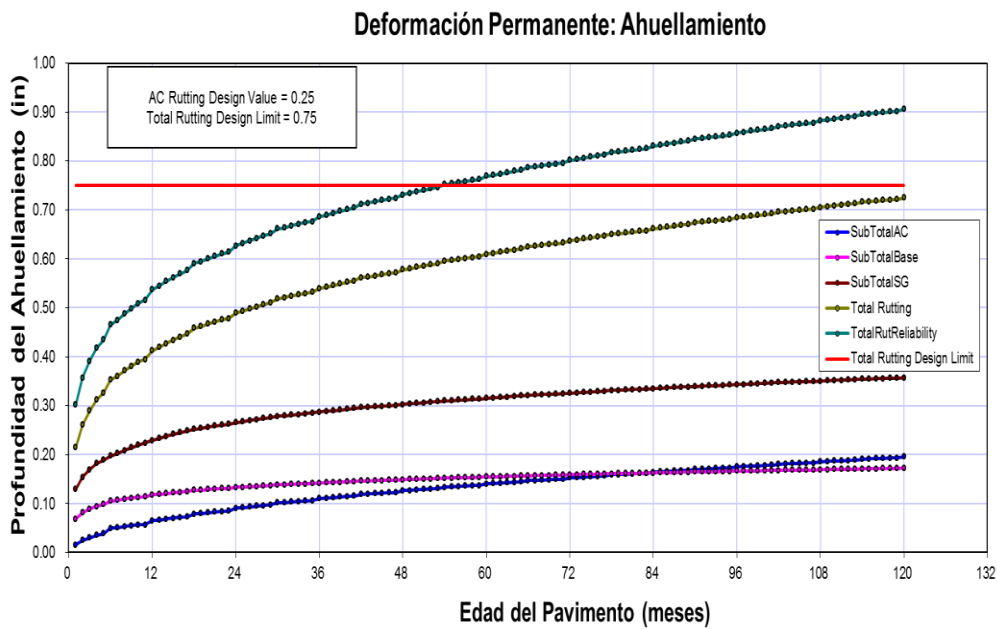


Figura 51. DEFORMACION PERMANENTE (pulg) – Pavimento Flexible - Santa Rosa de Osos.



Para que los parámetros de fisuramiento longitudinal y deformación permanente cumplan tanto en Apartadó como en Santa Rosa de Osos, se puede reducir el contenido de asfalto de la mezcla asfáltica, incrementar el módulo dinámico de la mezcla y reducir el módulo dinámico e incrementar el espesor de la capa asfáltica.

Análisis Sumapaz

Es este lugar se cumple con todos los parámetros de diseño (ver figuras 53 al 57), el cumplimiento de todos los parámetros se ve ligado principalmente a las bajas temperaturas que densifican la estructura de pavimento, es decir, a temperaturas de congelación el agua se congela en el suelo y su módulo elástico puede elevarse a valores 20 a 120 veces mayor que el valor del módulo antes de la congelación, este proceso de congelación puede estar acompañada por la formación de lentes de hielo y aumento de la rigidez que dan como resultado que no se produzca ahuellamiento en la capa asfáltica.

Los climas fríos pueden generar en los materiales de pavimento los siguientes efectos:

- Los materiales asfálticos consolidados presentan diversos valores del módulo en función de la temperatura.
- Los valores del módulo de la mezcla asfáltica pueden variar desde 2 hasta 3 millones de psi o más durante meses fríos de invierno a alrededor de 100.000 psi o menos durante los meses calurosos del verano.
- Los materiales granulares no unidos no se ven afectados por la temperatura a menos que se forma el hielo por debajo de 32 °F.

Una vez realizado el diseño ME con el modelo climático Sumapaz, se comprueba lo antes expuesto, donde los módulos varían desde 1.4 a 3.2 millones de psi, como se muestra en la siguiente figura:

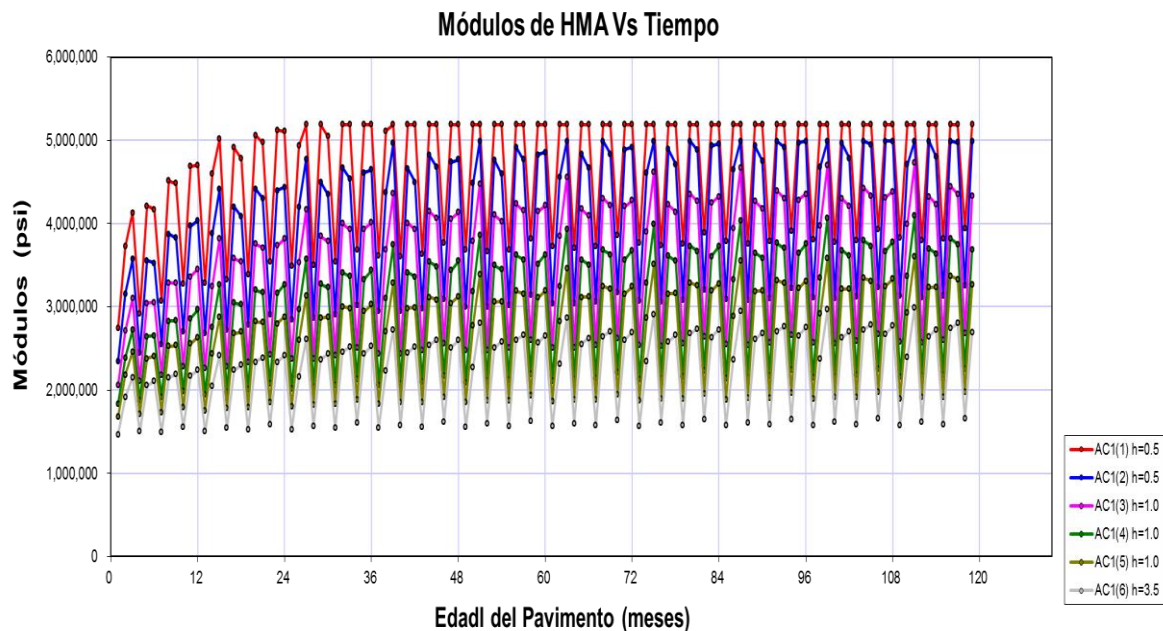


Figura 52. Módulos de HMA Vs Tiempo para el diseño en Pavimento Flexible – Localidad de Sumapaz.

La anterior figura muestra el cambio de módulo en la Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA) durante la vida de diseño, que para este caso son 10 años. El pavimento se separa en 6 capas, y el módulo se calcula en cada una de estas capas y para cada mes. Estos módulos indudablemente sobrepasan los módulos típicos de las Mezclas asfálticas que están alrededor de 400000 y 500000 psi.

Aunque la estructura de pavimento cumpla con los requisitos y no se vea afectada por los cambios de temperatura como en las otras zonas de estudio, es conveniente para este caso poder disminuir espesores de algunas capas en busca del diseño óptimo que garantice rentabilidad económica o también usar un asfalto adecuado para el clima predominante, pudiendo ser cementos Asfálticos modificados con polímeros, con el fin de obtener un producto de propiedades mejoradas (menor susceptibilidad térmica y mayor elasticidad). De este modo se logra a temperaturas bajas un comportamiento líquido viscoso que mantenga las características elásticas, evitando el fisuramiento térmico.

Estas mezclas presentan una mejorada resistencia a la fatiga y mejor cohesión, lo que permite obtener superficies más durables y resistentes al desgaste. Con esto se puede llegar a elevar la vida útil del pavimento de dos a tres veces con un costo adicional de hasta un 25% sobre la mezcla asfáltica.

Figura 53. IRI TERMINAL (pulg/mi) – Pavimento Flexible – Sumapaz.

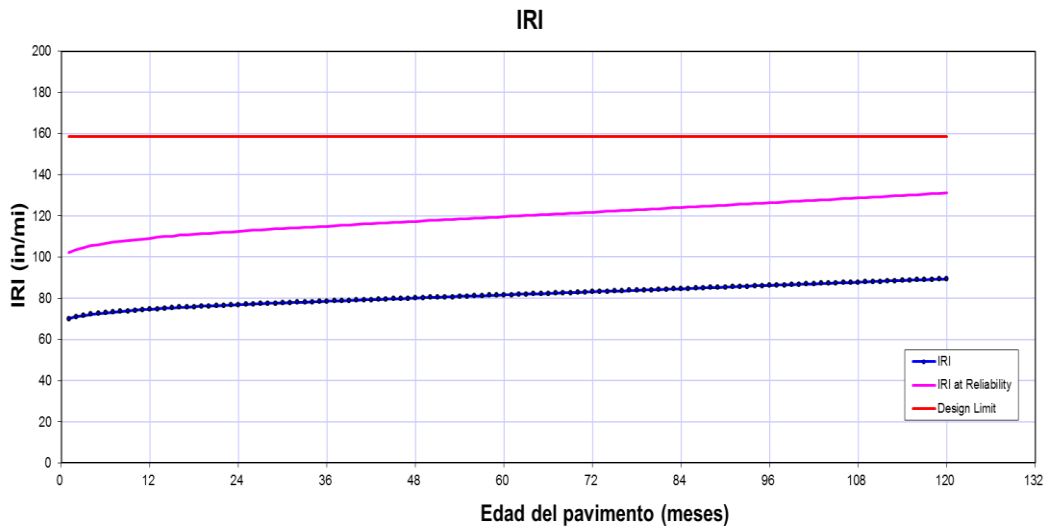


Figura 54. FISURAMIENTO LONGITUDINAL (ft/mi) – Pavimento Flexible – Sumapaz.

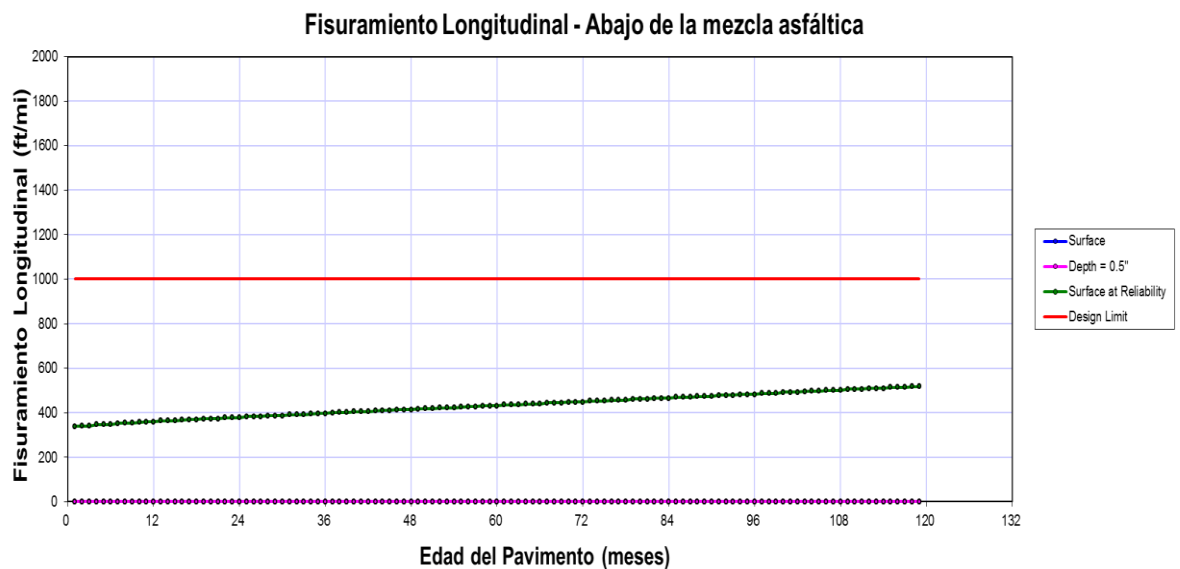


Figura 55. FISURAMIENTO PIEL DE COCODRILO (%) – Pavimento Flexible – Sumapaz.

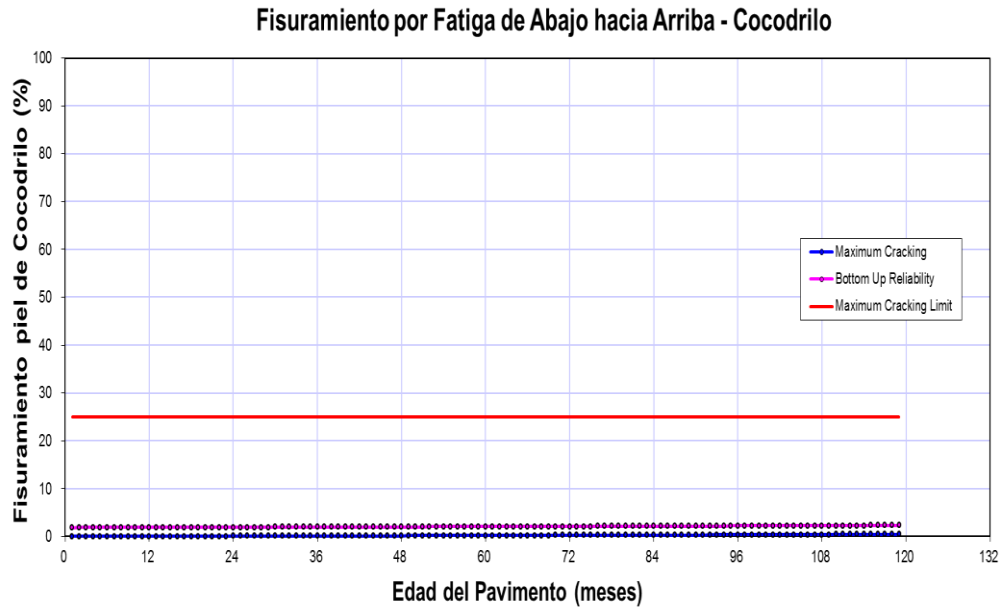


Figura 56. FISURAMIENTO TÉRMICO (TRANSVERSAL – ft/mi) – Pavimento Flexible – Sumapaz.

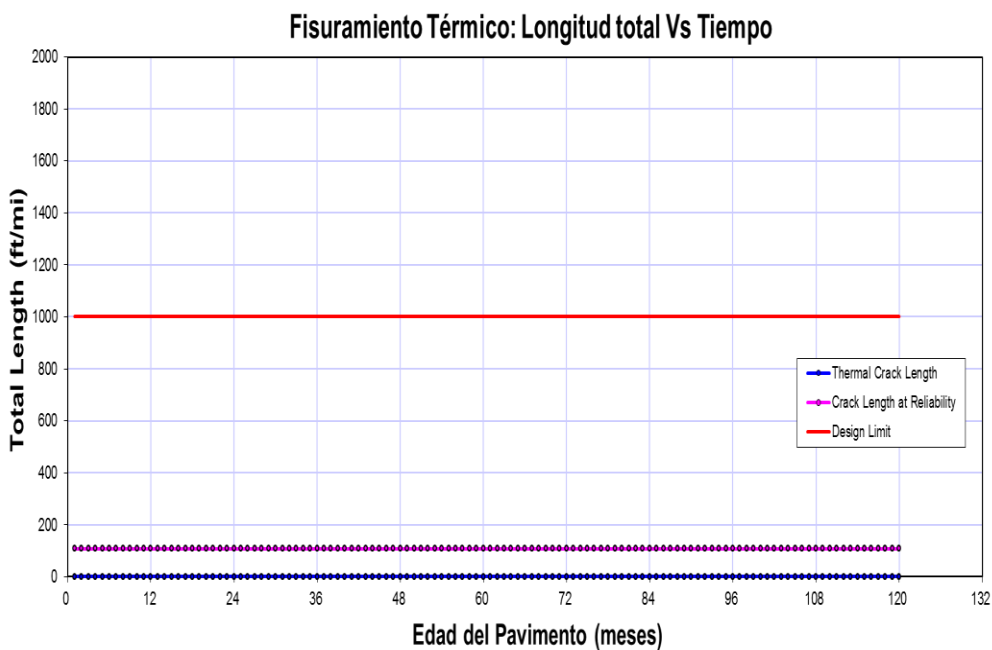
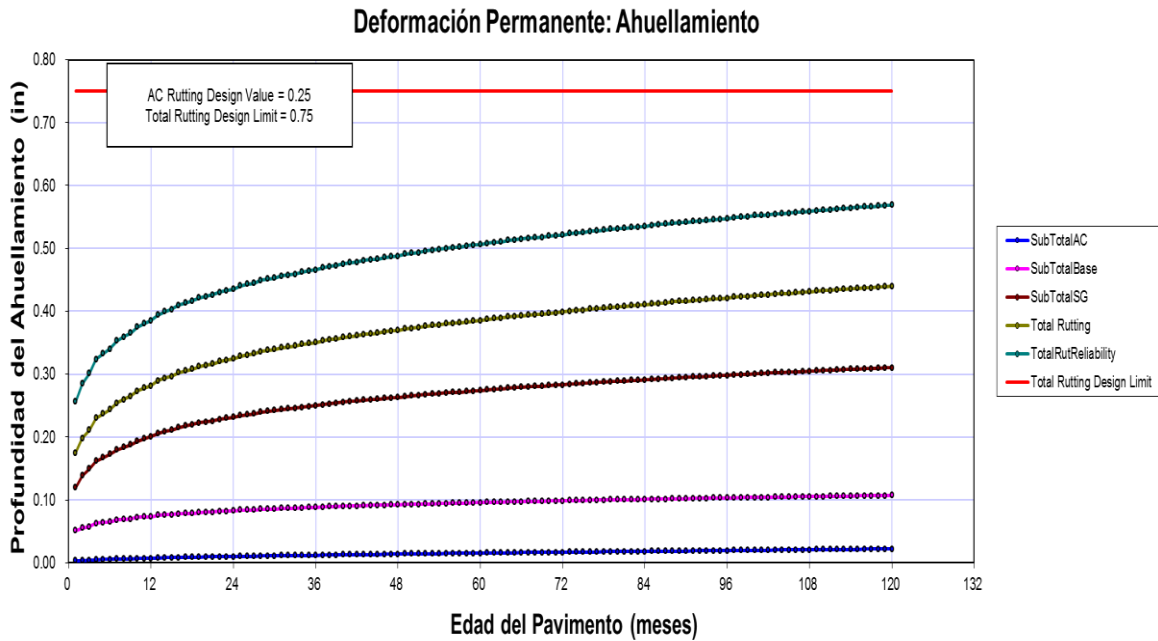


Figura 57. DEFORMACION PERMANENTE (pulg) – Pavimento Flexible – Sumapaz.



En la guía de diseño Mecánico – Empírico de pavimentos se exponen todos los cambios que se pueden realizar en el diseño prueba para satisfacer los criterios de desempeño [28]. Para estos diseños solo se toman los daños por fisura longitudinal y deformación permanente (ahuellamiento) arrojados en el diseño, para los cuales se presentan las soluciones que se pueden emplear para garantizar así el cumplimiento de todos los criterios de desempeño, así:

Tabla 24. Pautas para modificar el diseño prueba de HMA para satisfacer los criterios de desempeño en Pavimento flexible.

Criterios de desempeño	Cambios para satisfacer el diseño Prueba
Ahuellamiento en HMA	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementar el módulo dinámico del HMA • Usar asfalto modificado con polímero en las capas cercanas a la superficie. • Incrementar la cantidad de agregado triturado • Incrementar la cantidad de finos en la HMA • Reducir el contenido de asfalto en la capa de HMA
Ahuellamiento en	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementar el módulo resiliente de la base granular.

capas no ligadas y Subrasantes	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilizar el suelo débil de fundación. • Colocar una capa del material de terraplén con una adecuada compactación. • Incrementar el espesor de la capa de HMA
Fisuramiento longitudinal por fatiga	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir el módulo dinámico de la capa superficial de HMA. • Incrementar el espesor de la capa de HMA. • Usar Asfalto más blando en la capa superficial. • Usar un asfalto modificado con polímeros en la capa superficial.

5.3.2. PAVIMENTO RÍGIDO

MEPDG: EJERCICIO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS (JPCP)

Período de Diseño

Problema de diseño: - Se diseña un pavimento de concreto simple con juntas (JPCP) con una vida útil de 20 años. La construcción se realizará en Julio del 2012. El tramo se abre al tráfico en Junio del 2013.

Requisitos de la Construcción

El pavimento tiene un IRI de 63 pulg/milla.

Parámetros de Análisis

Se espera que al final de los 20 años, el pavimento no tenga más de 15% de fisuramiento transversal a un nivel de confiabilidad de 95%, y no más de 0.15 pulgadas de escalonamiento a un nivel de confiabilidad de 95%. Asimismo, la rugosidad deberá ser mantenida con un IRI menor a 158 pulgadas/milla a un nivel de confiabilidad del 95%.

Ubicación

El pavimento se ubica teniendo en cuenta los tres sitios Medellín y Santa Rosa de Osos, Ant y Sumapaz, Cund.

Se construirán 26.9 millas de pavimento de JPCP en dirección Este, progresivas 74+300 a 101+200.

Tráfico

El ESAL es de 8'000.000. Se construyen dos carriles en cada dirección considerando el 90% de los camiones en el carril de diseño. El tráfico de camiones esta igualmente distribuido en ambas direcciones (50% de los camiones cada dirección). La velocidad de operación es de 38 mph.

Tabla 25. Configuración vehicular basada en el porcentaje de AADTT en el Diseño de pavimento flexible.

Clase Vehicular	Porcentaje de AADTT en clase
Clase 4	20.7
Clase 5	50.3
Clase 6	1.9
Clase 7	2.2
Clase 8	2.3
Clase 9	8.80
Clase 10	13.8

El patrón de tráfico para cada clase vehicular basado en valores diarios y mensuales es el mismo durante todo el año. Sin embargo, el tráfico varía en periodos de 24 horas y esta variación es la misma que los valores estándar del rendimiento a largo plazo del Pavimento (LTPP)

Después del año base, el tráfico incrementa en un 4.0% durante todo el periodo de diseño del pavimento.

La distribución de cargas por eje es idéntica a los valores estándar del LTPP para cada clase vehicular, tipo de eje, categoría de carga, y meses del año.

Asumo que la distancia promedio del neumático exterior se localiza a 18 pulgadas del borde del pavimento. La desviación estándar es de 10 pulg. El carril de diseño tiene un ancho de 12 pies.

La configuración de ejes es la siguiente:

- Ancho promedio de ejes (ft): 8,5
- Espaciamiento de neumático dual: 12 pulg

La presión de neumáticos simples y dobles es de 120 psi.

Tabla 26. Espaciamiento para ejes doble, triple y cuádruple en el Diseño de pavimento flexible.

Tipo de Eje	Espaciamiento del Eje (pulg)
Doble	51.6
Triple	49.2
Cuádruple	49.2

Clima

Se cargan los tres archivos climáticos generados para “Santa Rosa de Osos, Ant”, “Apartado, Ant” y “Sumpaz, Cund” con el objetivo de que el software prediga los gradientes de temperatura y humedad en los diseños. En mi caso, la profundidad del nivel freático general es de 6 ft.

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

Temperatura y Curado

Se anticipa que la temperatura y las condiciones de curado inducirán a un alabeo permanente equivalente a -10°F .

Capa de Concreto de Cemento Portland

La mezcla para el diseño de concreto está compuesta por cemento tipo 1, con un contenido de cemento portland de 565 lb/ yarda cubica y una proporción de agua/cemento de 0.402. El agregado utilizado para esta mezcla es granite. El coeficiente de expansión térmica es de $6.3 (10)^{-6}^{\circ}\text{F}$. La conductividad térmica es de $1.25 \text{ BTU/hr-ft-}^{\circ}\text{F}$ y la capacidad calórica es de $0.28 \text{ BTU/lb-}^{\circ}\text{F}$. El peso unitario de la mezcla es de 145 libras/ pie cubico. El coeficiente de Poisson de 0.20. Las características de contracción de la mezcla indican que la contracción reversible es de 50% de la contracción máxima tomando 35 días para alcanzar el 50% de la contracción máxima.

El concreto hidráulico que se utiliza en el pavimento presenta un Módulo de Rotura a Flexión, a los 28 días de $Sc = 4.5 \text{ Mpa} = 653 \text{ lb/pulg}^2$ (Modulo de Rotura o resistencia a la flexotracción)

$$f'c = 28 \text{ Mpa} = 4000 \text{ lb/pulg}^2$$

$Sc = 2.2 (f'c)^{0.5}$ y generalmente varía entre los siguientes valores: 4 Mpa a 5 Mpa

El espesor de la capa de concreto de cemento portland es de 9 pulgadas.

Subbase Granular

Los datos de la Subbase granular corresponden a un nivel 3. Subbase Granular con un módulo de 15000 psi, es decir, CBR 30% y un espesor de 6 pulg. El coeficiente de poisson es de 0.4. Coeficientes de Empuje lateral de 0.67

El análisis granulométrico a ser utilizado en la Base indican que en la malla No200 pasa el 13.7% y para la malla No4 el 43.8%. IP de 4 y LL de 10%.

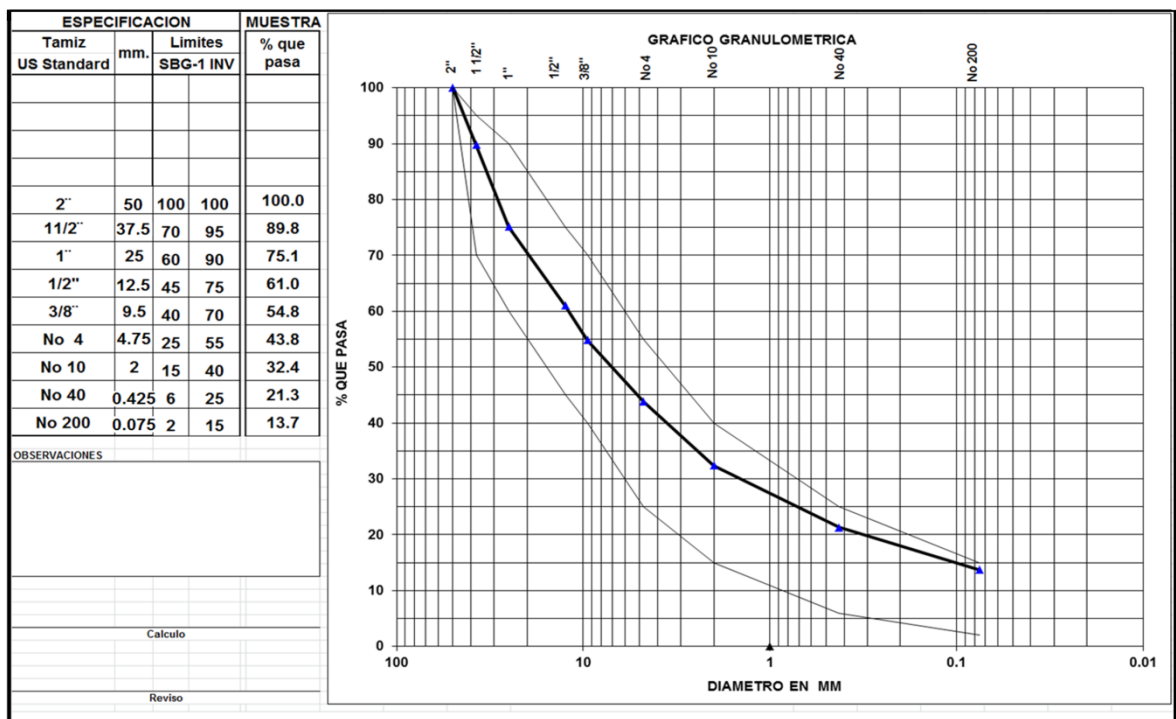


Figura 58. Curva Granulométrica Subbase Granular Pavimento Rígido.

Subrasante

La subrasante utilizada está clasificada según U.S.C como (SC) arena arcillosa y sistema AASHTO como A-2-6. El IP es de 16% y LL 37%. Los datos de la Subrasante corresponden a un nivel 3. Módulo Resiliente de 8134 psi. Las pruebas de granulometría indican que el 24.8% pasa la Malla No 200 y el 67.2% pasa la malla No 4. El D_{60} de este material es de 2.138 m. El espesor de la capa

es infinito (última capa). El coeficiente de poisson es de 0.4. Coeficientes de Empuje lateral de 0.67.

Tablas de resúmenes para el diseño con pavimento rígido y modelos climáticos.

Tabla 27. Resumen de daños y confiabilidad para el Municipio de Apartado, Antioquia – Pavimento Rígido.

Criterios de Desempeño	Daño Limite	Confiabilidad Deseada	Daño Pronost.	Confiabilidad Pronosticada	¿Aceptable?
IRI Terminal (in/mi):	158	95	103.9	92.75	No Cumple
Fisuramiento Transversal (% de losas fisuradas):	15	95	20.9	26.24	No Cumple
Escalonamiento Promedio de la Junta (pulg):	0.15	95	0.041	99.97	Cumple

Tabla 28. Resumen de daños y confiabilidad para el Municipio de Santa Rosa de Osos, Antioquia – Pavimento Rígido.

Criterios de Desempeño	Daño Limite	Confiabilidad Deseada	Daño Pronost.	Confiabilidad Pronosticada	¿Aceptable?
IRI Terminal (in/mi):	158	95	190.1	28.15	No Cumple
Fisuramiento Transversal (% de losas fisuradas):	15	95	86.8	0	No Cumple
Escalonamiento Promedio de la Junta (pulg):	0.15	95	0.097	89.94	No Cumple

Tabla 29. Resumen de daños y confiabilidad para la localidad de Sumapaz, Cundinamarca – Pavimento Rígido.

Criterios de Desempeño	Daño Limite	Confiabilidad Deseada	Daño Pronost.	Confiabilidad Pronosticada	¿Aceptable?
IRI Terminal (in/mi):	158	95	86.3	98.79	Cumple
Fisuramiento Transversal (% de losas fisuradas):	15	95	3	97.84	Cumple
Escalonamiento Promedio de la Junta (pulg):	0.15	95	0.036	99.99	Cumple

Tabla 30. Cuadro Comparativo de Parámetros de Salida – Pavimento Rígido.

Criterios de Desempeño	Daño Limite	Confiabilidad Deseada	Apartado		Santa R. O.		Sumapaz	
			Daño Pronost.	Confiabilidad Pronosticada	Daño Pronost.	Confiabilidad Pronosticada	Daño Pronost.	Confiabilidad Pronosticada
IRI Terminal (in/mi):	158	95	103.9	92.75	190.1	28.15	86.3	98.79
Fisuramiento Transversal (% de losas fisuradas):	15	95	20.9	26.24	86.8	0	3	97.84
Escalonamiento Promedio de la Junta (pulg):	0.15	95	0.041	99.97	0.097	89.94	0.036	99.99

Una vez realizados los cálculos para cada uno de los modelos climáticos en el diseño de pavimento rígido (JPCP - Concreto simple con juntas), se observa que los niveles deseados de confiabilidad junto con los niveles de daños límites al final de la vida de diseño (20 años) no fueron cumplidos tanto para el municipio de Apartado como el de Santa Rosa de Osos (Depto. Antioquia).

Para la zona de Apartadó se identifica que no se cumple con los criterios de desempeño: IRI Terminal (in/mi) y Fisuramiento Transversal (% de losas fisuradas, es decir, estos dos tipos de fallas son más sensibles al comportamiento climático de este lugar.

En Santa Rosa de Osos, dadas las condiciones iniciales de diseño no se cumple con ninguno de los tres criterios de estudio, es decir, esta zona es más sensible a los efectos climáticos que las demás.

En la localidad de Sumapaz (Cundinamarca), al igual que en el diseño del pavimento flexible se cumple con cada uno de los criterios de desempeño tanto para la confiabilidad deseada como para los daños límites.

Cabe aclarar que las propiedades del concreto tales como resistencia a la flexión y módulos no son significativamente afectados por cambios de temperaturas normales. Sin embargo, la temperatura y gradientes de humedad sobre todo en la parte superior del concreto de cemento portland pueden afectar significativamente las tensiones, deformaciones y por consiguiente crear daños en el pavimento.

Análisis Apartadó

La falta de un buen IRI en este sitio se ve asociado al comportamiento de la sub-rasante cuando entra en contacto con condiciones climáticas como la humedad, causando así expansiones y contracciones en la fundación de la estructura de pavimento. La forma de construcción es otro aspecto relevante, puesto que si en esta zona en el momento de erigir no se realiza la pavimentación durante las mañanas de días calurosos y soleados, se tiende a exponer las losas

PCC recién pavimentadas a una diferencia de temperatura positiva (alabeo de forma convexo) por parte de la intensa radiación solar intensa, más el calor de hidratación.

Las molestias para el usuario, se evidencian en las salidas a partir de los 18.75 años utilizando el 95% de confiabilidad, aumentando así los viajes y costos de operación vehicular (ver figura 59).

El fisuramiento transversal formado en esta zona se presenta principalmente por el tráfico de 8 millones de ESAL a los 9.54 años utilizando el 95% de confiabilidad y a los 17 años para porcentaje de losas fisuradas (ver figura 61), que junto con dilataciones térmicas ocasionan daño por fatiga en la parte superior de la losa y por último fisuras transversales.

Figura 59. IRI TERMINAL (pulg/mi) – pavimento rígido – Apartadó.

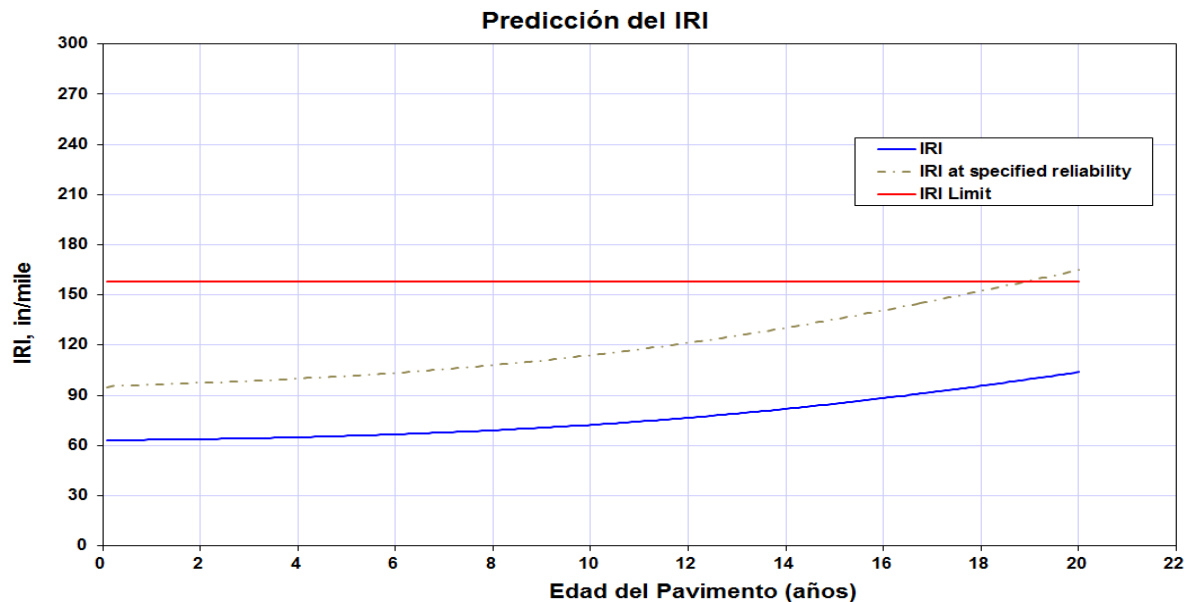


Figura 60. ESCALONAMIENTO PROMEDIO DE JUNTAS (in) – pavimento rígido – Apartadó.

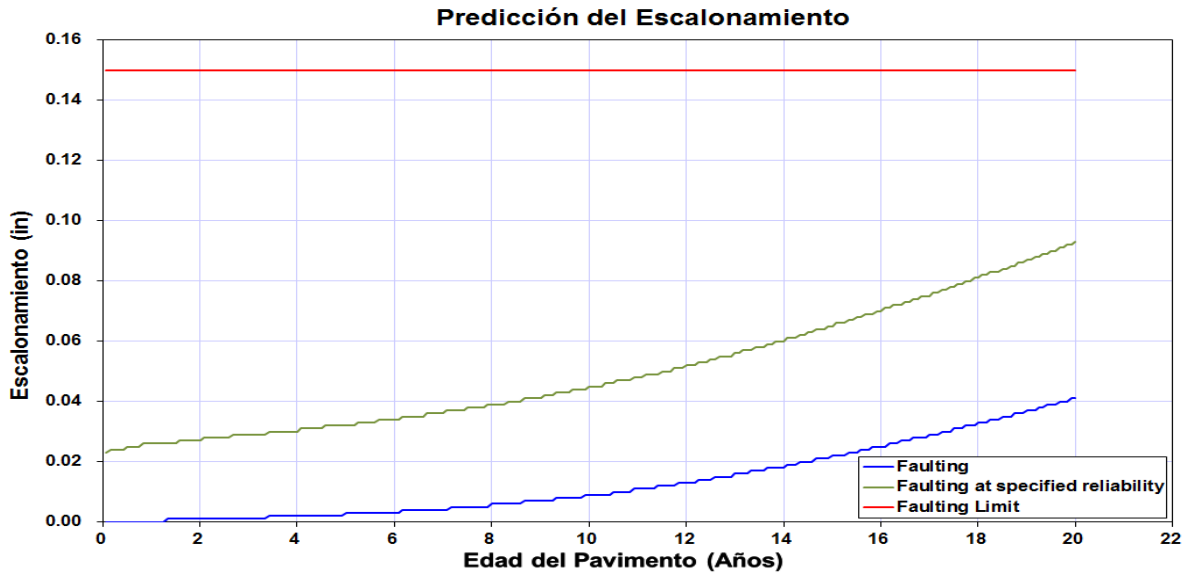
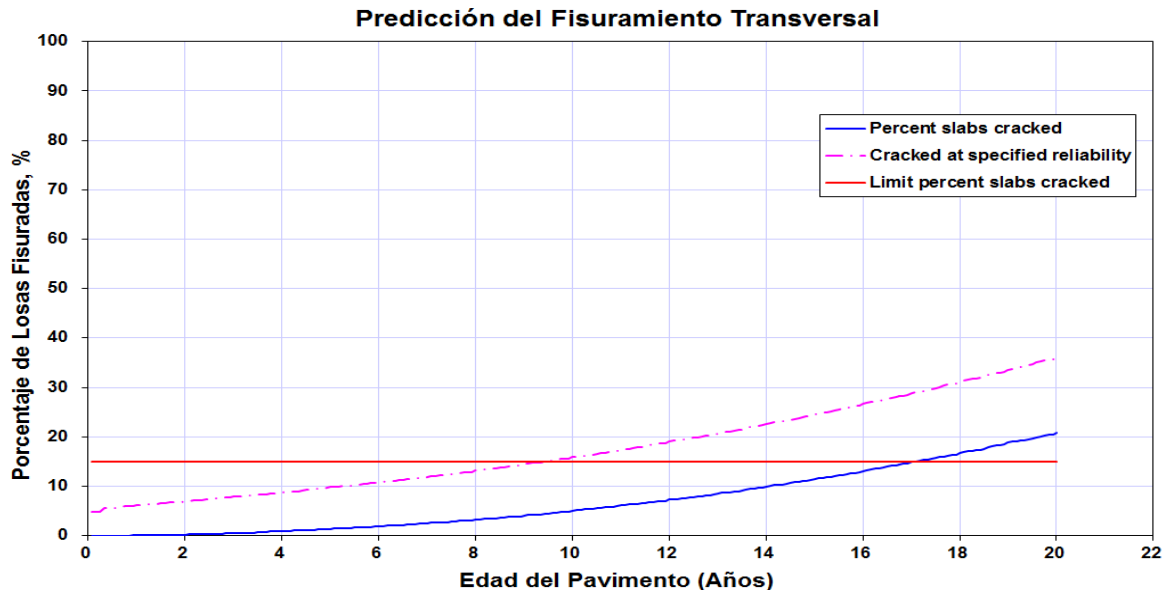


Figura 61. FISURAMIENTO DE LOSAS (%) – pavimento rígido – Apartadó.



Análisis Santa Rosa de Osos

El IRI y la fisuración transversal exhibida en este municipio, se asocia para el caso de la regularidad superficial a las bajas temperaturas de este lugar, causando que

la parte superior de la losa de PCC sea típicamente más fría que la parte inferior (diferencia negativa de temperatura - curvatura cóncava de la losa) y para la fisuración transversal con la carga de tráfico que aumenta la tensión de tracción en la parte superior y conduce así a la iniciación de fisuras de fatiga.

El IRI en esta zona se presenta a los 7.5 años de haberse dado al medio para una confiabilidad del 95% y 15 años para el IRI base (ver figura 62).

El fisuramiento transversal se evidencio a los 4 años, es decir, mucho más rápido que los demás daños (ver figura 63).

La aparición de escalonamiento sobre la estructura de pavimento en cambio surge como resultado de una combinación del tráfico aplicado, falta de pasadores y alabeo por diferencia negativa de temperaturas.

La falla por escalonamiento se exhibe finalizando la vida útil de diseño, aproximadamente a los 18.4 años para el 95% de confiabilidad (ver figura 64).

Figura 62. IRI TERMINAL (pulg/mi) – pavimento rígido – Santa Rosa de O.

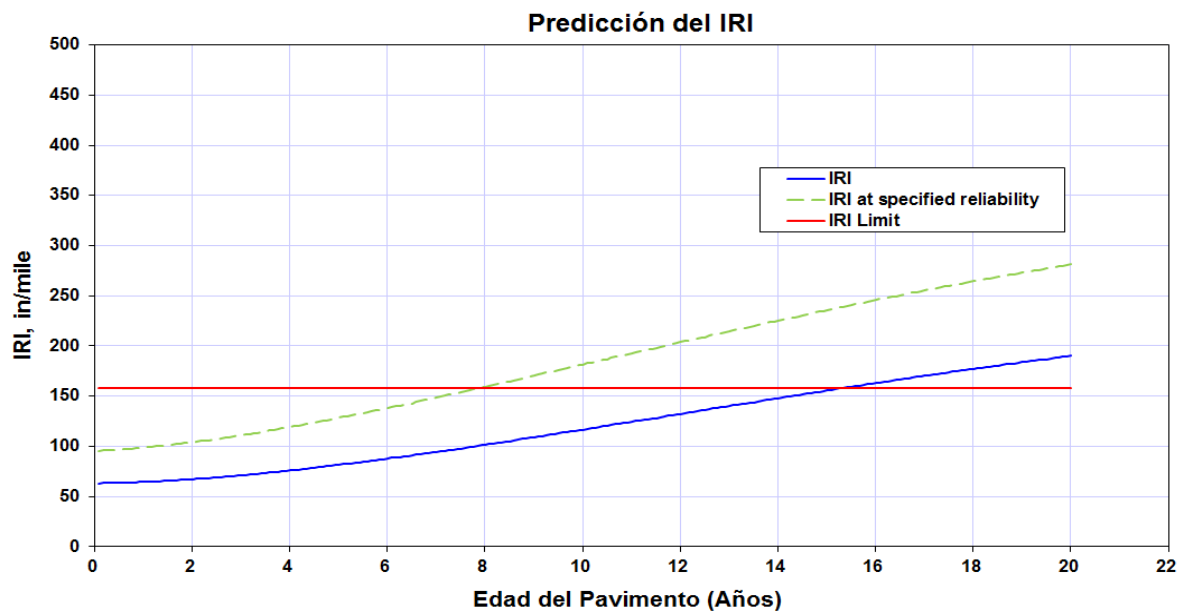


Figura 63. FISURAMIENTO DE LOSAS (%) – pavimento rígido – Santa Rosa de O.

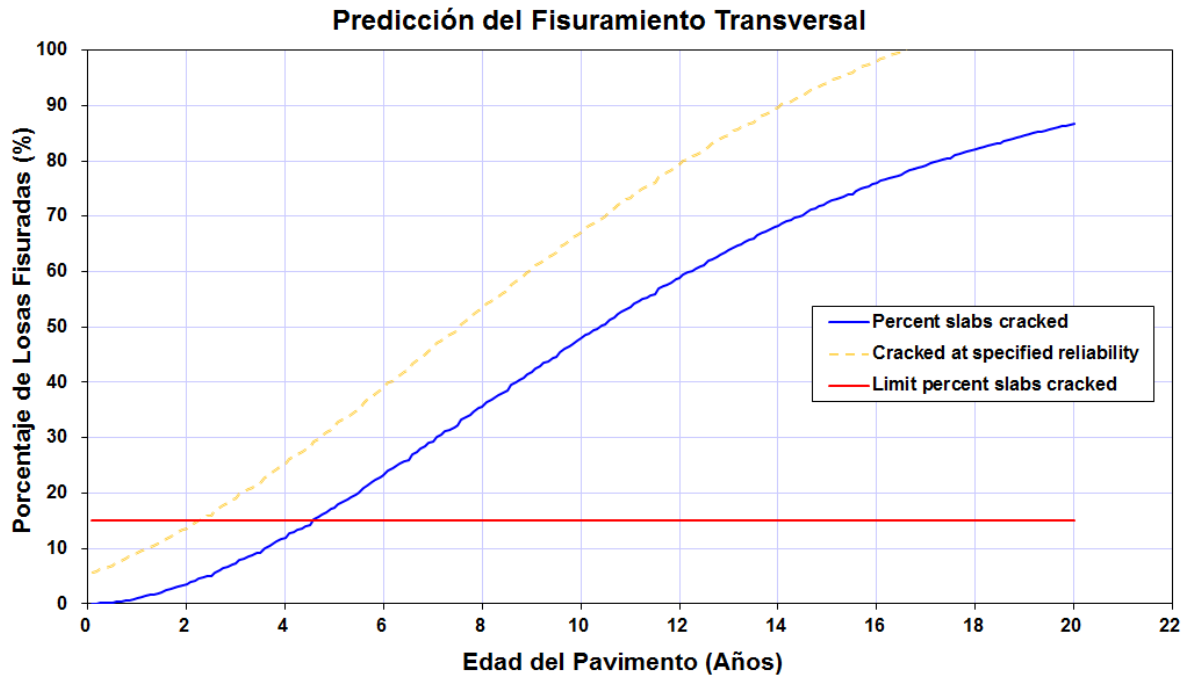
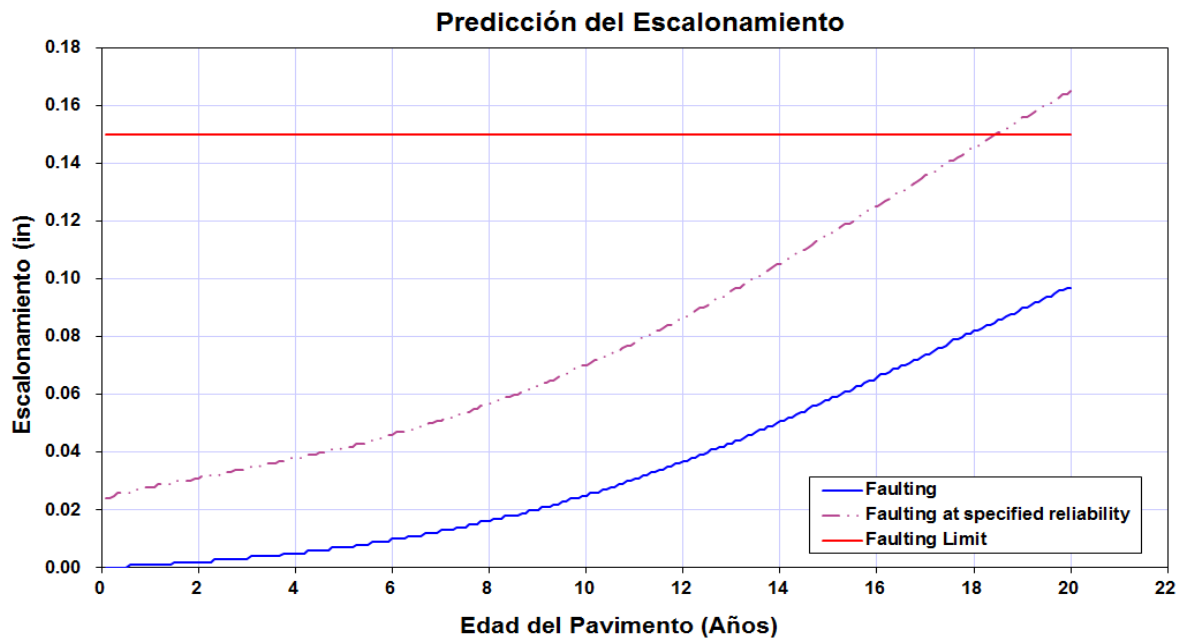


Figura 64. ESCALONAMIENTO PROMEDIO DE JUNTAS (in) – pavimento rígido – Santa Rosa de O.



Para que los parámetros de IRI, escalonamiento promedio de juntas y fisuramiento de losas cumplan tanto en Apartadó como en Santa Rosa de Osos, se requiere criterios menos rigurosos de regularidad superficial, incremento del espesor y la resistencia de la losa y reducción del ancho de la junta durante el periodo de análisis.

Análisis Sumapaz

El cumplimiento de todos los parámetros para la localidad de sumapaz al igual que en el pavimento flexible se ve ligado a las bajas temperaturas que densifican el suelo de fundación o de soporte y consigo la estructura de pavimento, es decir, a estas temperaturas el suelo y el módulo de rotura se elevan y consigo la rigidez. Lo anterior se evidencia en las siguientes figuras:

Figura 65. IRI TERMINAL (pulg/mi) - pavimento rígido – Sumapaz.

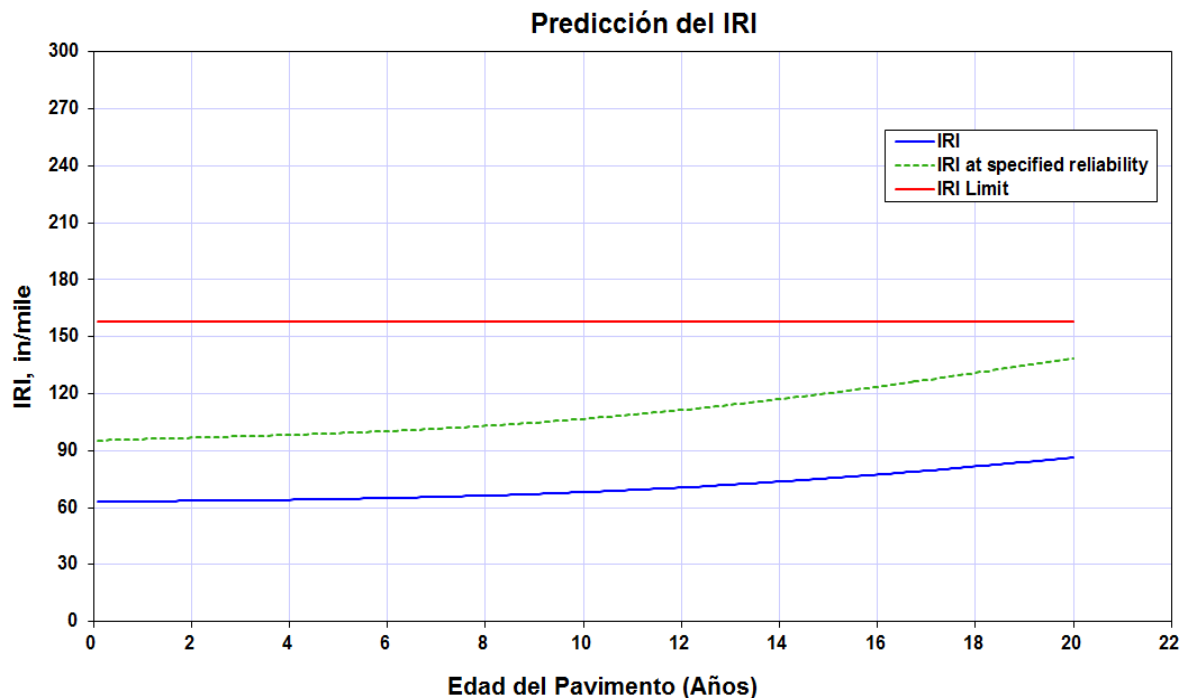


Figura 66. ESCALONAMIENTO PROMEDIO DE JUNTAS (in) - pavimento rígido – Sumapaz.

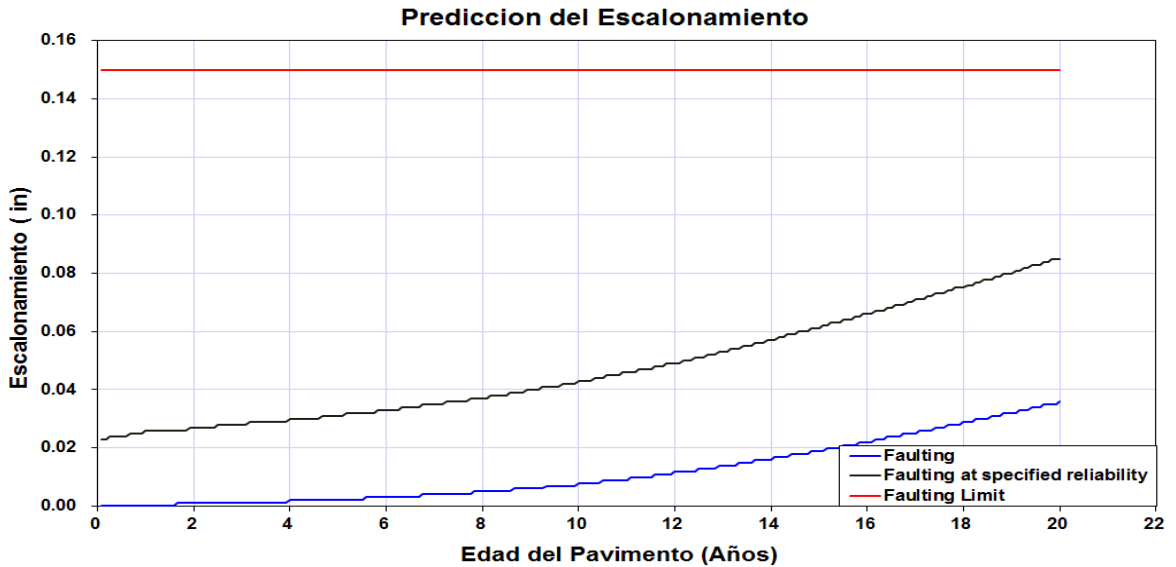
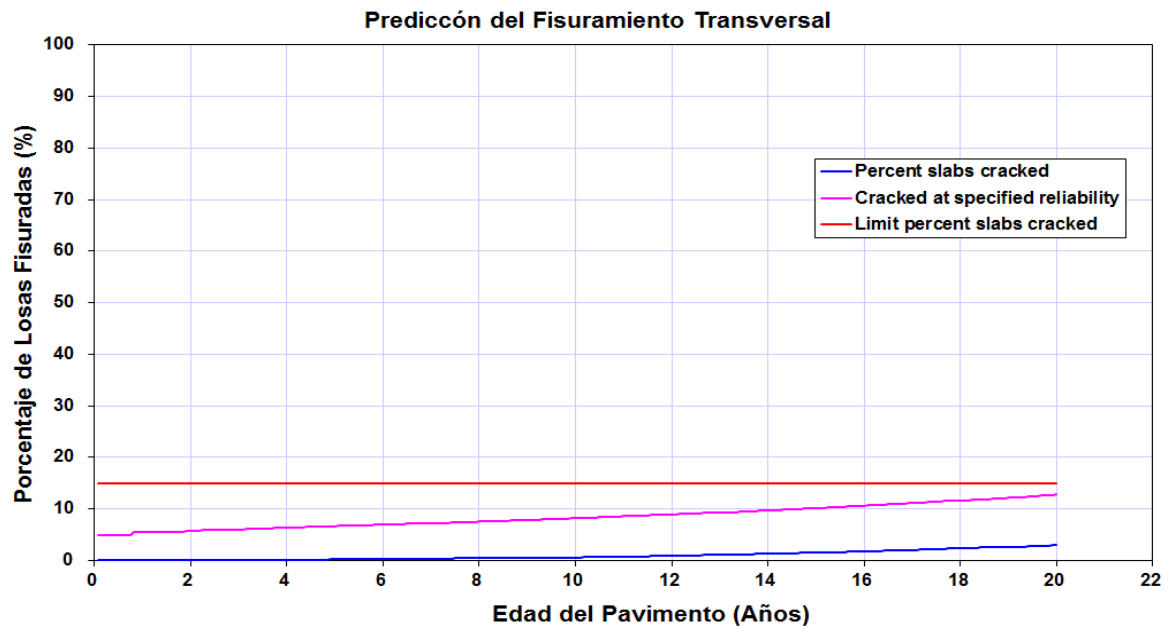


Figura 67. FISURAMIENTO DE LOSAS (%) - pavimento rígido – Sumapaz.



Para generar que los diseños anteriores cumplan en su totalidad basta utilizar un pavimento reforzado que contenga acero de refuerzo y dovelas (pasajuntas) para la transmisión de carga en las juntas.

O también en la guía de diseño Mecanístico – Empírico de pavimentos se exponen todos los cambios que se pueden realizar en el diseño prueba para satisfacer los criterios de desempeño ^[28].

Para los daños por IRI Terminal, Fisuramiento Transversal y Escalonamiento Promedio de la Junta se presentan las soluciones que se pueden emplear para garantizar así el cumplimiento de todos los criterios de desempeño, así:

Tabla 31. Pautas para modificar el diseño prueba de JPCP para satisfacer los criterios de desempeño en Pavimento Rígido.

Criterios de desempeño	Cambios para satisfacer el diseño Prueba
IRI Terminal	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de criterios menos rigurosos de regularidad superficial y mayores incentivos (construyendo el pavimento más regular al inicio).
Fisuramiento Transversal	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementar el espesor de la losa. • Incrementar la resistencia del PCC. • Minimizar el alabeo a través de procedimientos de curado que eliminan gradientes de temperatura durante la construcción. • Losa ensanchada (1 a 2 pies) • Usar concreto de cemento portland con un coeficiente de expansión térmica más bajo.
Escalonamiento Promedio de la Junta	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementar el espesor de la losa. • Reducir el ancho de la junta durante el periodo de análisis. • Incrementar la resistencia a la erosión de la base. • Minimizar el alabeo a través de procedimientos de curado que eliminan gradientes de temperatura durante la construcción. • Losa ensanchada (1 a 2 pies)

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Después de cumplir con los objetivos que inicialmente se plantearon en este proyecto, se exhiben las siguientes conclusiones:

- El modelo climático incluido en el diseño Mecanístico – Empírico es de vital importancia para llevar a cabo una mejor predicción del comportamiento que exhiben las estructuras de pavimentos a lo largo de toda la vida de diseño.

En los pasados métodos de diseño de pavimentos se asume generalmente que el clima es estático y no presenta variación en el tiempo. No tener en cuenta esta variabilidad genera que las estructuras en ocasiones fallen de forma prematura. En el diseño ME estas fallas son disminuidas utilizando los criterios de desempeño y confiabilidad, asegurando así que los diseños de pavimentos se desempeñen de manera satisfactoria durante la vida útil.

- El estudio de todos los factores que se incluyen dentro del modelo climático junto a los diseños realizados claramente manifiestan que las variables climáticas más importantes dentro del modelo son temperatura y precipitación, haciendo que parámetros como la velocidad del viento, nubosidad profundidad del nivel freático, humedad relativa desempeñen un papel complementario dentro del modelo.

- Los criterios de desempeño y confiabilidad utilizados dentro de un diseño en particular dependen en gran medida del ingeniero diseñador y la magnitud del proyecto, por lo tanto cada diseño puede llegar a lucir valores de umbrales diferentes que están ligados en ocasiones a temas económicos, políticas de gestión, necesidades locales y experiencias.
- Los diseños de pavimentos flexibles y rígidos realizados en esta investigación con el software MEDPG, mostraron que los sitios que presentan afectación por el comportamiento climático son primeramente Santa Rosa de osos con piso térmico frío seguido del municipio de Apartadó con piso térmico cálido. En la localidad de Sumapaz los diseños plasmados cumplieron con la totalidad de los criterios.
- En los diseños realizados en esta investigación se obtuvo que las fallas predominantes en el municipio de Santa Rosa de Osos y Apartadó en el caso del pavimento flexible fueron el ahuellamiento y la fisuramiento longitudinal. En el diseño con pavimento rígido JPCP las fallas presentes en estos dos municipios fueron fisuramiento transversal e IRI, además de escalonamiento promedio de juntas en Santa rosa de Osos. La aparición de estas fallas en forma prematura hacen indispensable la corrección de estos diseños en forma interactiva en aras a obtener una estructura de pavimento definitiva basada en la economía y confiabilidad.
- Para hacer que los diseños en la zonas de Apartadó y Santa Rosa de Osos, donde se emplea pavimento rígido y se exhiben daños por IRI, escalonamiento promedio de juntas y fisuramiento de losas cumplan, basta con aplicar criterios menos rigurosos de regularidad superficial, incrementar el espesor y la resistencia de la losa y reducir el ancho de la junta durante el periodo de análisis.

- En el diseño con pavimento flexible, para llevar acabo el cumplimiento de los parámetros (fisuramiento longitudinal y deformación permanente) tanto en Apartadó como en Santa Rosa de Osos, se puede reducir el contenido de asfalto de la mezcla asfáltica, incrementar el módulo dinámico de la mezcla, reducir el módulo dinámico e incrementar el espesor de la capa asfáltica.
- Para obtener mejores resultados en los diseños de estructuras de pavimentos, el modelo climático incorporado dentro de la guía Mecánico – Empírica requiere de mediciones in situ de la profundidad promedio del nivel freático con el objeto de predecir más exactamente el comportamiento del suelo de subrasante de un proyecto en específico.
- Los diseños de pavimentos (flexible y rígido) se realizaron variando solamente las condiciones climáticas para tres pisos térmicos. Aunque el software constituye una herramienta avanzada para el diseño de estructuras de pavimentos, cabe destacar que este arrojó resultados inconsistentes como es el caso del valor de ahuellamiento presentado en el pavimento flexible de Santa Rosa de Osos (clima frío), donde se espera que este valor sea inferior al exhibido en el municipio de Apartadó por presentar un clima cálido. El asumir valores puede conllevar a recrear condiciones inusuales o poco probables que terminan dando como resultado comportamientos inusuales como el presentado en los ejemplos desarrollados en el proyecto. Cabe mencionar que en éstos fue asumido el nivel freático a una profundidad tal que afecta directamente la estabilidad del pavimento.
- Aunque este proyecto constituye una referencia para generar mejores diseños de estructuras de pavimentos y posteriores calibraciones climáticas, hay puntos de interés que el instituto meteorológico de nuestro país (IDEAM) merece la pena evaluar un poco más a fondo. En primer lugar, al no tener las estaciones climatológicas disponibles todos los factores que se incluyen dentro

del modelo de forma horaria como temperatura, precipitación y profundidad del nivel freático esto se convierte en una gran limitante para llevar a cabo una calibración precisa, haciendo de esto un trabajo más extenso debido a los patrones de ajuste. Luego, el costo de esta información es supremamente alto, haciendo imposible una calibración de varios años por parte de una persona natural.

- Generar una adaptación completa de la guía de diseño Mecánico - Empírico en Colombia cambiaría indudablemente la tendencia con la que hemos llevado a cabo los diseños de los pavimentos en nuestro país. Esto permite en últimas que las estructuras cumplan en cierto grado de seguridad con la vida útil para la cuales son diseñadas. Para facilitar el acople de esta guía en nuestro país tienen que verse involucrados los entes gubernamentales encargados de preservar nuestro sistema vial.
- Para el desarrollo de este proyecto de maestría requerí de un gran esfuerzo, de modo que se llevaran a cabo y en feliz término todos los objetivos plateados.

6.2. RECOMENDACIONES

- Es indispensable promover el diseño Mecánico – Empírico de pavimentos a lo largo del país en aras a obtener una calibración y adaptación local de los parámetros incluidos dentro de este, y de esta forma conocer en ciencia cierta el comportamiento de las estructuras a lo largo de toda la vida útil.
- Llevar a cabo la calibración del modelo climático para otros sitios necesita de por lo mínimo una base de datos horarios con dos años información, evitando

así que los resultados dentro un diseño en particular representen valores atípicos.

- Los modelos climáticos generados en este proyecto pueden ser utilizados en los lugares donde haya similitud en aspectos como la altitud, precipitación y temperatura que presentan las zonas de estudio.
- Para posteriores investigaciones establecer relaciones entre el clima y parámetros como la precipitación y temperatura con los modelos de deterioro, los criterios de desempeño y su influencia dentro del comportamiento estructural y funcional de los pavimentos.
- En climas donde hay presencia de bajas temperaturas y alta fatiga se recomienda la utilización de mezcla asfáltica modificadas con polímeros para disminuir el fisuramiento por efecto térmico y finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas. Para altas temperaturas basta con utilizar un asfalto con penetración 60/70 y un bajo contenido de asfalto para obtener una elevada resistencia a la deformación plástica.
- En posteriores investigaciones automatizar el proceso de ordenamiento que requiere la generación de los archivos climáticos .icm, para así evitar el empleo de innumerables horas cuando estos se crean de forma manual.
- Generar una base de datos con todos los archivos climáticos que se generen en el futuro teniendo en cuenta las regiones naturales presentes en nuestro país.

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFIA

- [1] HUANG, Yang. (2004). Pavement Analysis and Design. Second Edition.
- [2] ARIZONA AND TEXAS PAVEMENT DESIGN ON EXPANSIVE SUBGRADE SOIL: A COMPARISON. ARIZONA STATE UNIVERSITY. THESIS; Claudia E. Zapata, Chair, Sandra L. Houston, Edward Kavazanjian Y Mohamed El-Basyouny, 2009 Pag 98.
- [3] DESIGN AND CONSTRUCTION GUIDELINES FOR THERMALLY INSULATED CONCRETE PAVEMENTS. TASK; Luke Johanneck, Derek Tompkins y Lev Khazanovich 2010. Pag 59.
- [4] ATLAS CLIMATOLÓGICO NACIONAL. Part I “Aspectos Nacionales” Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. Pag 18
- [5] MODELO NUMÉRICO PARA ANALIZAR EL EFECTO DEL CLIMA EN PAVIMENTOS. Universidad de los andes; Silvia Caro Spinel*; Cristina García Aragón **; Bernardo Caicedo Hormaza. Paper.. Pag 7.
- [6] Visión general sobre la nueva guía de diseño mecanicista AASHTO-ME y los modelos de deterioro para pavimentos flexibles. Roberto Hernández, Paul Garnica, Ricardo Solorio. Paper pag 11.

- [7] THE EFFECT OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON THE IMPLEMENTATION OF THE MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE (MEPDG); George Abraham Dzotepe Graduate Research Assistant Department of Civil and Architectural Engineering University of Wyoming, July 2011. Pag 191.
- [8] MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE IMPLEMENTATION. University of South Carolina. R. L. Baus and N. R. Stires. Submitted to The South Carolina Department of Transportation and The Federal Highway Administration. June 2010. Report No. GT006-10 Pag 109
- [9] Implementation of the MEPDG for Flexible Pavements in Idaho. National Institute for Advanced Transportation Technology University of Idaho. Author(s) Fouad Bayomy, Sherif El-Badawy, and Ahmed Awed. Report Date October 2011 Pag 294
- [10] Visión general sobre la nueva guía de diseño mecanicista AASHTO-ME y los modelos de deterioro para pavimentos flexibles. Roberto Hernández, Paul Garnica, Ricardo Solorio. Paper pag 11
- [11] Quintero, Natalia M. Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model (EICM) for the Ohio SHRP Test Road at U.S. 23. Tesis (Master of Science). Athens, OH. U.S.A. Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, November 2007.
- [12] Guide for Mechanistic- Empirical Design. "OF NEW AND REHABILITATED PAVEMENT STRUCTURES". PART 2. DESIGN INPUTS. FINAL REPORT NCHRP. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM TRANSPORTATION RESEARCH BOARD NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 2004 PAG 50.

- [13] Ullidtz, P., *Pavement analysis*. Elsevier Science Publishers, 1987.
- [14] Bradbury, R.D., *Reinforced Concrete Pavements*. Wire Reinforcement Institute. Washington D.C., 1913.
- [15] Mamlouk, M., *The Handbook of Highway Engineering*. Taylor and Francis Group, 2006.
- [16] Ministere del'Equipment et du Logement, *Catalogue de Structures Types de Chaussees, Direction des Routes et de la Circulation Routiere*. SETRA, LCPC Paris, 197
- [17] Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Principios fundamentales, el tránsito, factores climáticos y geotecnia vial. Volumen I. Carlos Hernando Higuera Sandoval. Uptc. Tunja 2011. Pag 279.
- [18] Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito Bogotá D.C..1998.
- [19] Ingeniería de pavimentos. Fundamentos, estudios básicos y diseño. Alfonso Montejo y Fonseca. Universidad Católica de Colombia. Pag 612
- [20] Yoder, E.J. and Witczak, M.W., *Principles of Pavement Design*. Second Edition, John Wiley & Sons, USA, 1975.
- [21] Road Note 29, *A Guide to Structural Design of Pavements for New Roads*. Third Edition, TRRL, Department of the Environment, London, 1978.

- [22] INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY. THE COLLABORATIVE HISTORICAL AFRICAN RAINFALL MODEL: DESCRIPTION AND EVALUATION. CHRIS FUNK, JOEL MICHAELSEN, JIM VERDIN, GULEID ARTAN, GREG HUSAK, GABRIEL SENAY, HUSSEIN GADAIN and TAMUKA MAGADAZIRE. Recibido el 23 July 2001, Revisado 4 September 2002 y Aceptado el 4 September 2002. Pag 20.
- [23] Barker, W.R., Brabstone, W.N. and Chou, Y.T. *A general System for the Structural Design of Flexible Pavements*. 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor, 1977.
- [24] Wilson, G.W., *Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems*. Ph.D. dissertation, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1990.
- [25] Federal Highway Administration *Geotechnical Aspects of Pavements Reference Manual/ Participants Workbook*. Publication No. FHWA NHI-05-037, May 2006.
- [26] European Union, *Service Procurement Notice: Updating of Road Design Manuals-Kenya* Web document Retrieved from European Commission Website, URL: [www:cc:cec=EUROPEAID=contn/](http://www.cc:cec=EUROPEAID=contn/), (lastvisited on 14th, September 2009)
- [27] Montana Department of Transportation, *Research Programs Newsletter, Summer 2007 Review*. Montana Department of Transportation, Montana, USA, 2007.

- [28] Guía de diseño Mecanístico – Empírico de Pavimentos – Manual Práctico. American Association of State Highway and Transportation Officials, Traducido: July 2008 Interim Edition, 204 pag.
- [29] MODELING MECHANISTIC-EMPIRICAL ROAD DESIGN: THE CASE FOR KENYAN ROADS. By Nyakiti Samson Agia. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of the degree of Master of Science in Pure Mathematics Faculty of Science “Maseno University”
- [30] Carvalho, R.L., Mechanistic-Empirical Design Of Flexible Pavements: A Sensitivity Study. Masters Thesis, University of Maryland,USA, 2006.
- [31] Evaluación y caracterización del deterioro de estructuras de pavimentos bituminosos con capas de base granular tratada con cemento propuestas en el manual del Instituto Nacional de Vías, a través de método Mecanístico-Empírico. Berenice Garces Gelvez. Universidad industrial de Santander facultad de ingenierías físico-mecánicas escuela de ingeniería civil Bucaramanga, 2011. Pag 206.
- [32] Guía Metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de Pavimentos asfálticos de carreteras – INVIAS “Etapa 3 – Establecimiento de la condición del pavimento”. Bogotá DC, 2012.
- [33] Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras “instructivo para la inspección visual y la evaluación de los deterioros de los pavimentos asfálticos de carreteras, segunda edición – 2008 Invias.
- [34] Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras convenio interadministrativo 0587 – 03 “Manual para la inspección

visual de pavimentos flexibles y rígidos octubre de 2006 Bogotá d.c.” – INVIAS.

- [35] Quintus, H.L. and Moulthrop, J.S., Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Flexible Pavement Performance Prediction Models for Montana Volume II Reference Manual, Montana Department of Transportation, Montana, 2007.

- [36] CURSO BÁSICO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS - FERNANDO SANCHEZ SABOGAL Ingeniero Civil.

- [37] Diseño de Pavimentos Rígidos. Carlos Arrate L. Natalia Sierra H. Álvaro Solar D. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile

- [38] Larson, G., and B. J. Dempsey. *Enhanced Integrated Climatic Model. Version 2.0, Final Report.* Contract DTFA MN/DOT 72114. Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1997.

- [39] Design and construction guidelines for thermally insulated concrete pavements. Tpf-5(149). Mndot contract no. 89261. Prepared by: luke johanneck, derek tompkins, lev khazanovich. November 2010

- [40] Developing MEPDG Climate Data Input Files for Mississippi. Final Report FHWA/MS-DOT-RD-11-232. Michael Heitzman and David Timm. Pag 43.

- [41] ENVIRONMENTAL EFFECTS IN PAVEMENT MIX AND STRUCTURAL DESIGN SYSTEMS CALIBRATION AND VALIDATION OF THE ICM VERSION 2.6. PRELIMINARY DRAFT FINAL REPORT PART 2. Prepared

for National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Research Council. Pag 370.

- [42] Design moisture condition guidelines for pavement design and material assessment October 2010. Dr Haran Arampamoorthy John Patrick Opus International Consultants, Central Laboratories, Lower Hutt, New Zealand NZ Transport Agency research report 424. Pag 38.
- [43] The Implications of Climate Change on Pavement Performance and Design By Qiang Li, Leslie Mills and Sue McNeil *A report submitted to the University of Delaware University Transportation Center (UD-UTC)* September 25, 2011
- [44] NCHRP 602 Calibration and Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model for Pavement Design. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. Pag 73.
- [45] Atlas Climatológico de Colombia. IDEAM. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales República de Colombia
- [46] Atlas de Radiación Solar de Colombia. República de Colombia Ministerio de Minas y Energía. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA UPME. República de Colombia Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIO AMBIENTALES “IDEAM”
- [47] Witczak, M. W., Zapata, C.E., and Houston, W.N., Models Incorporated Into The Current Enhanced Integrated Climatic Model NCHRP 9-23 Project Findings and Additional Changes After Version 0.7, Inter Team Technical Report. Arizona State University, 2006.

- [48] Li, D. and Selig, E.T., *Resilient Modulus for Fine Grained Subgrade Soils*. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 6. June 1994.
- [49] Liang, R.Y., Rababah, S. and Khasawneh, M., *Predicting Moisture Dependent Resilient Modulus of Cohesive Soils Using Soil Suction Concept*. Journal Of Transportation Engineering, Vol. 131, No. 1 ASCE, January 2008.
- [50] Dally, J.W. and Riley, W.F. *Experimental Stress Analysis*. College House Enterprises. Knoxville, TN., 2005.
- [51] Collop, A.C. and Cebon, D. *A Model of Whole-Life Flexible Pavement Performance*. 7th International Conference on Asphalt Pavements. Nottingham, UK. 1992.
- [52] Yavuzturk, C. and Ksaibati, K., *Assessment Of Temperature Fluctuations In Asphalt Pavements Due To Thermal Environmental Conditions Using A Two-Dimensional, Transient Finite Difference Approach*. Mountain-Plains Consortium, 2002.
- [53] El-Basyouny, M. and Jeong, M.G., *Effective Temperature for Analysis of Permanent Deformation and Fatigue Distress on Asphalt Mixtures*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2127, Washington, D.C. 2009.
- [54] Witczak, M. W., *Effective Temperature Analysis for Permanent Deformation of Asphaltic Mixtures*. A-001 MIDAS Study, September 1992.
- [55] Koppen Climate Classification, on Wikipedia, URL:
http://en.wikipedia.org/wiki/Koppen_climate_classification#mw-head,
(last visited on 17th, May 2010).

[56] Patel, M.R., *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1999.