

TABLA DE CONTENIDO

1.	INFORMACIÓN BÁSICA DEL CONTRATO	1
1.1.	OBJETIVO GENERAL	1
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.3.	PLAZO DEL CONTRATO	2
1.4.	FECHA DE INICIACIÓN	2
1.5.	FECHA DE TERMINACIÓN.....	2
1.6.	VALOR DEL CONTRATO.....	2
1.7.	AJUSTES.....	2
2.	ALCANCE DE LOS TRABAJOS	3
2.1.	VERIFICACION Y RECOMENDACIONES DE LA METODOLOGIA DE CALIBRACION.....	3
2.1.1.	Clasificación de elementos viales de acuerdo a las familias de deterioro típicas	3
2.1.2.	Estimación de la edad de los pavimentos	9
2.1.3.	Tamaño de la muestra.....	11
2.1.4.	Estimación de la capacidad estructural del pavimento.....	12
2.1.5.	Análisis del volumen y composición vehicular de las pistas de calibración.....	18
2.1.6.	Implementación de las curvas de deterioro del Sistema HDM 4.....	19
2.2.	METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE CURVAS DE DETERIORO EN PAVIMENTOS ADOQUINADOS.....	20
2.3.	CLASIFICACION DE LOS ELEMENTOS VIALES DE ACUERDO A LAS FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO	20
2.3.1.	Clasificación en familias “típicas” de deterioro	21
2.4.	ESTIMACIÓN DE LA EDAD DE LOS PAVIMENTOS.....	43
2.5.	DEFINICION DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA	51
2.6.	DEFINICION DE LA MUESTRA DE ELEMENTOS VIALES QUE SERVIRAN COMO PISTAS	52
2.7.	TRABAJO DE CAMPO.....	55
2.8.	PROCEDIMIENTOS PARA LA TOMA DE INFORMACION EN CAMPO	62
2.8.1.	Levantamiento de Daños Superficiales.....	62
2.8.1.1.	Descripción de los daños a evaluar en los Pavimentos Flexibles, y Severidades	63
2.8.1.2.	Descripción de los daños a evaluar en los Pavimentos Rígidos, y Severidades	67
2.8.1.3.	Descripción de los daños a evaluar en los Pavimentos Adoquinados, y Severidades ...	71
2.8.1.4.	Georreferenciación de daños.....	76
2.8.1.5.	Equipos a Emplear.....	77
2.8.2.	Medicionaes Deflectométricas	82
2.8.3.	Determinación de espesores mediante apiques y sondeos	86
2.8.4.	Conteos de tránsito.....	90
2.8.5.	Validación de la Información	94
2.9.	RESULTADOS DE LOS TRABAJOS.....	94

2.9.1. Cálculo del Modified Distress Rating – MDR (Metodología PAVER)	94
2.9.2. Cálculo del SN para Pavimento Flexible	99
2.9.3. Cálculo del Dol para Pavimento Rígido.....	100
2.9.4. Asignación del TPD	103
2.9.5. Determinación del CBR	104
2.9.6. Clasificación en familias “típicas” de los elementos analizados	105
2.10. PLAN DE ASEGURAMIENTO DE CALIDAD	108
2.11. PLAN DE TRABAJO PROPUESTO PARA LAS FASES SUBSIGUIENTES DEL PROYECTO.....	108
2.11.1. Trabajos desarrollados en las dos primeras fases del proyecto.....	108
2.11.1.1. Trabajos desarrollados en la Fase I	108
2.11.1.2. Trabajos desarrollados en la Fase II.....	114
2.11.2. Modelos de deterioro implementados en el nuevo Sistema de Gestión Vial y de Espacio Público que actualmente viene ejecutando el IDU.....	116
2.11.3. Alcance del Plan de Trabajo propuesto para las Fases posteriores del proyecto	118
2.11.3.1. Desarrollo de una etapa previa de análisis	118
2.11.3.2. Complementación de los trabajos aplazados en el desarrollo de la Fase II.....	119
2.11.3.3. Medida periódica de las variables susceptibles de deterioro.....	120
2.11.3.4. Análisis y seguimiento a los resultados obtenidos en las medidas periódicas	121
2.11.3.5. Estimación de las variables para la aplicación y calibración de los modelos de deterioro del Sistema HDM 4.....	122
2.11.3.6. Modelos de deterioro en pavimentos flexibles.....	122
2.11.3.7. Modelos de deterioro en pavimentos rígidos.....	128
2.11.4. Plan de aseguramiento de la calidad	132
2.11.5. Seguimiento y control a las obras de mantenimiento y rehabilitación ejecutadas sobre las pistas de calibración definidas en la presente Fase y las Fases posteriores	132
2.12. PROGRAMA DE TRABAJO	133

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DE ROHDE PARA DIFERENTES TIPOS DE SUPERFICIES.....	14
TABLA 2. FACTORES DE AJUSTE PARA EL CÁLCULO DEL ESPESOR DE LOSA EFECTIVO POR RANGOS DE MDR.....	17
TABLA 3. LISTADO DE CONTRATOS RELACIONADOS EN LA TABLA CONDICIÓN_TRÁNSITO DE LA BASE DE DATOS.....	22
TABLA 4. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS VIALES SEGÚN FAMILIAS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES EN BOGOTÁ D.C. DE ACUERDO CON LA BASE DE DATOS NORMALIZADA.....	24
TABLA 5. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS VIALES SEGÚN FAMILIAS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS EN BOGOTÁ D.C. DE ACUERDO CON LA BASE DE DATOS NORMALIZADA.....	25
TABLA 6. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS VIALES SEGÚN FAMILIAS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES DE TRANSMILENIO EN BOGOTÁ D.C. DE ACUERDO CON LA BASE DE DATOS NORMALIZADA.....	26
TABLA 7. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS VIALES SEGÚN FAMILIAS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRANSMILENIO EN BOGOTÁ D.C. DE ACUERDO CON LA BASE DE DATOS NORMALIZADA.....	27
TABLA 8. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS VIALES SEGÚN FAMILIAS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES EN BOGOTÁ D.C.....	28
TABLA 9. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS VIALES SEGÚN FAMILIAS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS EN BOGOTÁ D.C.....	29
TABLA 10. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS VIALES SEGÚN FAMILIAS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES DE TRANSMILENIO EN BOGOTÁ D.C.....	30
TABLA 11. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS VIALES SEGÚN FAMILIAS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRANSMILENIO EN BOGOTÁ D.C.....	31
TABLA 12. FORMULACIÓN DE NUEVAS FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES EN BOGOTÁ D.C.....	32
TABLA 13. FORMULACIÓN DE NUEVAS FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS EN BOGOTÁ D.C.....	33
TABLA 14. FORMULACIÓN DE NUEVAS FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES DE TRANSMILENIO EN BOGOTÁ D.C.....	34
TABLA 15. FORMULACIÓN DE NUEVAS FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRANSMILENIO EN BOGOTÁ D.C.....	35
TABLA 16. FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES EN BOGOTÁ D.C.....	36
TABLA 17. FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS EN BOGOTÁ D.C.....	37

TABLA 18. FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES DE TRANSMILENIO EN BOGOTÁ D.C.	38
TABLA 19. FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRANSMILENIO EN BOGOTÁ D.C.	39
TABLA 20. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS VIALES SEGÚN FAMILIAS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS ADOQUINADOS EN BOGOTÁ D.C.	40
TABLA 21. FORMULACIÓN DE NUEVAS FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS ADOQUINADOS EN BOGOTÁ D.C.	42
TABLA 22. FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS ADOQUINADOS EN BOGOTÁ D.C. ...	42
TABLA 23. ECUACIONES DE OPI VS. EDAD PARA FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES EN BOGOTÁ D.C.	47
TABLA 24. ECUACIONES DE OPI VS. EDAD PARA FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS EN BOGOTÁ D.C.	47
TABLA 25. CANTIDAD DE ELEMENTOS POR RANGOS DE EDADES PARA FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES EN BOGOTÁ D.C.	49
TABLA 26. CANTIDAD DE ELEMENTOS POR RANGOS DE EDADES PARA FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS EN BOGOTÁ D.C.	50
TABLA 27. DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA.....	52
TABLA 28. DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS ESCOGIDOS POR LOCALIDAD.	55
TABLA 29. DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS QUE SE DEBEN VERIFICAR EN LA SEGUNDA ETAPA.	56
TABLA 30. CANTIDAD DE ELEMENTOS POR FAMILIA SELECCIONADOS. MUESTRA DE 989 ELEMENTOS.	60
TABLA 31. DISTRIBUCIÓN DE LOS 989 ELEMENTOS ESCOGIDOS POR LOCALIDAD.....	61
TABLA 32. SEVERIDAD PARA LAS FISURAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES.....	63
TABLA 33. SEVERIDAD DEL DESGASTE SUPERFICIAL.....	63
TABLA 34. SEVERIDAD DE LOS AHUELLAMIENTOS	64
TABLA 35. SEVERIDAD DE LA EXUDACIÓN	65
TABLA 36. SEVERIDAD DE LA CORRUGACIÓN	65
TABLA 37. SEVERIDAD DE LA PIEL DE COCODRILO	66
TABLA 38. SEVERIDAD DE LOS BACHES	66
TABLA 39. SEVERIDAD DEL HUNDIMIENTO	67
TABLA 40. SEVERIDAD PARA LAS LOSAS SUBDIVIDIDAS.....	68
TABLA 41. SEVERIDAD PARA EL DISLOCAMIENTO	68
TABLA 42. SEVERIDAD DE LAS FISURAS.....	69
TABLA 43. SEVERIDAD DE LA FISURA DE ESQUINA.....	70

TABLA 44. SEVERIDAD DE LA DEFICIENCIA EN EL SELLO DE JUNTAS.....	70
TABLA 45. SEVERIDAD DE LOS BACHES	71
TABLA 46. SEVERIDAD DE LOS AHUELLAMIENTOS.....	72
TABLA 47. SEVERIDAD DE LA DESUNIÓN.	73
TABLA 48. SEVERIDAD DE LOS HUECOS.....	74
TABLA 49. RELACIÓN ENTRE LA SEVERIDAD DE LA FISURA Y EL ANCHO MEDIDO EN CAMPO.	74
TABLA 50. SEVERIDAD DEL ESCALONAMIENTO.	75
TABLA 51. SEVERIDAD DE LAS ONDULACIONES Y HUNDIMIENTOS.	76
TABLA 52. IDENTIFICACIÓN DE LAS MAESTRAS EMPLEADAS APRA EL ANÁLISIS DE TPD.	92
TABLA 53. RANGOS DEL MDR.....	96
TABLA 54. COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DE ROHDE PARA DIFERENTES TIPOS DE SUPERFICIES.....	100
TABLA 55. FACTORES DE AJUSTE PARA EL CÁLCULO DEL ESPESOR DE LOSA EFECTIVO POR RANGOS DE MDR.....	103
TABLA 56. ZONAS DEFINIDAS PARA ASIGNACIÓN DEL CBR.	105
TABLA 57. RESUMEN DE CANTIDAD DE SEGMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO. TIPO DE ESTRUCTURA: FLEXIBLE.....	106
TABLA 58. RESUMEN DE CANTIDAD DE SEGMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO. TIPO DE ESTRUCTURA: RÍGIDA	107
TABLA 59. RESUMEN DE CANTIDAD DE SEGMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO – CALZADAS TRANSMILENIO	107

LISTA DE GRÁFICAS

FIGURA 1. CUENCO DE DEFLEXIONES – RIGIDEZ DE LA ESTRUCTURA.....	7
FIGURA 2. ESTIMACIÓN DE EDAD DEL PAVIMENTO A PARTIR DE LA CURVA DE TENDENCIA DEL OPI.....	10
FIGURA 4. UMBRALES PARA LA DEFINICIÓN DE LAS FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS EN BOGOTÁ D.C.....	23
FIGURA 5. UMBRALES PARA LA DEFINICIÓN DE LAS FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DE TRANSMILENIO EN BOGOTÁ D.C.	23
FIGURA 6. UMBRALES PARA LA DEFINICIÓN DE LAS FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRANSMILENIO EN BOGOTÁ D.C.....	24
FIGURA 7. DISTRIBUCIÓN DE FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES EN BOGOTÁ D.C.	36
FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS EN BOGOTÁ D.C.	37
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES DE TRANSMILENIO EN BOGOTÁ D.C.	38
FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN DE FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS DE TRANSMILENIO EN BOGOTÁ D.C.	39
FIGURA 11. UMBRALES PARA LA DEFINICIÓN DE LAS FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO DE PAVIMENTOS ADOQUINADOS EN BOGOTÁ D.C.	40
FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN DE FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS ADOQUINADOS EN BOGOTÁ D.C.	43
FIGURA 13. FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES – METODOLOGÍA PAVER 2.....	44
FIGURA 14. FALLAS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS – METODOLOGÍA PAVER 2.	44
FIGURA 15. CURVAS PAVER PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	45
FIGURA 16. CURVAS PAVER PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS.	46
FIGURA 17. ESTIMACIÓN DE EDAD DEL PAVIMENTO A PARTIR DE LA CURVA DE TENDENCIA DEL OPI.....	48
FIGURA 18. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS POR RANGOS DE EDADES PARA FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES EN BOGOTÁ D.C.....	49
FIGURA 19. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS POR RANGOS DE EDADES PARA FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS EN BOGOTÁ D.C.	50

FIGURA 20. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE ELEMENTOS CON PAVIMENTO FLEXIBLE EN CALZADAS MIXTAS.....	54
FIGURA 21. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE ELEMENTOS CON PAVIMENTO RÍGIDO EN CALZADAS MIXTAS.....	54
FIGURA 22. PROCESO DE GEORREFERENCIACIÓN DE FALLAS.....	59
FIGURA 23. FISURAS EN PAVIMENTO FLEXIBLE	63
FIGURA 24. DESGASTE SUPERFICIAL EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE.....	64
FIGURA 25. AHUELLAMIENTO EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE.....	64
FIGURA 26. EXUDACIÓN.....	65
FIGURA 27. CORRUGACIÓN.....	66
FIGURA 28. PIEL DE COCODRILO	66
FIGURA 29. BACHE.....	67
FIGURA 30. HUNDIMIENTO.....	67
FIGURA 31. LOSA SUBDIVIDIDA.....	68
FIGURA 32. DISLOCAMIENTO.....	69
FIGURA 33. FISURAS EN PAVIMENTO RÍGIDO.....	69
FIGURA 34. FISURA DE ESQUINA	70
FIGURA 35. DEFICIENCIA EN EL SELLO	71
FIGURA 36. BACHE EN PAVIMENTO RÍGIDO	71
FIGURA 37. AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS ADOQUINADOS.....	72
FIGURA 38. DESUNIÓN EN PAVIMENTOS ADOQUINADOS.....	73
FIGURA 39. HUECOS EN PAVIMENTOS ADOQUINADOS.....	73
FIGURA 40. FISURACIÓN EN PAVIMENTOS ADOQUINADOS.....	74
FIGURA 41. ESCALONAMIENTO EN PAVIMENTOS ADOQUINADOS.....	75
FIGURA 42. ONDULACIONES Y HUNDIMIENTOS EN PAVIMENTOS ADOQUINADOS.....	76
FIGURA 43. PROCESO DE GEORREFERENCIACIÓN DE FALLAS.....	77
FIGURA 44. CAPTURADOR PORTÁTIL DE DATOS PSION.....	78
FIGURA 45. PANTALLA PRINCIPAL PROGRAMA FALLAS.....	79
FIGURA 46. PANTALLA 1 / 2 PROGRAMA FALLAS	79
FIGURA 47. PANTALLA 2 / 2 PROGRAMA FALLAS	80
FIGURA 48. ODÓMETRO MANUAL.....	81
FIGURA 49. IDENTIFICACIÓN Y MATERIALIZACIÓN DEL NODO INICIAL	81

FIGURA 50. LEVANATAMIENTO DE FALLAS SUPERFICIALES EN EL PAVIMENTO.....	81
FIGURA 51. ESQUEMA DE TOMA DE DEFLEXIONES CON FWD.....	82
FIGURA 52. DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD DEL EQUIPO FWD.....	84
FIGURA 53. TOMA DE TEMPERATURA PREVIO A LA MEDICIÓN DE DEFLEXIONES.....	85
FIGURA 54. TOMA DE DEFLEXIONES.....	85
FIGURA 55. SEÑALIZACIÓN AUTORIZADA SEGÚN STT.....	86
FIGURA 56. TALADRO Y PLANTA ELÉCTRICA EMPLEADAS PARA LA EXTRACCIÓN DEL NÚCLEO.....	87
FIGURA 57. EXTRACCIÓN DEL NÚCLEO.....	88
FIGURA 58. PROFUNDIZACIÓN DE PERFORACIÓN EN PAVIMENTO FLEXIBLE.....	88
FIGURA 59. TOMA DE ESPESORES.....	89
FIGURA 60. REPARACIÓN DE LAS CAPAS GRANULARES.....	89
FIGURA 61. REPARACIÓN DE LA CAPA DE RODADURA.....	89
FIGURA 62. CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS CAMIONES.....	91
FIGURA 63. CONTEOS DE TRÁNSITO.....	91
FIGURA 64. GRÁFICO DE COMPORTAMIENTO DE LAS MAESTRAS.....	93
FIGURA 65. NOMOGRAMAS METODOLOGÍA PAVER – PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	97
FIGURA 66. NOMOGRAMAS METODOLOGÍA PAVER – PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	98
FIGURA 67. RESUMEN DE CANTIDAD DE SEGMENTOS POR FAMILIA DE DETERIORO – PAVIMENTO FLEXIBLE.....	106
FIGURA 68. . RESUMEN DE CANTIDAD DE SEGMENTOS POR FAMILIA DE DETERIORO – PAVIMENTO RÍGIDO.....	107
FIGURA 69. EJEMPLO DE USO DE CURVA PAVER PARA UN DAÑO ESPECÍFICO I.....	110
FIGURA 70. FRONTERAS DE LA EVOLUCIÓN DEL OPI CON Y SIN MANTENIMIENTO RUTINARIO ADECUADO.....	111
FIGURA 71. ESPECTRO DE DETERIORO Y UMBRALES PARA LA GESTIÓN DE PAVIMENTOS.....	121
FIGURA 72. COMPORTAMIENTO TÍPICO DE LAS GRIETAS TOTALES Y GRIETAS ANCHAS.....	123
FIGURA 73. COMPORTAMIENTO TÍPICO DE LA PÉRDIDA DE ÁRIDOS.....	124
FIGURA 74. COMPORTAMIENTO TÍPICO DE LOS BACHES.....	125
FIGURA 75. COMPORTAMIENTO TÍPICO DEL AHUELLAMIENTO.....	126
FIGURA 76. COMPORTAMIENTO TÍPICO DE LA RUGOSIDAD.....	127
FIGURA 77. COMPORTAMIENTO TÍPICO DEL ESCALONAMIENTO.....	129

LISTA DE ANEXOS

Apéndice 1. METODOLOGIA PARA LA CALIBRACION DE CURVAS DE DETERIORO EN PAVIMENTOS ADOQUINADOS.

Anexo No 1. PLANOS CLASIFICACION DE LOS ELEMENTOS VIALES EN FAMILIAS TIPICAS DE DETERIORO.

Anexo No 2. GRAFICAS OPI vs. EDAD DE PAVIMENTO.

Anexo No 3. LISTADO DE LA SELECCIÓN DE LAS PISTAS INICIALES.

Anexo No 4. PLANO Y LISTADO CON UBICACIÓN DE LA SELECCIÓN DE PISTAS DEFINITIVAS.

Anexo No 5. PLANES DE MANEJO DE TRAFICO PRESENTADOS A STT.

Anexo No 6. CERTIFICADOS DE CALIBRACION DEFLECTOMETROS.

Anexo No 7. TABLA RESUMEN DE CALCULOS FINALES.

Anexo No 8. CLASIFICACION DE LOS ELEMENTOS SELECCIONADOS COMO PISTAS, EN FAMILIAS TIPICAS DE DETERIORO.

Anexo No 9. PLAN DE CALIDAD.

Anexo No 10. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.

1. INFORMACIÓN BÁSICA DEL CONTRATO

1.1. OBJETIVO GENERAL

Ejecutar los trabajos de consultoría para el desarrollo de la Fase II de calibración de las curvas de deterioro de los pavimentos de Bogotá D.C.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Planificar y estructurar la metodología de calibración desarrollada en la Fase I del proyecto, mediante la ejecución de las siguientes actividades:

- Clasificación de cada uno de los segmentos viales que conforman la malla vial en cada una de las familias de deterioro establecidas en la Fase I.
- Definición de los elementos pertenecientes a cada familia de deterioro necesarios para contar con una muestra suficiente en el proceso de seguimiento.
- Estimación de la edad de los pavimentos que conforman la base de datos de inventario de la malla vial del IDU de acuerdo a los criterios definidos en la Fase I.
- Definición del tamaño de la muestra.
- Definición de la muestra de elementos viales que servirán como pistas de calibración y su georreferenciación.
- Medida de las deflexiones en las pistas de calibración, mediante la utilización del deflectómetro de impacto.
- Determinación del espesor real del pavimento rígido, mediante la toma de núcleos, en cada una de las pistas seleccionadas.
- Determinación del tráfico promedio diario, por medio de conteos de 15 minutos, de cada una de las pistas de las cuales no se tenga esta información.
- Cálculo del Índice de Falla MDR.

- Cálculo del Índice de Condición del Pavimento OPI.
- Definición para pavimentos articulados de: Familias de deterioro, fallas relevantes para realizar el seguimiento, metodología para el levantamiento en campo de las fallas y toma del IRI, y realizar el cálculo del OPI.
- Diseño e implementación del Plan de Aseguramiento de la Calidad para el manejo de la información y el desarrollo de la Fase II y Fase III.
- Elaboración del Plan de Trabajo para el desarrollo de las fases subsiguientes.

1.3. PLAZO DEL CONTRATO

Siete (7) meses.

1.4. FECHA DE INICIACIÓN

Primero (1) de octubre de 2004.

1.5. FECHA DE TERMINACIÓN

Primero (1) de mayo de 2005.

1.6. VALOR DEL CONTRATO

\$ 386.986.440.00 (Incluido IVA).

1.7. AJUSTES

El presente contrato no tiene ajustes.

2. ALCANCE DE LOS TRABAJOS

De acuerdo a los objetivos del proyecto, y según las modificaciones llevadas a cabo durante el desarrollo del mismo, se presenta a continuación el informe final de las actividades ejecutadas por el Consultor como parte de la "Calibración de las Curvas de Deterioro de Pavimentos de Bogotá – Fase II".

2.1. VERIFICACION Y RECOMENDACIONES DE LA METODOLOGIA DE CALIBRACION

2.1.1. Clasificación de elementos viales de acuerdo a las familias de deterioro típicas

La metodología propuesta en los Términos de Referencia para la clasificación de elementos viales en familias de deterioro parte de la propuesta consignada por la Universidad Javeriana en desarrollo de la Fase I del presente proyecto.

La Universidad Javeriana en dicho estudio, propuso la conformación de familias de deterioro de acuerdo a cuatro variables: tipo de pavimento, nivel de tráfico, capacidad estructural y capacidad de la subrasante. Para el tipo de pavimento se establecieron dos escenarios: pavimento con superficie flexible y pavimento con superficie rígida. Para las demás variables, se establecieron rangos que permitieran clasificar los elementos viales a partir de los datos de inventario y diagnóstico consignados en la base de datos del IDU, es decir, a partir de la información existente. Es importante anotar que la variable clima no fue incluida dentro del análisis para la conformación de dichas familias. De igual forma, la Universidad Javeriana realizó un análisis al contenido de la base de datos de inventario y diagnóstico con el objeto de establecer el porcentaje de ocurrencia o de repetibilidad de los elementos viales en cada una de las familias definidas y de esa manera reducir el espectro de análisis a familias de deterioro típicas. Los elementos viales que no hacen parte de estas familias típicas, se asocian a aquellas cuyas variables sean lo mas cercanas posibles. Por último, la Universidad Javeriana realizó un análisis similar para los pavimentos que conforman las calzadas o elementos exclusivos del sistema Transmilenio

De acuerdo a la literatura existente del tema, en general las familias de deterioro deben tener en cuenta como mínimo las siguientes variables:

- **Clima y medio ambiente.**

Los factores climáticos y de medio ambiente que mayor incidencia tienen en el deterioro de los pavimentos son la temperatura, la precipitación y las condiciones de invierno.

En cuanto a la temperatura, el factor relevante se refiere al gradiente térmico, el cual, al superar variaciones en un cierto período de tiempo mayores a 40° C, puede inducir fisuramiento generalizado, en especial en los pavimentos con estructura flexible, fisuramiento que no corresponde a problemas de tipo geotécnico, es decir a deformaciones permanentes de las

capas subyacentes del pavimento y que puede ser solucionado con la utilización de mezclas asfálticas con bitúmenes modificados que permitan mejorar el rango visco elástico del asfalto y por ende el comportamiento general de la superficie del pavimento. Para que en una zona se genere un gradiente térmico con la magnitud enunciada anteriormente, se deben presentar estaciones. Ahora bien, es posible que en períodos cortos de tiempo se presente un cierto nivel de gradiente térmico, pero no con la magnitud expresada por los autores. Para el caso de Bogotá, dicho gradiente puede estar del orden de 20° C, sin embargo, por presentarse en períodos cortos de tiempo, la temperatura interna de la superficie del pavimento se mantiene relativamente constante en un rango que puede oscilar entre los 15° C y 20° C, motivo por el cual, la temperatura en Bogotá no se constituye en una variable para la estimación de familias de deterioro.

Por su parte, el nivel de precipitación expresado en volumen de precipitación media anual (mm) puede incidir en el comportamiento del deterioro de un pavimento, siempre y cuando las condiciones de drenaje superficial y subsuperficial de la estructura permitan la saturación de los materiales granulares y del suelo de subrasante. Lo anterior, debido en gran medida al aumento del nivel freático. En el caso de vías urbanas, donde el drenaje superficial debe ser debidamente manejado mediante sistemas de alcantarillado y además, el nivel freático se encuentra prácticamente abatido, diferencias de volúmenes de precipitación pueden ser despreciables para su consideración dentro de las variables a involucrar en la estimación de las familias. Sin embargo, es necesario precisar que dentro de los factores climáticos y medioambientales, la precipitación se constituye en la variable que más influye en el deterioro superficial y estructural del pavimento, teniendo en cuenta que un manejo inadecuado del drenaje superficial y subsuperficial, aunado a la presencia de fallas como fisuras, baches y piel de cocodrilo, permiten la infiltración de las aguas de escorrentía superficial y profunda a las capas subyacentes de la estructura, debilitando los materiales y en algunas ocasiones, modificando sus propiedades resistentes.

De igual forma, las condiciones de invierno someten los materiales que conforman la estructura del pavimento, incluyendo la subrasante, a condiciones extremas de congelamiento en invierno, saturación en primavera por el descongelamiento, secado en verano y saturación parcial en otoño, generando comportamientos diferenciales en términos de capacidad estructural, ya sea ésta estimada mediante el número estructural o el módulo resiliente y/o dinámico, debido a que generalmente, dichos parámetros son estimados a partir de las deflexiones medidas mediante la técnica del retrocálculo. A todas luces, dichas condiciones no se presentan de manera estacionaria en Bogotá, razón por la cual esta variable tampoco influye en el comportamiento del deterioro de los pavimentos locales.

- **Tráfico.**

El factor asociado al tráfico que influye en el deterioro de un pavimento corresponde a la acumulación de ejes de diseño que transitan por el mismo, ya que de acuerdo a los autores, aunque una estructura cuente con un mantenimiento rutinario adecuado, la curva de deterioro debe decrecer en función del tráfico acumulado de diseño que transite por la misma. Es importante anotar que en la medida que ejes acumulados reales en un instante del tiempo

sean superiores a los ejes acumulados de diseño, la tasa de deterioro a la cual la curva decrece debe ser mayor y en caso contrario, si los ejes acumulados de diseño son mayores a los reales, el deterioro esperado en cualquier instante debe ser menor.

Ante las consideraciones anteriores, es claro que el tráfico expresado en ejes acumulados si influye de manera directa en el deterioro de la estructura de pavimento.

- **Edad del pavimento.**

Dependiendo de su edad, el pavimento puede tener una mayor o menor capacidad de absorber las cargas y de disipar esfuerzos y deformaciones. Por lo tanto, la edad de la estructura se convierte en una característica intrínseca del deterioro, pero no en un variable que pueda diferenciar un deterioro de otro. Es decir, la utilidad de la edad del pavimento radica en el hecho de que a partir de su conocimiento se puede estimar el momento histórico en el cual se está realizando la gestión de pavimentos y definir su deterioro en ese momento a partir del modelo asignado a cada familia.

- **Geometría de la vía.**

La geometría transversal de la vía define la magnitud de fuerza de rozamiento que le imprimen las llantas al rodado contrarestando la fuerza centrífuga generada por la velocidad de operación del vehículo. De igual forma, el perfil longitudinal define las distancias de visibilidad y frenado, variables donde también se involucra el valor de la fuerza de rozamiento.

Cuantas más rampas y pendientes, así como mayor densidad de grados de curvatura por kilómetro, la superficie de rodado se verá sometida a una mayor cantidad de fuerza de rozamiento que deteriora el pavimento a través del tiempo.

En vías urbanas estas variables no inciden de manera directa en el deterioro, dadas las condiciones de operación de las mismas, no obstante, en vías rurales, es necesario tener en cuenta la geometría horizontal y vertical del corredor como factores que pueden influir en el proceso de deterioro del pavimento. Durante la presente Fase no fue posible incluir segmentos viales de la red vial rural de Bogotá dado que los recursos disponibles no fueron suficientes para tener en cuenta dentro de los estudios objeto del presente contrato este tipo de vías. Por lo anterior, se hace necesario que en Fases posteriores, el Consultor encargado estudie y conceptue sobre la incidencia de la geometría en la disminución de la condición de servicio del pavimento y escoja el porcentaje definido de segmentos de red vial rural (3%) necesario para realizar las mediciones de campo tendientes a definir los modelos de deterioro aplicables en los mismos.

- **Características estructurales del pavimento.**

La menor o mayor capacidad de un pavimento para disipar los esfuerzos y deformaciones inducidos por las cargas de los vehículos influye directamente en el comportamiento del deterioro de la estructura, independientemente de las actividades de mantenimiento rutinario y

periódico que puedan realizarse sobre la misma. Lo anterior indica que la única manera de mejorar el nivel de deterioro de una estructura consiste en “reforzarla”. Este concepto aplica de igual forma para las características funcionales del pavimento, las cuales, solo serán mejoradas si el índice de regularidad superficial IRI mejora su condición.

Lo anterior explica el motivo por el cual ningún modelo de deterioro incluye las características estructurales y si por el contrario se sustenta en la modelación del IRI. Revisados modelos de deterioros tales como el OPI, se encuentra que el IRI se encuentra de manera exponencial y cualquier cambio de su valor, por pequeño que parezca, influye notoriamente en el resultado.

$$OPI = MDR * \left(\frac{5 * e^{0.198 - 0.000261 * IRI}}{5} \right)^{0.12}$$

No obstante, en pavimentos urbanos el concepto del IRI no representa la importancia que puede tener en una vía interurbana por los siguientes motivos:

- Las velocidades de operación se encuentran limitadas por los obstáculos de control de tránsito tales como semáforos, límites de velocidad en zonas cercanas a hospitales, colegios, entes públicos, pasos peatonales, pasos de ciclorutas.
- Los modelos para la estimación de costos de operación vehicular en mallas urbanas, los cuales se basan en el valor del IRI de operación, son de difícil evaluación dada la cantidad de variables que deben ser analizadas y calculadas para su modelación.

Dada esta situación, la capacidad estructural se debe establecer como variable en la estimación de las familias, en reemplazo de las variables de carácter funcional como el IRI.

- **Características de los materiales de la estructura.**

Las propiedades mecánicas de los materiales que conforman la estructura, expresadas en términos de leyes de fatiga, módulos dinámicos, módulos resilientes, CBR, módulo de elasticidad, compresión confinada y las propiedades cualitativas tales como granulometrías, límites de consistencia, índice de plasticidad, color, densidad, entre otros permiten en un momento dado definir que tan susceptible al deterioro prematuro puede llegar a ser la estructura y definirse como variable para la conformación de familias.

Sin embargo, todas estas características se pueden resumir en las características mecánicas del paquete estructural expresado en términos del número estructural SN de la AASHTO. Teniendo en cuenta que en el presente proceso el SN se calcula por la técnica del retrocálculo, se entiende que el cuenco de deflexión representa la rigidez de la estructura y por ende las características de los materiales que lo componen.

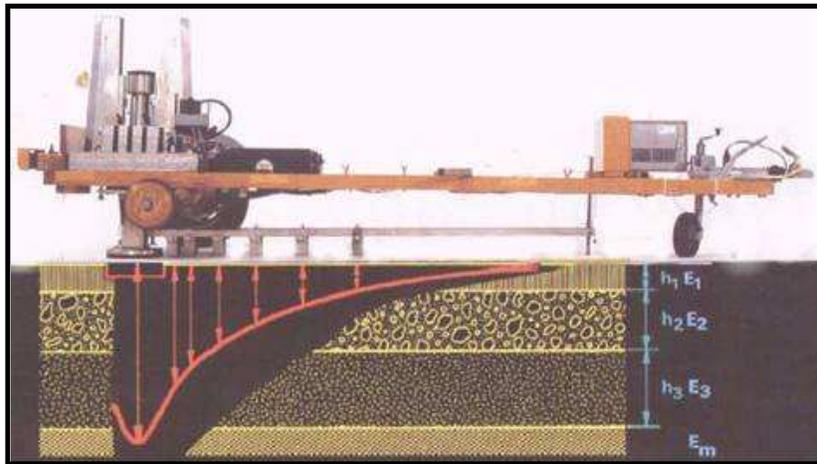


Figura 1. Cuenco de deflexiones – Rigidez de la estructura.

Ahora bien, en cuanto al material que conforma la subrasante, se deben caracterizar sus propiedades mecánicas y físicas, con el objeto de establecer su capacidad para absorber las deformaciones inducidas por el peso de la estructura y de las cargas de los vehículos que solicitan el pavimento. Dichas propiedades pueden ser estimadas a partir del módulo resiliente de la subrasante MR o el CBR.

En cuanto al MR, este se constituye en una variable de diseño que depende de la misma estructura y de las características geotécnicas del suelo de fundación en términos de profundidad de cimentación y granulometría. Por lo anterior, no se recomienda su uso como variable para la gestión de pavimentos.

En cambio, el valor de CBR puede generalizarse para cualquier tipo de suelo y a cualquier profundidad, motivo por el cual, esta variable si incide en la determinación de las características de una familia de deterioro dada. Se ha encontrado que los rangos de CBR definidos por la Pontificia Universidad Javeriana durante la primera Fase de este estudio para la estimación de familias de deterioro son adecuados y adicionalmente no se hace necesario realizar ensayos in situ para la determinación de ésta variable, teniendo en cuenta que el estudio de microzonificación sísmica de la ciudad realizado por la Universidad de los Andes por encargo de INGEOMINAS presenta una alta confiabilidad en los resultados obtenidos al caracterizar y sectorizar los suelos de Bogotá a través del CBR.

- **Calidad de la construcción.**

Un pavimento puede contar con los mejores materiales en términos de características cualitativas y mecánicas, pero procesos constructivos deficientes pueden alterar el deterioro normal ante la acción de ejes acumulados de diseño. La calidad de la construcción se mide a partir del cumplimiento de las especificaciones técnicas de construcción, referenciadas en un pavimento de manera espacial a las siguientes actividades:

- Conformación de la subrasante.
- Tratamientos de la subrasante.
- Transporte de materiales pétreos.
- Extendido y compactado de materiales pétreos.
- Mejoramiento o estabilización de materiales pétreos.
- Transporte de concretos asfálticos o hidráulicos.
- Extendido y compactado de concretos asfálticos o hidráulicos.

Dependiendo del cumplimiento de las especificaciones técnicas de construcción, la calidad de la construcción se constituye en una variable a tener en cuenta para establecer familias de deterioro. No obstante, dicha variable es válida en la medida que se cuente con información sobre este tema. Dado que todos los elementos que conforman la malla vial de Bogotá deben ser clasificados en familias de deterioro, no se encuentra práctico que se involucre esta variable, ya que no es posible extrapolar información de una porción de segmentos a todos los demás.

Sin embargo, teniendo en cuenta que el proyecto del Sistema de Gestión Vial y de Espacio Público, actualmente en desarrollo, contempla la implementación de un modelo de deterioro por defecto, el cual se base en los modelos de deterioro del HDM 4, se hace necesario recomendar un valor por defecto de las variables CDS (Indicador de defectos de construcción para superficies bituminosas) y CDB (Indicador de los defectos de construcción para bases granulares). Como no se tiene información, estos valores deben corresponder al escenario más conservador, recomendando un valor de CDS de 1.5 y un valor de CDB de 1.5. En el caso particular del CDS, se encuentra que un valor conservador puede ser 0.5 (mezcla frágil) ó 1.5 (mezcla blanda), sin embargo, se recomienda el valor de 1.5, ya que el mismo involucra un deterioro acelerado del IRI generado por el ahuellamiento de una mezcla blanda. De igual forma, se recomienda que se comience una campaña de monitoreo del cumplimiento de las Especificaciones Técnicas de Construcción en las obras de conservación y rehabilitación, tendientes a establecer de manera particular para cada elemento vial, los valores adecuados de dichas variables.

- **Conclusiones.**

A partir de las consideraciones anteriores, el consultor considera que las variables involucradas en el estudio desarrollado por la Universidad Javeriana se ajustan a las requeridas para la determinación de las familias de deterioro de los pavimentos de la ciudad, teniendo en cuenta lo siguiente:

- La base de datos de inventario y diagnóstico posee información sobre tipo de pavimento, ejes equivalentes en términos de clasificación del tránsito (T0, T1...), capacidad estructural en términos de número estructural SN y capacidad de la subrasante en términos de CBR.
- De acuerdo a las características del clima, medio ambiente y geometría, se puede considerar de manera general que dichas variables no presentan variaciones en Bogotá y por lo tanto no identifican familias de deterioro adicionales a las ya contempladas. Sin

embargo, en las Fases posteriores se deberán reconsiderar las familias de deterioro para la red vial rural, teniendo en cuenta la geometría dentro de las variables a analizar y evaluar.

- A pesar que la calidad de la construcción si se constituye en una variable que influye en el deterioro de la estructura, no se puede considerar por falta de información estadística o determinística que permita clasificar los segmentos a partir de esta variable. No obstante, se han recomendado valores por defecto tanto para las superficies bituminosas como para las capas granulares, los cuales pueden ser adoptados en los modelos de deterioro por defecto, los cuales deberán ir cambiando en la medida que se realice un monitoreo adecuado en las obras de mantenimiento y rehabilitación vial sobre el cumplimiento de las Especificaciones Técnicas de Construcción.

2.1.2. Estimación de la edad de los pavimentos

La edad de los pavimentos se constituye en una de las variables más importantes para poder aplicar convenientemente un modelo que deteriore los componentes estructurales y funcionales de la estructura de pavimento. Por tal motivo, se hace necesario estimar esta variable para todos y cada uno de los elementos viales que conforman la malla vial de Bogotá.

Como fuente de información primaria se tiene la base de datos del IDU donde se consignan los registros de los elementos viales que han sido intervenidos y que se encuentran en seguimiento técnico y jurídico por parte de la Universidad Nacional de Colombia, con el objeto de establecer responsabilidades de los contratistas frente a las garantías de cumplimiento de la estabilidad de la obra. En la actualidad, esta base de datos posee información de 18.091 registros o elementos viales, dentro de los cuales, luego de realizar un filtro a partir del objeto contractual, se encuentra que 9.701 registros corresponden a elementos viales donde su estructura de pavimento fue objeto de intervención masiva y por lo tanto, la diferencia entre el período transcurrido entre la fecha de terminación del contrato y la actualidad se puede tomar como edad del pavimento. Esta muestra corresponde al 8.20 % de los elementos viales que conforman la malla vial de Bogotá.

Para estimar la edad de los pavimentos del volumen restante de elementos viales se proponen las siguientes alternativas:

- **Estimación de la edad de pavimentos por asociación de comportamiento del OPI de acuerdo a las familias de deterioro.**

Para la implementación de este procedimiento se deben surtir los siguientes pasos:

- Clasificación de la muestra de elementos viales a los cuales se les conoce su edad por familias de deterioro.
- En cada familia de deterioro se grafica el valor del OPI de cada elemento que conforma dicha familia, ubicando en la ordenada la edad en que fue tomado el valor de OPI. La edad corresponde a la diferencia entre la fecha en la cual se intervino el elemento y la

fecha en la cual se realizó el inventario y diagnóstico del elemento, es decir, la fecha en la cual se estimó el MDR y el IRI.

- Por métodos numéricos, se estima la curva de tendencia del OPI por regresión, buscando aquella que muestre el mejor valor de R2.
- Una vez obtenida la ecuación de la curva de tendencia del OPI para cada familia de deterioro, se estima el valor de la ordenada (edad) de los elementos viales cuya edad se desconoce, a partir de su valor de OPI.

Para la aplicación de esta alternativa, se debe suponer que una vez un elemento vial ha sido intervenido, su valor de OPI = 100.

En la **Figura No. 2**, se ilustra el proceso de análisis recomendado:

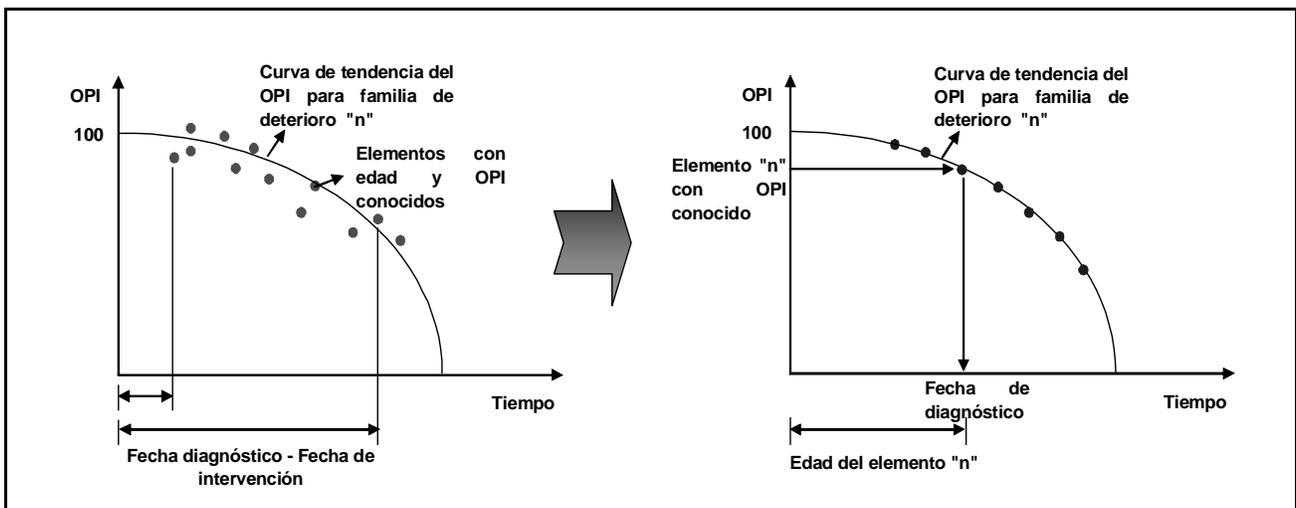


Figura 2. Estimación de edad del pavimento a partir de la curva de tendencia del OPI.

- **Estimación de la edad de pavimentos por investigación directa.**

Esta alternativa comprende trabajos de investigación, revisión y recopilación de la información existente sobre fechas de intervenciones masivas en pavimentos en elementos viales diferentes a los consignados en la base de datos de seguimiento a pólizas de estabilidad vigente. Las fuentes de esta información se encuentra en los archivos generales de la Secretaría de Obras Públicas del Distrito SOP y del IDU.

Dado el nivel de información existente sobre el tema, el consultor considera que esta alternativa, aparte de arrojar datos con baja confiabilidad, no permitiría estimar edades de elementos viales en un porcentaje siquiera similar al que se obtendría de la base de datos de seguimiento existente. Adicionalmente, no permitiría dar cumplimiento al cronograma ya que la

información no se encuentra archivada de manera normalizada y por lo tanto se requeriría de personal adicional y tiempo para la ejecución de este trabajo.

- **Estimación de la edad de pavimentos por asociación a la fecha de creación de barrios.**

Esta alternativa comprende en asociar la edad del pavimento de los elementos viales sin información a la fecha de creación de barrios, información que puede encontrarse en resoluciones y decretos expedidos por el Departamento Administrativo de Planeación Distrital DAPD. En concepto del consultor, esta alternativa se convertiría en el último recurso para asignar las edades de los pavimentos, ya que la fecha de creación de un barrio no necesariamente determina la fecha de construcción de las estructuras de pavimento ubicadas en cada sector.

- **Conclusiones.**

El consultor consideró que la mejor alternativa para la estimación de la edad de pavimentos se constituye en la asociación de comportamiento del OPI de acuerdo a las familias de deterioro. Esta alternativa parte de información real y permite estimar la edad con base en las características funcionales medidas en términos del MDR y del IRI.

2.1.3. Tamaño de la muestra

De acuerdo al procedimiento consignado en la metodología de calibración de la Universidad Javeriana, el porcentaje de elementos viales asociados a cada familia de deterioro debe ser “el más alto posible”, teniendo en cuenta que el proceso de análisis de datos se realizará mediante la aplicación de métodos numéricos, en donde a mayor cantidad de datos, mayor es la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Revisada la literatura actual sobre aplicaciones estadísticas para determinar tamaños de muestras, se encuentra que el tamaño depende del nivel de incertidumbre que se tenga sobre la variable a analizar. Para el caso de Bogotá, la incertidumbre es muy alta dado que hasta la fecha no se han realizado análisis estadísticos sobre las causas del deterioro de los pavimentos y su influencia en las condiciones de operación, seguridad y confort. Por lo tanto, se comparte la apreciación de la Universidad Javeriana.

- **Conclusiones.**

TNM considera que el tamaño de la muestra recomendada por la Universidad Javeriana, es pequeño en relación con la cantidad de elementos viales que conforman la malla vial de Bogotá, pero encuentra que mediante el análisis juicioso de las variables que se levantarán en campo se puede llegar a una interpretación cercana del modelo de deterioro estructural y funcional. Lo anterior no indica que no se presenten situaciones atípicas cuyo comportamiento de deterioro se aparte del comportamiento esperado.

2.1.4. Estimación de la capacidad estructural del pavimento

Los Términos de Referencia del contrato no contemplan la estimación de la capacidad estructural del pavimento en términos de número estructural SN para pavimentos flexibles y en términos de espesor de losa faltante Dol para pavimentos rígidos. De acuerdo a la metodología establecida por la Universidad Javeriana, estas variables se pueden estimar a partir de las deflexiones medidas mediante el deflectómetro de impacto y los espesores de cada una de las capas que conforman la estructural.

Este trabajo consta de dos etapas a saber:

- **Definición de los espesores de las capas que conforman la estructura de pavimento de las pistas seleccionadas.**

Esta información se puede obtener de las siguientes fuentes:

- Espesores TH1 y TH2 consignados en la base de datos de inventario y diagnóstico. El espesor TH1 corresponde a las capas asfálticas o de concreto y el espesor TH2 corresponde a las capas granulares. Estos espesores no diferencian las características mecánicas y granulométricas de las capas, ya que se estimaron a partir de medidas en campo realizadas con georradar.
- Consulta de los informes definitivos de diseños o de interventoría de construcción de obras. Cabe aclarar que esta fuente de información sirve en la medida que los segmentos escogidos como pistas de calibración se encuentren en proceso de seguimiento de garantías y además los informes cuenten con la información referente al valor del espesor y a las características mecánicas y granulométricas de los mismos.
- Toma de sondeos en campo que permitan estimar los espesores reales y las características de las capas de la estructura presente en las pistas seleccionadas junto al sitio donde se tomó la medida de deflexión. El trabajo se realizaría con un equipo de extracción de núcleos de 4" de diámetro e incluiría la reparación de la estructura de pavimento en el sitio de sondeo.

- **Cálculo de la capacidad estructural del pavimento.**

La metodología para calcular la capacidad estructural del pavimento a partir de las deflexiones medidas con el deflectómetro de impacto y los espesores de las capas de la estructura difieren si la estructura es flexible o rígida. A continuación, se presentan las dos metodologías propuestas:

- **Pavimento flexible.** El número estructural (SN) efectivo se estimará por retrocálculo a partir de las deflexiones mediante la metodología Rohde. Gustav Rohde es un investigador que presentó la ponencia titulada "Determining a pavement's structural number from FWD testing", expuesta en la 73rd reunión anual de la Transportation Research Board.

Rohde, para investigar la hipótesis y desarrollar una relación entre las medidas de deflexión a nivel de superficie con Falling Weight Deflectometer y el Número Estructural, realizó análisis en un gran número de estructuras de pavimentos utilizando la teoría elástica multicapa.

El concepto que se maneja es el siguiente: El valor máximo de deflexión d_0 (medido a partir de FWD) es una combinación de la deflexión en la subrasante y la compresión elástica de la estructura del pavimento. Para explicar esto, el investigador Irwin explica la distribución de esfuerzos y el origen de las deflexiones bajo la carga de un FWD, así:

“Aproximadamente el 95% de las deflexiones medidas en la superficie de un pavimento son originadas debajo de un ángulo de desviación de 34° con la horizontal”.

Basados en esta simplificación, se puede asumir que la deflexión medida en la superficie del pavimento a una distancia imaginaria de 1.5 veces el espesor total (h_t) de la estructura de pavimento (desde el centro del plato de carga), se origina totalmente en la subrasante.

Ahora, al relacionar el valor de la deflexión producida a 1.5 veces el espesor total (h_t) de la estructura de pavimento, con el valor de la deflexión central (bajo el plato de carga), se puede encontrar un “índice” asociado con la magnitud de la deformación que ocurre dentro de la estructura de pavimento y se define así¹:

$$\text{SIP} = D_0 - D_{1.5 \cdot H_t}$$

Donde:

SIP	Índice estructural del pavimento.
D_0	Deflexión central, bajo el plato de carga bajo una carga de 40Kn (9000lb).
$D_{1.5 \cdot H_t}$	Deflexión medida en la superficie del pavimento bajo una carga de 40 KN (9000lb) a una línea imaginaria de 1.5 veces el espesor total (h_t) de la estructura de pavimento.
H_t	Espesor total del pavimento en pulgadas.

Hipotéticamente, el índice SIP debe estar relacionado directamente con la rigidez de la estructura de pavimento y subsecuentemente a su número estructural (SN). Se investigó esta hipótesis y se desarrolló una relación entre las medidas de deflexión en la superficie a partir de FWD y el número estructural (SN) del pavimento luego de analizar un gran número de estructuras utilizando la teoría elástica. Los cálculos del número estructural de las diferentes estructuras se realizaron mediante la ecuación de la AASHTO:

$$\text{SN} = \sum_{i=1}^n h_i \cdot a \cdot \left(\frac{E_i}{E_g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

¹ Fuente: “Determining a pavement's structural number from FWD testing”. Gustav T. Rohde.

Donde:

- h_i Espesores de las capas de la estructura de pavimento, en pulgadas.
- a_i Valores de coeficientes de capa de los materiales utilizados en el ensayo de AASHTO.
- E_i Módulo resiliente de los materiales de la estructura de pavimento.
- E_g Módulo resiliente de los materiales utilizados en el ensayo AASHTO.

Luego del análisis de las diferentes estructuras de pavimento, la mejor relación que se encontró fue incluyendo el espesor total del pavimento en el análisis. La relación tiene el siguiente formato:

$$SN = k_1 * SIP^{k_2} * H_p^{k_3}$$

Donde:

- SN Número estructural.
- SIP Índice del pavimento, calculado con la expresión relacionada anteriormente.
- H_p Espesor total del pavimento en mm.
- k_1, k_2 y k_3 Coeficientes que se muestran en la **Tabla No. 1**.

Tabla 1. Coeficientes de la ecuación de Rohde para diferentes tipos de superficies.

Tipo de superficie	K1	K2	K3
Sello de asfalto	0.1165	-0.3248	0.8241
Concreto asfáltico	0.4728	-0.4810	0.7581

- **Pavimento rígido.** En pavimentos rígidos, el espesor faltante de losa, expresado en cm de concreto asfáltico, se determina considerando la metodología AASHTO, con base en los siguientes puntos:
 - ✓ Determinación de espesores del pavimento existente ($D_{existente}$).
 - ✓ Análisis de tránsito, determinando la cantidad de ejes equivalentes para el período de diseño.
 - ✓ Determinación de la condición superficial de las losas, esto es, establecer el MDR de cada segmento.

- ✓ Determinación del módulo de reacción de la subrasante - k dinámico a partir del estudio de las deflexiones. Se efectúa el retrocálculo considerando los siguientes puntos:
 - a) Cálculo del área del cuenco producido por deflexiones según FWD. El cálculo del área (A), equivale al cuenco producido bajo la losa luego de aplicar la carga del FWD. Se usa la siguiente expresión, según la metodología AASHTO:

$$A = 6 * (1 + (2 * d_{30} / d_o) + (2 * d_{60} / d_o) + (d_{90} / d_o))$$

Donde:

d_{30} , d_{60} y d_{90} son las deflexiones producidas a 30, 60, 90 cms del plato de carga (en pulgadas).

d_o es la deflexión producida en el centro del plato de carga (en pulgadas).

- b) Cálculo de l_k , rigidez relativa del líquido denso, según AASHTO.

$$l_k = \left[\frac{\ln^* \left(\frac{(36 - AREA)}{1812.279133} \right)}{-2.559340} \right]^{4.387009}$$

- c) Cálculo del k dinámico en función de la deflexión central (d_o) y del área calculada anteriormente. Utilizando la ecuación de Westergard, se procede a obtener el valor del módulo de reacción del material (k) debajo de la losa, obtenido mediante la siguiente expresión de la AASHTO:

$$k = \left(\frac{P}{8 * d_o * l_k^2} \right) * \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right) * \left[\ln \left(\frac{a}{2 * l_k} \right) + 0.5772156649 - 1.25 \right] * \left(\frac{a}{l_k} \right)^2 \right\}$$

Donde:

d_o es la deflexión producida en el centro del plato de carga, en pulgadas.

P es la carga, en libras.

a es el radio de aplicación de la carga, en pulgadas.

- d) Cálculo del k estático. El k calculado a partir de deflexiones de FWD es un valor dinámico, y para el diseño del refuerzo se requiere de un valor estático. A partir de estudios realizados, se ha encontrado que reduciendo el $K_{dinámico}$ en 2, se obtiene un valor razonable para valores de K estáticos.

$$K_{estático} = K_{dinámico} / 2$$

- e) Determinación del espesor de losa requerido para el tránsito futuro (D_r). Con base en el K efectivo estático obtenido y con cada uno de los siguientes coeficientes, se aplica la ecuación de la AASHTO para pavimentos rígidos y se obtiene el espesor de losa necesario para sobrellevar el tránsito futuro hasta un nivel de serviciabilidad final de $PSI = 1.5$. Para las vías se sugiere este valor de PSI_f , como el menor nivel aceptable de serviciabilidad del pavimento antes de una reconstrucción o recapeo.

Se definen los parámetros utilizados por AASHTO para el cálculo del espesor de losa requerido, mediante la expresión indicada a continuación:

- S'_c : módulo de rotura del hormigón = 614 psi. Este valor corresponde a un módulo del hormigón de 43 kg/cm².
- E: Módulo de elasticidad del hormigón = 3'600.000psi (para $M_r = 43$ kg/cm²),
- J: Coeficiente de transferencia de carga = 3.6. Este valor de J corresponde a un criterio de construcción sin pasadores y sin bermas.
- C_d : Coeficiente de drenaje = 1.2.
- S_o : Desviación estándar = 0.39, indica la variación que puede haber en la proyección del tránsito futuro.
- R: Confiabilidad del 70%, asumido por ser vías urbanas locales.
- En lo referente a la serviciabilidad del pavimento, se hace una correlación en función del índice de condición global - OPI. Así:

OPI = 100 : Pavimento en perfecto estado

OPI = 0 : Pavimento en pésimo estado

$$\log W_{18} = Z_R * S_o + 7.35 \times \log(D + I) - 0.06 + \frac{\log(1 - (OPI / 100))}{1 + \frac{1.624 * 10^7}{(D + I)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32Pt) * \log \left[\frac{S_c * Cd * [D^{0.75} - 1.132]}{215.63 * J * \left[D^{0.75} - \left(\frac{18.42}{(E/K)^{0.25}} \right) \right]} \right]$$

- f) Cálculo del espesor de losa efectivo existente, Def. Los espesores de losa existentes, obtenidos por alguno de los métodos convencional o alternativo, se afectan con los factores relativos a la condición superficial del pavimento.

Según AASHTO:

$$Def = D_{existente} * F_{jc} * F_{dur} * F_{rat}$$

Donde:

F_{jc} factor de ajuste por juntas y fisuras.

F_{dur} factor de ajuste por durabilidad.

F_{rat} factor de ajuste por fatiga.

Según el Índice de fallas superficiales (MDR), el cual va desde MDR = 0 (vía en mal estado) a MDR=100 (vía en perfecto estado) se estableció el factor $F_{jc} * F_{dur} * F_{rat}$, tal cual como se muestra en la tabla adjunta:

Tabla 2. Factores de ajuste para el cálculo del espesor de losa efectivo por rangos de MDR.

MDR	$F_{jc} * F_{dur} * F_{rat}$
80-100	0.9
50-80	0.7
< 50	0.5

- g) Cálculo el espesor de refuerzo faltante, D_{faltante}. Conociendo el espesor necesario para sobrellevar el tránsito futuro (D_r) y el espesor existente efectivo (Def) se calcula el D faltante, expresado en cm de concreto asfáltico:

$$D_{faltante} = (D_r - Def) * A$$

- **Conclusiones.**

Se considera necesario establecer la capacidad estructural de pavimento, y para realizar dicho trabajo, se recomienda que los espesores de las capas que conforman la estructura de pavimento sean estimados mediante pruebas destructivas en campo (sondeos), ya que de esta forma se asegura el resultado mediante la técnica del retrocálculo.

Es importante anotar, que los demás datos necesarios para aplicar dicha técnica si son tomados en campo con un equipo de alto rendimiento y alta confiabilidad como lo es el deflectómetro de impacto. La Universidad Javeriana pudo estimar esta confiabilidad en el desarrollo de la Fase I del presente proyecto.

2.1.5. Análisis del volumen y composición vehicular de las pistas de calibración

La metodología de calibración propuesta por la Universidad Javeriana considera que el consultor debe trabajar con los datos de volumen y composición vehicular consignados en la base de datos de inventario y diagnóstico, información que obedece a una metodología propuesta en el desarrollo de los primeros inventarios viales, la cual se basa en el uso del suelo donde se encuentre el elemento vial.

Las fuentes con las cuales se cuentan para poder estimar el verdadero tráfico sobre las posibles pistas de calibración son las siguientes:

- Consulta de los informes definitivos de diseños o de Interventoría de construcción de obras. Cabe aclarar que esta fuente de información sirve en la medida que los segmentos escogidos como pistas de calibración se encuentren en proceso de seguimiento de garantías y además los informes cuenten con la información referente al volumen y composición vehicular utilizado en el diseño de la estructura de pavimento.
- Base de datos con la información de conteos electrónicos realizados por la firma Siemens para la Empresa de Teléfonos de Bogotá y la Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá. Estos conteos se realizan en los semáforos ubicados sobre la malla vial. Para poder utilizar dicha información, se hace necesario realizar un proceso de análisis y cálculo, ya que la información corresponde a conteos durante las horas pico y no a un conteo continuo durante una jornada.

Es importante tener en cuenta que no todos los segmentos que se escojan como pistas de calibración a partir de las variables analizadas en el presente documento se encuentran en un sector con semáforo, caso en el cual se debe recurrir a la primera opción para la estimación del volumen y composición vehicular. La última opción a ser tomada en cuenta deberá ser tomar los datos contenidos en la base de datos de inventario y diagnóstico.

- **Conclusiones.**

Es necesario contar con la información real del volumen y composición vehicular en las pistas de calibración, ya que uno de los factores que inciden en la estimación de las familias de deterioro es el número de ejes equivalentes que solicitan la estructura. Por este motivo, TNM Ltd., considera necesario llevar a cabo la ejecución de conteos de tráfico en cada uno de los elementos viales seleccionados como pistas de calibración.

Para tal efecto, se propuso realizar conteos manuales de tráfico durante 3 períodos de 15 minutos, teniendo en cuenta que se cuenta con la información de varias estaciones maestras localizadas estratégicamente en la ciudad y es posible realizar la proyección del tráfico a 24 horas (TPD) mediante los factores de hora pico (FHP) característicos en cada estación. En concepto de ésta Consultoría, el tiempo y frecuencia de los conteos fue suficiente para poder extrapolar la información primaria y de esta forma realizar la asignación del volumen y composición del tráfico vehicular presente en las pistas de calibración.

2.1.6. Implementación de las curvas de deterioro del Sistema HDM 4

Los Términos de Referencia del contrato solo contemplan estimar los parámetros funcionales asociados a las pistas de calibración en un instante del tiempo, tales como el MDR y el IRI.

De otra parte, la metodología de calibración propuesta por la Universidad Javeriana recomienda que deben tomarse por lo menos 9 puntos en el tiempo para contar con una muestra suficiente que permita aplicar métodos numéricos para definir la curva de deterioro en cada una de las familias establecidas, incluidas tanto las variables funcionales (MDR, IRI), como estructurales (SN, DoI), con el registro de la progresión de la severidad y extensión de cada una de las fallas superficiales presentes.

De acuerdo a la solicitud del IDU, el consultor analizó y revisó la posibilidad de implementar en la Fase II del proyecto, las curvas de deterioro propuestas en el Sistema HDM 4, proceso desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo en asocio con el Banco Mundial.

Al respecto y luego de una investigación preliminar sobre el tema, se encuentra que los variables a medir en la Fase II requieren ser complementadas con la variable estructural para poder trabajar sobre dichas curvas. De igual forma, si se contara con las variables funcionales y estructurales, el consultor debe asumir valores por defecto asociados a parámetros tales como calidad de los materiales, calidad de la construcción, características físicas y geotécnicas de los materiales, entre otros, generando incertidumbre en la aplicación del modelo, ya que la modificación de los parámetros influyen sustancialmente en el comportamiento del deterioro.

Ahora bien, los valores que por defecto deban ser asumidos pueden ser calibrados en la medida que se desarrollen las otras fases del proyecto, quedando solo por establecer los parámetros asociados a la calidad de construcción y calidad de los materiales, los cuales podrían tener algún

tipo de información primaria realizando seguimiento a las obras que ejecute el IDU y asociando comportamiento a través de familias de deterioro.

Al igual que los modelos de deterioro propuestos por la Universidad Javeriana, el modelo de deterioro HDM 4 requiere conocer la edad de los pavimentos a gestionar.

- **Conclusiones.**

El consultor consideró, en su momento, que era viable implementar en la Fase II del proyecto el modelo de deterioro del HDM 4 “por defecto” mientras se encuentran las curvas reales del comportamiento de pavimentos en Bogotá, con los trabajos programados para las fases posteriores.

2.2. METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE CURVAS DE DETERIORO EN PAVIMENTOS ADOQUINADOS

Durante el primer mes de trabajo del contrato, T.N.M. Limited dando cumplimiento a lo establecido en los Términos de Referencia, desarrolló la “Metodología para la calibración de curvas de deterioro en pavimentos adoquinados”. El documento de dicha metodología, entregado y debidamente aprobado en su versión cero se consigna como **Apéndice 1** del presente informe, en el cual se analizaron los datos de diagnóstico contenidos en la Base de datos del IDU, necesario para una posterior documentación y ejecución de los procedimientos de campo en busca de la metodología para la calibración de curvas de deterioro en pavimentos adoquinados.

2.3. CLASIFICACION DE LOS ELEMENTOS VIALES DE ACUERDO A LAS FAMILIAS “TÍPICAS” DE DETERIORO

Se entiende por familia de deterioro al conjunto de elementos viales (calzadas) que poseen características similares dentro de un cierto orden en aspectos tales como la subrasante, materiales, tránsito y capacidad estructural, y que debido a esta similitud en sus características se espera tengan un comportamiento y deterioro similar a través del tiempo.

La metodología a emplear para la clasificación de elementos viales en familias de deterioro, de acuerdo con los Términos de Referencia del presente contrato, es la resultante del proyecto “Calibración de las curvas de deterioro de los pavimentos de Bogotá D.C. – Fase I”. En dicho estudio se propuso la conformación de familias de deterioro de acuerdo a cuatro variables:

- Tipo de pavimento.
- Nivel de tráfico.
- Capacidad estructural .
- Capacidad de la subrasante.

Para el tipo de pavimento se establecieron dos escenarios: 1) pavimento con superficie flexible y 2) pavimento con superficie rígida, adicionalmente se trataron de forma separada los elementos viales exclusivos del sistema transmilenio para los tipos de superficie mencionados. Para las demás variables, se establecieron rangos que permitieran clasificar los elementos viales a partir de los datos de inventario y diagnóstico consignados en la base de datos del IDU.

Inicialmente, partiendo de la información consignada en la base de datos normalizada que fue entregada por parte del IDU a la firma T.N.M. Limited el día 26 de noviembre de 2004, se llevaron a cabo los diferentes procedimientos necesarios para la clasificación de los elementos viales en las familias "típicas" de deterioro. Posteriormente, a partir de la selección de elementos viales resultante, se determinó una cantidad de elementos que no se encontraban normalizados en dicha base, pero que si contaban con información en la base de datos original, por lo tanto, la selección fue complementada utilizando de la base de datos original, los valores de los elementos viales faltantes.

Como se explicó anteriormente, en Fases posteriores se deberán incluir segmentos de vías rurales para la calibración de los modelos de deterioro de las mismas, las cuales deberán contemplar las variables geométricas (horizontales y verticales) como criterios para establecer las familias de deterioro típicas en las vías con funcionalidad vehicular que se encuentran en el sector rural de la ciudad.

Las diferentes actividades ejecutadas en dicho proceso se relacionan a continuación:

2.3.1. Clasificación en familias "típicas" de deterioro

De las tablas que componen dicha base de datos, se seleccionaron aquellas que aportaban información relevante para la clasificación de los elementos viales, estas son:

- Inventario_Estado
- Condición_EstructuralJ
- Condición_Tránsito
- Elemento_Sección
- Condición_Servicio

En las consultas realizadas en dichas tablas se tuvo en cuenta que debido a la ejecución de varios contratos de inventario de la malla vial, para un elemento se presentan varios valores asociados a un mismo campo de la base de datos. Esta multiplicidad de datos genera que para una selección dada, un elemento se encuentre repetido la misma cantidad de veces en las que se levantó la información según los diferentes contratos. Si esta consideración no se hubiese tenido en cuenta, la información final referente a la cantidad de elementos viales para su posterior clasificación sería errónea.

A continuación se describe el procedimiento realizado en cada una de las tablas mencionadas para la selección de los elementos viales susceptibles de clasificación por familias "típicas" de deterioro:

- **INVENTARIO_ESTADO.** En esta tabla se almacena la información referente al estado del elemento vial, y entre sus campos se encuentra la descripción del tipo de superficie que presenta dicho elemento, identificándose a los pavimentos rígidos con el número 1 y a los pavimentos flexibles con el número 2.

De otra parte, en esta misma tabla se encuentra el campo Cod_Inventario, mediante el cual se puede identificar el tipo de superficie asociado al contrato más reciente que levantó la información.

- **CONDICION_TRANSITO.** En esta tabla se almacenan los datos de Tráfico Promedio Diario (TPD), para autos, buses (busetas), camiones y articulados, según cada uno de los contratos con los cuales se levantó la información, los códigos identificadores de los contratos se almacenan en el campo Id_Contrato, de acuerdo con el siguiente listado:

Tabla 3. Listado de contratos relacionados en la tabla Condición_Tránsito de la base de datos.

Id_Contrato	No. del Contrato
1	617/99
2	379/01
3	834/99
361	481/02

Teniendo en cuenta que un elemento vial puede tener asociados varios TPD's dependiendo del contrato con el cual fue levantada o asignada la información, para evitar la redundancia, a cada elemento vial se le asoció el valor del TPD de acuerdo con el contrato de levantamiento de información más reciente.

- **CONDICION_ESTRUCTURALJ.** En esta tabla se almacena la información referente a las propiedades de: 1) capacidad estructural del elemento vial, en términos de número estructural (SN) para pavimentos flexibles y de espesor de losa efectivo (DOL) para pavimentos rígidos, y 2) capacidad de la subrasante en términos de CBR; datos necesarios para realizar la clasificación por familias. Debido a que el proceso que se describe se hace a partir de la base de datos normalizada, producto del contrato IDU No. 529 de 2002, los valores de SN y Dol están asociados a un único contrato, el cual se identifica en la base con el número 363.
- **ELEMENTO_SECCION.** En esta tabla se identifican los elementos que componen la sección de los segmentos viales, de donde se seleccionan aquellos que corresponden a calzadas.

Al realizar el cruce de información de cada una de las tablas mencionadas de la base de datos normalizada, se obtuvieron 65.480 elementos viales susceptibles de ser clasificados en familias de deterioro. Los rangos de clasificación de familias de deterioro para pavimentos flexibles y rígidos de calzadas mixtas, así como para pavimentos flexibles y rígidos de transmlenio se relacionan a continuación:

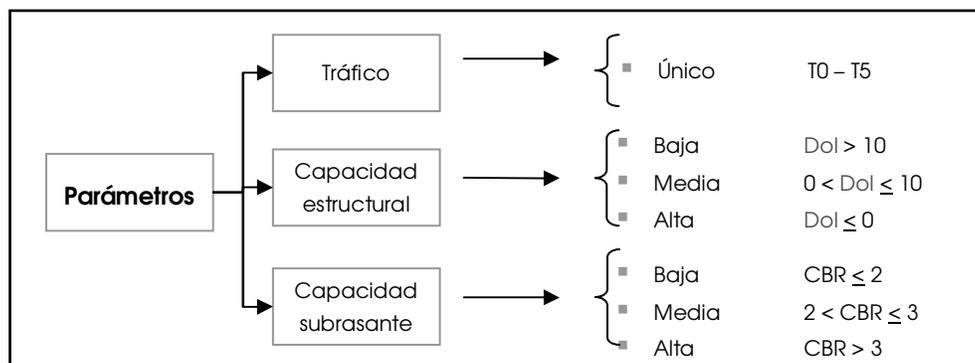


Figura 6. Umbrales para la definición de las familias “típicas” de deterioro de pavimentos rígidos de transilenio en Bogotá D.C.

Al respecto es importante aclarar que los rangos de número de ejes equivalentes (N) para la definición del tráfico no coinciden con los planteados en la metodología del contrato IDU No. 529 de 2002, debido a que los considerados en dicha metodología eran rangos muy amplios que podrían conducir a errores.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, la distribución de los elementos obtenidos de la selección de la base de datos normalizada en familias de deterioro es la siguiente:

Tabla 4. Distribución de elementos viales según familias de deterioro para pavimentos flexibles en Bogotá D.C. de acuerdo con la base de datos normalizada.

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRAFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	NÚMERO DE ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS
FLEXIBLE	1	BAJO (T0 Y T1)	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	502	1.09%
	2			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	3928	8.49%
	3			ALTA: $CBR > 3$	638	1.38%
	4		MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	3021	6.53%
	5			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	16825	36.37%
	6			ALTA: $CBR > 3$	5119	11.07%
	7		ALTA: $SN > 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	170	0.37%
	8			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	738	1.60%
	9			ALTA: $CBR > 3$	387	0.84%
	10	MEDIO (T2 Y T3)	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	28	0.06%
	11			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	213	0.46%
	12			ALTA: $CBR > 3$	179	0.39%
	13		MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	631	1.36%
	14			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	2570	5.56%
	15			ALTA: $CBR > 3$	2738	5.92%

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRAFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	NÚMERO DE ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS	
	16		ALTA: SN > 4	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	176	0.38%	
	17			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	246	0.53%	
	18			ALTA: CBR > 3	471	1.02%	
	19	ALTO (T4)	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%	
	20			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	7	0.02%	
	21			ALTA: CBR > 3	15	0.03%	
	22		MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	24	0.05%	
	23			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	114	0.25%	
	24			ALTA: CBR > 3	339	0.73%	
	25		ALTA: SN > 4		BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	90	0.19%
	26				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	114	0.25%
	27				ALTA: CBR > 3	126	0.27%
	28	MUY ALTO (T5)	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%	
	29			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%	
	30			ALTA: CBR > 3	0	0.00%	
	31		MEDIA: $2 < SN \leq 4$		BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	32				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	2	0.00%
	33				ALTA: CBR > 3	101	0.22%
	34		ALTA: SN > 4		BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	6	0.01%
	35				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	22	0.05%
36	ALTA: CBR > 3				75	0.16%	
Sin familia		Sin dato			6647	14.37%	
Cantidad Total de Elementos Seleccionados					46262	100.00%	

Tabla 5. Distribución de elementos viales según familias de deterioro para pavimentos rígidos en Bogotá D.C. de acuerdo con la base de datos normalizada.

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRAFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	NÚMERO DE ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS	
RÍGIDO	1	BAJO (T0 Y T1)	BAJA: DoI > 10	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	9	0.05%	
	2			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	9	0.05%	
	3			ALTA: CBR > 3	29	0.16%	
	4		MEDIA: $0 < DoI \leq 10$		BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	600	3.25%
	5				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	1828	9.91%
	6				ALTA: CBR > 3	2010	10.89%
	7		ALTA: DoI < 0		BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	1886	10.22%
	8				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	1344	7.28%
	9				ALTA: CBR > 3	7477	40.52%

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRAFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	NÚMERO DE ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS	
	10	MEDIO (T2 Y T3)	BAJA: DoI > 10	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	9	0.05%	
	11			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	71	0.38%	
	12			ALTA: $CBR > 3$	112	0.61%	
	13		MEDIA: $0 < DoI \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	59	0.32%	
	14			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	312	1.69%	
	15			ALTA: $CBR > 3$	798	4.32%	
	16		ALTA: DoI < 0	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	30	0.16%	
	17			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	213	1.15%	
	18			ALTA: $CBR > 3$	1116	6.05%	
	19	ALTO (T4)	BAJA: DoI > 10	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	2	0.01%	
	20			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	13	0.07%	
	21			ALTA: $CBR > 3$	19	0.10%	
	22		MEDIA: $0 < DoI \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	14	0.08%	
	23			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	26	0.14%	
	24			ALTA: $CBR > 3$	43	0.23%	
	25		ALTA: DoI < 0	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	6	0.03%	
	26			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	23	0.12%	
	27			ALTA: $CBR > 3$	8	0.04%	
	28	MUY ALTO (T5)	BAJA: DoI > 10	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%	
	29			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%	
	30			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%	
	31		MEDIA: $0 < DoI \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%	
	32			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%	
	33			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%	
	34		ALTA: DoI < 0	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%	
	35			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%	
	36			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%	
	Sin familia		Sin dato		387	2.10%	
	Cantidad Total de Elementos Seleccionados					18453	100.00%

Tabla 6. Distribución de elementos viales según familias de deterioro para pavimentos flexibles de transmlenio en Bogotá D.C. de acuerdo con la base de datos normalizada.

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRÁFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	NÚMERO DE ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS
TRANSMIL ENIO FLEXIBLE	1	ÚNICO	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	2			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%
	3			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRÁFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	NÚMERO DE ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS
	4	ÚNICO	MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	5			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%
	6			ALTA: $CBR > 3$	6	3.53%
	7	ÚNICO	ALTA: $SN > 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	8			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%
	9			ALTA: $CBR > 3$	6	3.53%
	Sin familia		Sin dato		158	92.94%
Cantidad Total de Elementos Seleccionados					170	100.00%

Tabla 7. Distribución de elementos viales según familias de deterioro para pavimentos rígidos de transmlenio en Bogotá D.C. de acuerdo con la base de datos normalizada.

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRÁFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	NÚMERO DE ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS
TRANSMILENIO RIGIDO	1	ÚNICO	BAJA: $Dol > 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	2			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%
	3			ALTA: $CBR > 3$	2	0.34%
	4	ÚNICO	MEDIA: $0 < Dol \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	5			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	126	21.18%
	6			ALTA: $CBR > 3$	2	0.34%
	7	ÚNICO	ALTA: $Dol < 0$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	8			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	351	58.99%
	9			ALTA: $CBR > 3$	24	4.03%
	Sin familia		Sin dato		90	15.13%
Cantidad Total de Elementos Seleccionados					595	100.00%

Analizando el contenido de los cuadros anteriores se tiene que de los 65.480 elementos viales que podrían ser clasificados, los relacionados como "Sin familia" no cuentan con datos de SN o Dol (Total de elementos clasificados "Sin familia" = 7.282).

Teniendo en cuenta lo anterior, con el fin de obtener un valor de SN o Dol asociado a los elementos que clasifican como "Sin familia", se procedió a buscar dichos elementos en la base de datos original. El resultado de la consulta mencionada se relaciona a continuación:

Tabla 8. Distribución de elementos viales según familias de deterioro para pavimentos flexibles en Bogotá D.C.

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRAFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	No. ELEMENTOS	% ELEMENTOS	
FLEXIBLE	1	BAJO (T0 Y T1)	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	585	1.26%	
	2			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	3983	8.61%	
	3			ALTA: $CBR > 3$	672	1.45%	
	4		MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	3087	6.67%
	5				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	18117	39.16%
	6				ALTA: $CBR > 3$	5160	11.15%
	7		ALTA: $SN > 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	263	0.57%
	8				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	1406	3.04%
	9				ALTA: $CBR > 3$	512	1.11%
	10	MEDIO (T2 Y T3)	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	39	0.08%
	11				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	278	0.60%
	12				ALTA: $CBR > 3$	218	0.47%
	13		MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	787	1.70%
	14				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	4493	9.71%
	15				ALTA: $CBR > 3$	2785	6.02%
	16		ALTA: $SN > 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	422	0.91%
	17				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	1464	3.16%
	18				ALTA: $CBR > 3$	544	1.18%
	19	ALTO (T4)	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	20				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	7	0.02%
	21				ALTA: $CBR > 3$	18	0.04%
	22		MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	25	0.05%
	23				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	140	0.30%
	24				ALTA: $CBR > 3$	339	0.73%
	25		ALTA: $SN > 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	91	0.20%
	26				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	187	0.40%
	27				ALTA: $CBR > 3$	126	0.27%
	28	MUY ALTO (T5)	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	29				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%
	30				ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%
	31		MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	32				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	2	0.00%
	33				ALTA: $CBR > 3$	101	0.22%

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRAFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	No. ELEMENTOS	% ELEMENTOS
	34		ALTA: SN > 4	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	6	0.01%
	35			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	22	0.05%
	36			ALTA: $CBR > 3$	75	0.16%
	Sin familia		Sin dato		308	0.67%
Cantidad Total de Elementos Clasificados					46262	100.00%

Tabla 9. Distribución de elementos viales según familias de deterioro para pavimentos rígidos en Bogotá D.C.

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRAFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	No. ELEMENTOS	% ELEMENTOS
RIGIDO	1	BAJO (T0 Y T1)	BAJA: Dol > 10	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	9	0.05%
	2			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	9	0.05%
	3			ALTA: $CBR > 3$	54	0.29%
	4		MEDIA: $0 < Dol \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	644	3.49%
	5			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	1831	9.92%
	6			ALTA: $CBR > 3$	2036	11.03%
	7		ALTA: Dol < 0	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	1965	10.65%
	8			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	1348	7.31%
	9			ALTA: $CBR > 3$	7560	40.97%
	10	MEDIO (T2 Y T3)	BAJA: Dol > 10	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	9	0.05%
	11			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	72	0.39%
	12			ALTA: $CBR > 3$	113	0.61%
	13		MEDIA: $0 < Dol \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	78	0.42%
	14			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	312	1.69%
	15			ALTA: $CBR > 3$	856	4.64%
	16		ALTA: Dol < 0	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	37	0.20%
	17			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	213	1.15%
	18			ALTA: $CBR > 3$	1147	6.22%
	19	ALTO (T4)	BAJA: Dol > 10	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	2	0.01%
	20			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	13	0.07%
	21			ALTA: $CBR > 3$	20	0.11%
	22		MEDIA: $0 < Dol \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	14	0.08%
	23			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	26	0.14%
	24			ALTA: $CBR > 3$	43	0.23%

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRAFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	No. ELEMENTOS	% ELEMENTOS
	25		ALTA: $Dol < 0$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	6	0.03%
	26			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	23	0.12%
	27			ALTA: $CBR > 3$	8	0.04%
	28	MUY ALTO (T5)	BAJA: $Dol > 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	29			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%
	30			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%
	31		MEDIA: $0 < Dol \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	32			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%
	33			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%
	34	ALTA: $Dol < 0$		BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	35			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%
	36			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%
		Sin familia		Sin dato		5
Cantidad Total de Elementos Clasificados					18453	100.00%

Tabla 10. Distribución de elementos viales según familias de deterioro para pavimentos flexibles de Transmilenio en Bogotá D.C.

TIPO DE SUPERFICIE	No. FAMILIA	TRÁFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	No. ELEMENTOS	% ELEMENTOS
TRANSMILENIO FLEXIBLE	1	ÚNICO	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	2			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%
	3			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%
	4	ÚNICO	MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	5			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%
	6			ALTA: $CBR > 3$	7	4.12%
	7	ÚNICO	ALTA: $SN > 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	66	38.82%
	8			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	69	40.59%
	9			ALTA: $CBR > 3$	6	3.53%
		Sin familia		Sin dato		22
Cantidad Total de Elementos Clasificados					170	100.00%

Tabla 11. Distribución de elementos viales según familias de deterioro para pavimentos rígidos de transmilenio en Bogotá D.C.

TIPO DE SUPERFICIE	No. FAMILIA	TRÁFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	No. ELEMENTOS	% ELEMENTOS
TRANSMILENIO RIGIDO	1	ÚNICO	BAJA: DoI > 10	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	2			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%
	3			ALTA: $CBR > 3$	2	0.34%
	4	ÚNICO	MEDIA: $0 < DoI \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	5			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	126	21.18%
	6			ALTA: $CBR > 3$	27	4.54%
	7	ÚNICO	ALTA: DoI < 0	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%
	8			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	351	58.99%
	9			ALTA: $CBR > 3$	85	14.29%
	Sin familia		Sin dato		4	0.67%
Cantidad Total de Elementos Clasificados					595	100.00%

Finalmente se tiene que de los 7.282 elementos viales de los cuales no se tenía valor de SN o DoI, una vez realizada la consulta en la base de datos original, sólo 339 tuvieron que ser eliminados de la selección porque no se les pudo asociar valor alguno.

Una vez se obtuvieron los elementos viales para ser clasificados en las posibles familias de deterioro, se procedió a estimar el número de elementos por familia "típica" según lo establecido en el contrato IDU No. 529 de 2002, sin embargo, una vez realizado este proceso se encontró que algunas familias establecidas como "típicas" no contaban con elementos viales que la conformaran, por lo tanto, la firma T.N.M. Limited procedió a determinar las familias "típicas" de deterioro según la selección actual de los elementos, siguiendo el procedimiento descrito en la metodología de dicho contrato, es decir:

- 1) Se estableció el número de elementos para cada familia de deterioro.
- 2) Se determinó el porcentaje de elementos que conformaban cada una de las familias
- 3) Se seleccionaron como familias "típicas" aquellas que presentaban porcentajes mayores o iguales al 2%.
- 4) Con el fin de dar cubrimiento a todas las categorías que no quedaron clasificadas como típicas, se incluyeron las familias con los mayores porcentajes menores a 2%.

A continuación, según el procedimiento descrito anteriormente, se presentan resaltadas en gris las nuevas familias "típicas" de deterioro. De igual forma, y con el fin de no dejar excluido ningún

elemento, las familias que no fueron consideradas como típicas se asociaron a aquellas que presentaban la mayor cantidad de parámetros en común:

Tabla 12. Formulación de nuevas familias “típicas” de deterioro para pavimentos flexibles en Bogotá D.C.

TIPO DE SUPERFICIE	No. FAMILIA	TRAFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	No. ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS	No. ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO	% ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO	
FLEXIBLE	1	BAJO (T0 Y T1)	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	585	1.27%	5240	11.40%	
	2			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	3983	8.67%			
	3			ALTA: $CBR > 3$	672	1.46%			
	4		MEDIA: $2 < SN \leq 4$	MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	3087	6.72%	3087	6.72%
	5				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	18117	39.42%	18117	39.42%
	6				ALTA: $CBR > 3$	5160	11.23%	5160	11.23%
	7		ALTA: $SN > 4$	ALTA: $SN > 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	263	0.57%	2181	4.75%
	8				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	1406	3.06%		
	9				ALTA: $CBR > 3$	512	1.11%		
	10	MEDIO (T2 Y T3)	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	39	0.08%	5815	12.65%	
	11			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	278	0.60%			
	12			ALTA: $CBR > 3$	218	0.47%			
	13		MEDIA: $2 < SN \leq 4$	MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	787	1.71%	2785	6.06%
	14				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	4493	9.78%		
	15				ALTA: $CBR > 3$	2785	6.06%		
	16		ALTA: $SN > 4$	ALTA: $SN > 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	422	0.92%	2430	5.29%
	17				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	1464	3.19%		
	18				ALTA: $CBR > 3$	544	1.18%		
	19	ALTO (T4)	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%	933	2.03%	
	20			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	7	0.02%			
	21			ALTA: $CBR > 3$	18	0.04%			
	22		MEDIA: $2 < SN \leq 4$	MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	25			0.05%
	23				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	140			0.30%
	24				ALTA: $CBR > 3$	339			0.74%
	25		ALTA: $SN > 4$	ALTA: $SN > 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	91			0.20%
	26				MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	187			0.41%
	27				ALTA: $CBR > 3$	126			0.27%

TIPO DE SUPERFICIE	No. FAMILIA	TRAFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	No. ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS	No. ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO	% ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO
	28	MUY ALTO (T5)	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%	206	0.45%
	29			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%		
	30			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%		
	31		MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%		
	32			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	2	0.00%		
	33			ALTA: $CBR > 3$	101	0.22%		
	34		ALTA: $SN > 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	6	0.01%		
	35			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	22	0.05%		
	36			ALTA: $CBR > 3$	75	0.16%		
Cantidad Total de Elementos Clasificados					45954	100.00%	45954	100.00%

Tabla 13. Formulación de nuevas familias “típicas” de deterioro para pavimentos rígidos en Bogotá D.C.

TIPO DE SUPERFICIE	No. FAMILIA	TRAFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	No. ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS	No. ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO	% ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO
RIGIDO	1	BAJO (T0 Y T1)	BAJA: $DoI > 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	9	0.05%	716	3.88%
	2			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	9	0.05%		
	3			ALTA: $CBR > 3$	54	0.29%		
	4		MEDIA: $0 < DoI \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	644	3.49%		
	5			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	1831	9.93%		
	6			ALTA: $CBR > 3$	2036	11.04%		
	7		ALTA: $DoI < 0$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	1965	10.65%		
	8			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	1348	7.31%		
	9			ALTA: $CBR > 3$	7560	40.98%		
	10	MEDIO (T2 Y T3)	BAJA: $DoI > 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	9	0.05%	194	1.05%
	11			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	72	0.39%		
	12			ALTA: $CBR > 3$	113	0.61%		
	13		MEDIA: $0 < DoI \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	78	0.42%		
	14			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	312	1.69%		
	15			ALTA: $CBR > 3$	856	4.64%		

TIPO DE SUPERFICIE	No. FAMILIA	TRAFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	No. ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS	No. ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO	% ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO
	16		ALTA: DoI < 0	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	37	0.20%	1397	7.57%
	17			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	213	1.15%		
	18			ALTA: $CBR > 3$	1147	6.22%		
	19	ALTO (T4)	BAJA: DoI > 10	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	2	0.01%	155	0.84%
	20			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	13	0.07%		
	21			ALTA: $CBR > 3$	20	0.11%		
	22		MEDIA: $0 < DoI \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	14	0.08%		
	23			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	26	0.14%		
	24			ALTA: $CBR > 3$	43	0.23%		
	25	ALTA: DoI < 0	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	6	0.03%			
	26		MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	23	0.12%			
	27		ALTA: $CBR > 3$	8	0.04%			
	28	MUY ALTO (T5)	BAJA: DoI > 10	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%		
	29			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%		
	30			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%		
	31		MEDIA: $0 < DoI \leq 10$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%		
	32			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%		
	33			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%		
34	ALTA: DoI < 0		BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%			
35			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%			
36			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%			
Cantidad Total de Elementos Clasificados					18448	100.00%	18448	100.00%

Tabla 14. Formulación de nuevas familias “típicas” de deterioro para pavimentos flexibles de transmlenio en Bogotá D.C.

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRÁFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	NÚMERO DE ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS	No. ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO	% ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO
TRANSMILENIO FLEXIBLE	1	ÚNICO	BAJA: $0 \leq SN \leq 2$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%	7	4.73%
	2			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%		
	3			ALTA: $CBR > 3$	0	0.00%		
	4	ÚNICO	MEDIA: $2 < SN \leq 4$	BAJA: $0 \leq CBR \leq 2$	0	0.00%		
	5			MEDIA: $2 < CBR \leq 3$	0	0.00%		
	6			ALTA: $CBR > 3$	7	4.73%		

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRÁFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	NÚMERO DE ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS	No. ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO	% ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO
	7	ÚNICO	ALTA: SN > 4	BAJA: $0 \leq \text{CBR} \leq 2$	66	44.59%	66	44.59%
	8			MEDIA: $2 < \text{CBR} \leq 3$	69	46.62%	69	46.62%
	9			ALTA: $\text{CBR} > 3$	6	4.05%	6	4.05%
Cantidad Total de Elementos Clasificados					148	100.00%	148	100.00%

Tabla 15. Formulación de nuevas familias “típicas” de deterioro para pavimentos rígidos de transmlenio en Bogotá D.C.

TIPO DE SUPERFICIE	NUMERO DE FAMILIA	TRÁFICO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CAPACIDAD SUBRASANTE	NÚMERO DE ELEMENTOS	% DE ELEMENTOS	No. ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO	% ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO
TRANSMILENIO RÍGIDO	1	ÚNICO	BAJA: $\text{DoI} > 10$	BAJA: $0 \leq \text{CBR} \leq 2$	0		128	21.66%
	2			MEDIA: $2 < \text{CBR} \leq 3$	0	0.00%		
	3			ALTA: $\text{CBR} > 3$	2	0.34%		
	4	ÚNICO	MEDIA: $0 < \text{DoI} \leq 10$	BAJA: $0 \leq \text{CBR} \leq 2$	0	0.00%	27	4.57%
	5			MEDIA: $2 < \text{CBR} \leq 3$	126	21.32%		
	6			ALTA: $\text{CBR} > 3$	27	4.57%		
	7	ÚNICO	ALTA: $\text{DoI} < 0$	BAJA: $0 \leq \text{CBR} \leq 2$	0	0.00%	351	59.39%
	8			MEDIA: $2 < \text{CBR} \leq 3$	351	59.39%		
	9			ALTA: $\text{CBR} > 3$	85	14.38%		
Cantidad Total de Elementos Clasificados					591	100.00%	591	100.00%

De lo anterior se tiene que finalmente se encontraron:

- 10 familias “típicas” de deterioro para pavimentos flexibles.
- 10 familias “típicas” de deterioro para pavimentos rígidos.
- 4 familias “típicas” de deterioro para pavimentos flexibles de transmlenio.
- 4 familias “típicas” de deterioro para pavimentos rígidos de transmlenio.

A continuación se detallan cada una de las familias “típicas” encontradas, de acuerdo al tipo de superficie, y en las gráficas adjuntas, se presenta la distribución de elementos por familia “típica” de deterioro para cada uno de los tipos de pavimento:

Tabla 16. Familias “típicas” de deterioro para pavimentos flexibles en Bogotá D.C.

FLEXIBLE	NUMERO DE FAMILIA	NÚMERO DE ELEMENTOS	% NUMERO DE ELEMENTOS
	Familia Típica Flexible 1	5240	11.40%
	Familia Típica Flexible 2	3087	6.72%
	Familia Típica Flexible 3	18117	39.42%
	Familia Típica Flexible 4	5160	11.23%
	Familia Típica Flexible 5	2181	4.75%
	Familia Típica Flexible 6	5815	12.65%
	Familia Típica Flexible 7	2785	6.06%
	Familia Típica Flexible 8	2430	5.29%
	Familia Típica Flexible 9	933	2.03%
	Familia Típica Flexible 10	206	0.45%
	Cantidad Total de Elementos Clasificados	45954	100.00%

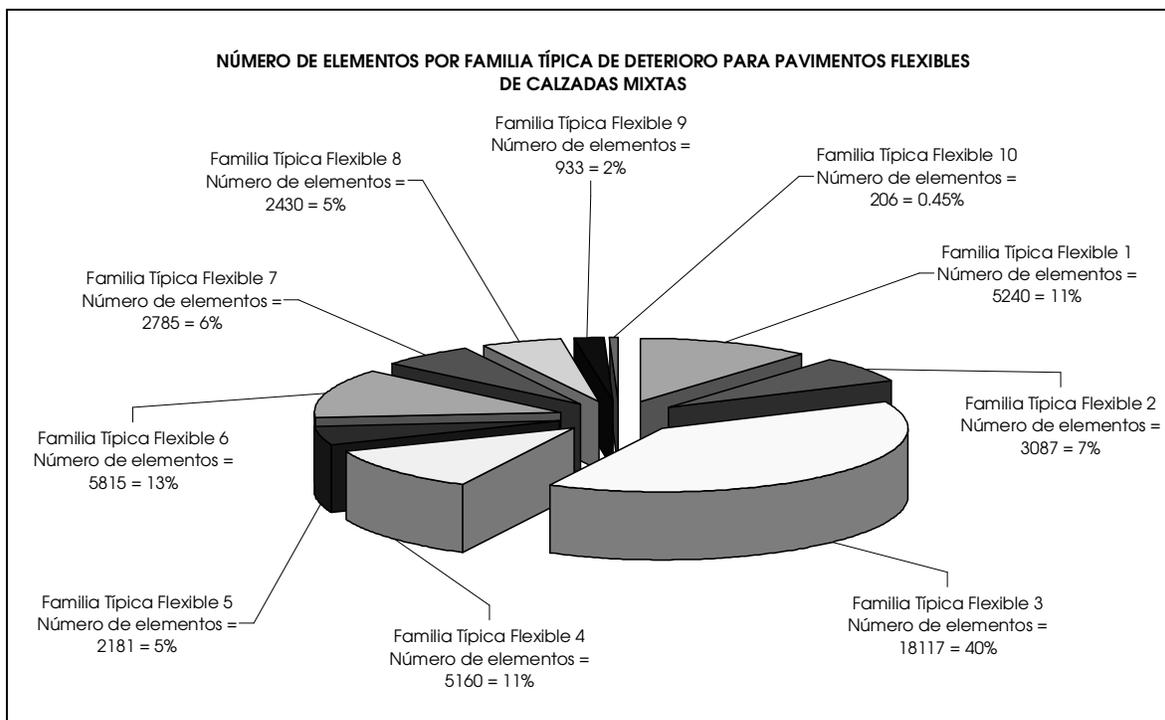


Figura 7. Distribución de familias “típicas” de deterioro para pavimentos flexibles en Bogotá D.C.

Tabla 17. Familias “típicas” de deterioro para pavimentos rígidos en Bogotá D.C.

	NUMERO DE FAMILIA	NÚMERO DE ELEMENTOS	% NUMERO DE ELEMENTOS
RIGIDO	Familia Típica Rígido 1	716	3.88%
	Familia Típica Rígido 2	1831	9.93%
	Familia Típica Rígido 3	2036	11.04%
	Familia Típica Rígido 4	1965	10.65%
	Familia Típica Rígido 5	1348	7.31%
	Familia Típica Rígido 6	7560	40.98%
	Familia Típica Rígido 7	194	1.05%
	Familia Típica Rígido 8	1246	6.75%
	Familia Típica Rígido 9	1397	7.57%
	Familia Típica Rígido 10	155	0.84%
	Cantidad Total de Elementos Clasificados	18448	100.00%

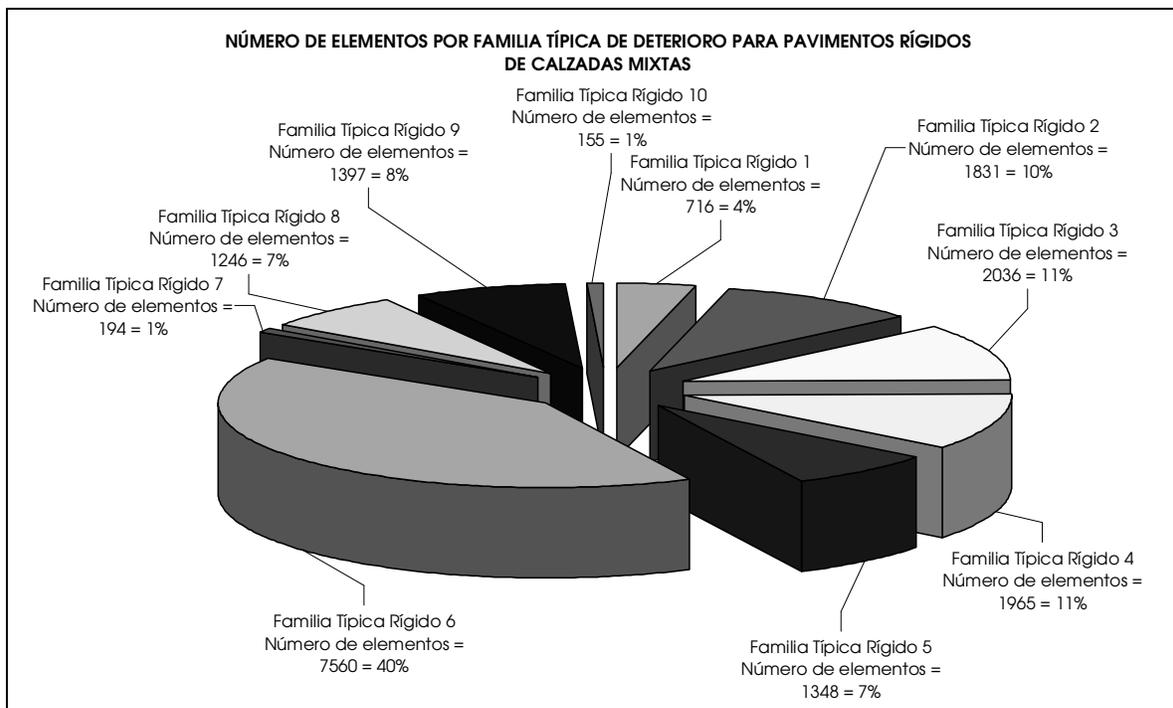


Figura 8. Distribución de familias “típicas” de deterioro para pavimentos rígidos en Bogotá D.C.

Tabla 18. Familias “típicas” de deterioro para pavimentos flexibles de transmilenio en Bogotá D.C.

TRANSMILENIO FLEXIBLE	NUMERO DE FAMILIA	NÚMERO DE ELEMENTOS	% NUMERO DE ELEMENTOS
	Familia Típica Transmilenio Flexible 1	7	4.73%
	Familia Típica Transmilenio Flexible 2	66	44.59%
	Familia Típica Transmilenio Flexible 3	69	46.62%
	Familia Típica Transmilenio Flexible 4	6	4.05%
	Cantidad Total de Elementos Clasificados	148	100.00%

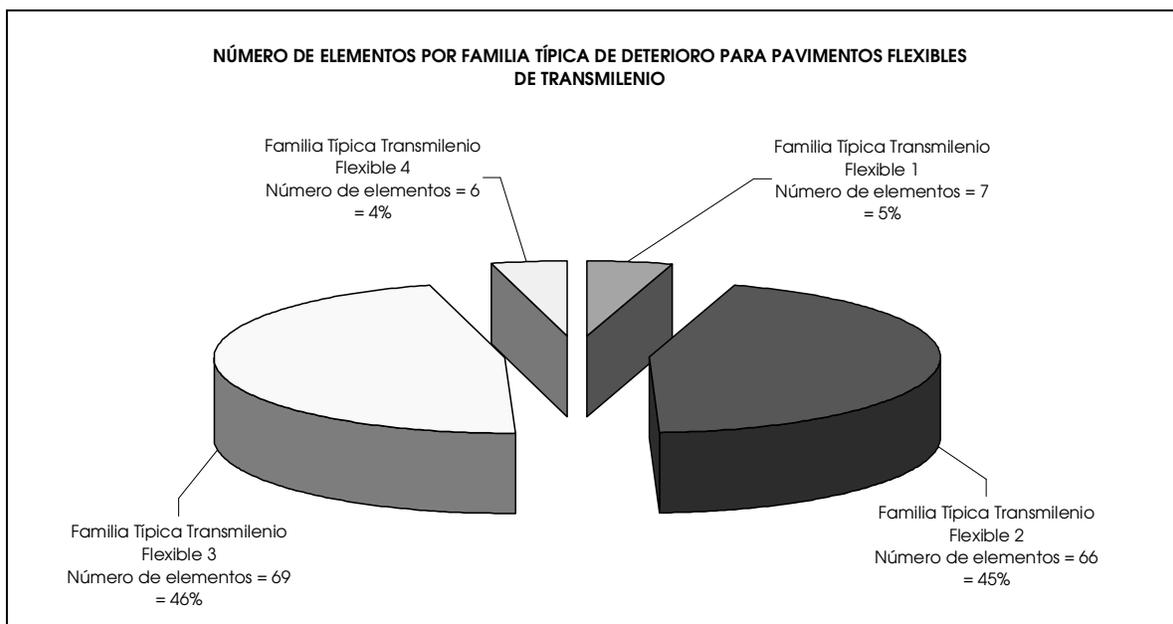


Figura 9. Distribución de familias “típicas” de deterioro para pavimentos flexibles de transmilenio en Bogotá D.C.

Tabla 19. Familias “típicas” de deterioro para pavimentos rígidos de transmlenio en Bogotá D.C.

TRANSMILENIO RIGIDO	NUMERO DE FAMILIA	NÚMERO DE ELEMENTOS	% NUMERO DE ELEMENTOS
	Familia Típica Transmlenio Rígido 1	128	21.66%
	Familia Típica Transmlenio Rígido 2	27	4.57%
	Familia Típica Transmlenio Rígido 3	351	59.39%
	Familia Típica Transmlenio Rígido 4	85	14.38%
	Cantidad Total de Elementos Clasificados	591	100.00%

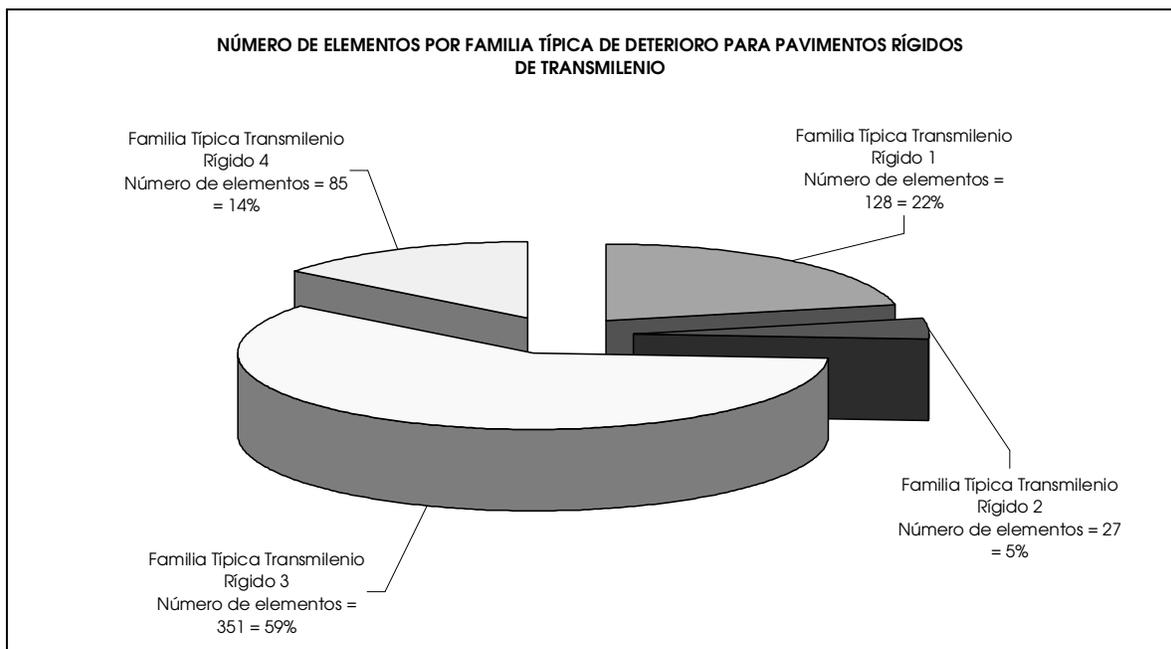


Figura 10. Distribución de familias “típicas” de deterioro para pavimentos rígidos de transmlenio en Bogotá D.C.

De otra parte, el tratamiento dado a los pavimentos adoquinados corresponde a la Metodología descrita en el **Apéndice 1**, en donde se plantea la formulación de familias “típicas” de deterioro para este tipo de pavimento de acuerdo con la combinación de los siguientes parámetros:

- Tipo de adoquín: adoquín en arcilla o adoquín en concreto.
- Nivel de tráfico.
- Capacidad de la subrasante.

A continuación se consignan los umbrales establecidos para la definición de las familias de deterioro para pavimentos adoquinados:

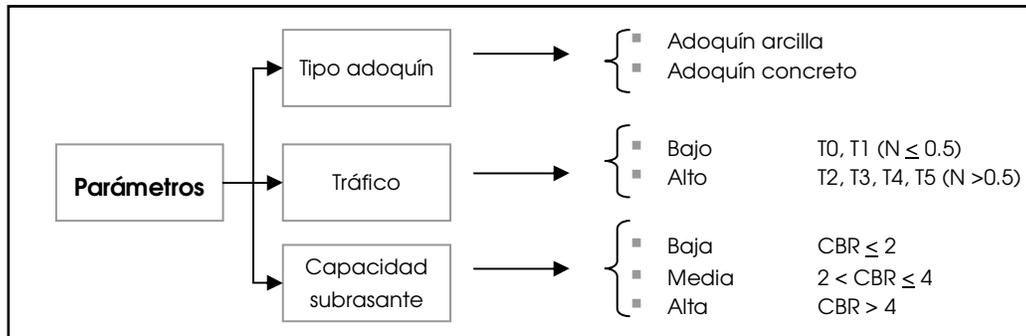


Figura 11. Umbrales para la definición de las familias “típicas” de deterioro de pavimentos adoquinados en Bogotá D.C.

Siguiendo un procedimiento similar al descrito para los otros tipos de estructura de pavimento, en cuanto al manejo de información de la base de datos, y teniendo en cuenta que fue proporcionada la base de datos normalizada, se procedió a realizar una consulta combinada entre dicha base y la original para establecer el número de elementos con superficie en adoquín que se podrían clasificar en familias “típicas”. Finalmente, de acuerdo con los umbrales establecidos para pavimentos adoquinados, se tiene que la distribución de los elementos viales obtenidos es la siguiente:

Tabla 20. Distribución de elementos viales según familias de deterioro para pavimentos adoquinados en Bogotá D.C.

Tipo de adoquín	Número de familia	Tránsito	Capacidad subrasante	Número elementos	% elementos
Adoquín en arcilla	1	Bajo (T0 y T1)	Baja $0 < \text{CBR} \leq 2$	227	24.6%
	2		Media $2 < \text{CBR} \leq 4$	50	5.4%
	3		Alta $\text{CBR} > 4$	18	1.9%
	4	Alto (T2, T3, T4 y T5)	Baja $0 < \text{CBR} \leq 2$	3	0.3%

Tipo de adoquín	Número de familia	Tránsito	Capacidad subrasante	Número elementos	% elementos
	5		Media $2 < \text{CBR} \leq 4$	0	0.0%
	6		Alta $\text{CBR} > 4$	1	0.1%
Adoquín en concreto	7	Bajo (T0 y T1)	Baja $0 < \text{CBR} \leq 2$	453	49.0%
	8		Media $2 < \text{CBR} \leq 4$	54	5.8%
	9		Alta $\text{CBR} > 4$	69	7.5%
	10	Alto (T2, T3, T4 y T5)	Baja $0 < \text{CBR} \leq 2$	42	4.5%
	11		Media $2 < \text{CBR} \leq 4$	0	0.0%
	12		Alta $\text{CBR} > 4$	7	0.8%
Cantidad Total de Elementos Clasificados				924	100.0%

Con base en el cuadro anterior, se procedió a determinar nuevamente las familias “típicas” de deterioro para pavimentos adoquinados siguiendo el procedimiento que se describe a continuación:

- 1) Se seleccionaron como familias “típicas” aquellas que presentaban porcentajes mayores o iguales al 2%.
- 2) Con el fin de dar cubrimiento a todas las categorías que no quedaron clasificadas como típicas, se incluyeron las familias con los mayores porcentajes menores a 2%.

A continuación, según el procedimiento descrito anteriormente, se presentan resaltadas en gris las nuevas familias “típicas” de deterioro. De igual forma, y con el fin de no dejar excluido ningún elemento, las familias que no fueron consideradas como típicas se asociaron a aquellas que presentaban la mayor cantidad de parámetros en común:

Tabla 21. Formulación de nuevas familias “típicas” de deterioro para pavimentos adoquinados en Bogotá D.C.

Tipo de adoquín	Número de familia	Tránsito	Capacidad subrasante	Número elementos	% elementos	No. ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO	% ELEMENTOS POR FAMILIA TÍPICA DE DETERIORO
Adoquín en arcilla	1	Bajo (T0 y T1)	Baja $0 < \text{CBR} \leq 2$	227	24.6%	227	24.6%
	2		Media $2 < \text{CBR} \leq 4$	50	5.4%	68	7.4%
	3		Alta $\text{CBR} > 4$	18	1.9%		
	4	Alto (T2, T3, T4 y T5)	Baja $0 < \text{CBR} \leq 2$	3	0.3%	4	0.4%
	5		Media $2 < \text{CBR} \leq 4$	0	0.0%		
	6		Alta $\text{CBR} > 4$	1	0.1%		
Adoquín en concreto	7	Bajo (T0 y T1)	Baja $0 < \text{CBR} \leq 2$	453	49.0%	453	49.0%
	8		Media $2 < \text{CBR} \leq 4$	54	5.8%	54	5.8%
	9		Alta $\text{CBR} > 4$	69	7.5%	69	7.5%
	10	Alto (T2, T3, T4 y T5)	Baja $0 < \text{CBR} \leq 2$	42	4.5%	49	5.3%
	11		Media $2 < \text{CBR} \leq 4$	0	0.0%		
	12		Alta $\text{CBR} > 4$	7	0.8%		

De lo anterior se tiene que finalmente se encontraron 7 familias “típicas” de deterioro para pavimentos adoquinados. A continuación se detallan cada una de las familias “típicas” encontradas:

Tabla 22. Familias “típicas” de deterioro para pavimentos adoquinados en Bogotá D.C.

ADOQUIN	NUMERO DE FAMILIA	NÚMERO DE ELEMENTOS	% NUMERO DE ELEMENTOS
	Familia Típica Adoquín 1	227	24.6%
Familia Típica Adoquín 2	68	7.4%	
Familia Típica Adoquín 3	4	0.4%	
Familia Típica Adoquín 4	453	49.0%	

	NUMERO DE FAMILIA	NÚMERO DE ELEMENTOS	% NUMERO DE ELEMENTOS
	Familia Típica Adoquín 5	54	5.8%
	Familia Típica Adoquín 6	69	7.5%
	Familia Típica Adoquín 7	49	5.3%
	Cantidad Total de Elementos Clasificados	924	100.0%

En la siguiente gráfica se presenta la distribución de elementos por familia “típica” de deterioro para pavimentos adoquinados:

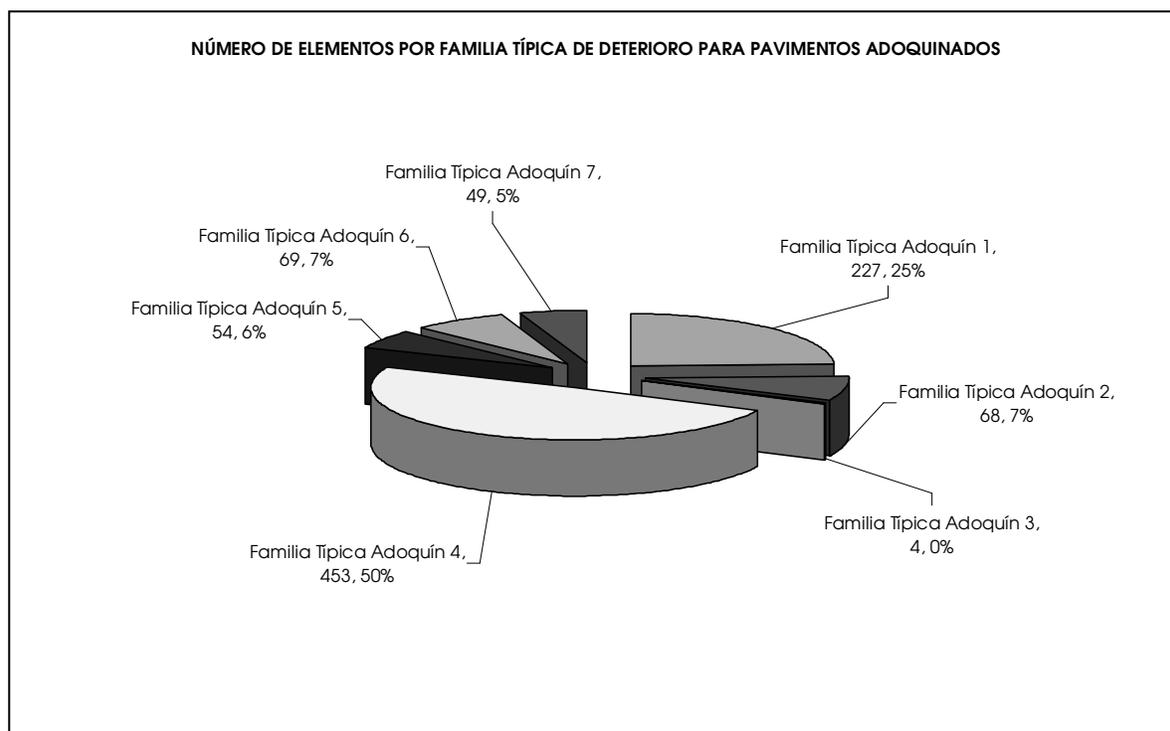


Figura 12. Distribución de familias “típicas” de deterioro para pavimentos adoquinados en Bogotá D.C.

Finalmente, en el **Anexo 1** se consignan planos de ubicación de las familias “típicas” de deterioro para pavimentos flexibles, rígidos, transmlenio y adoquines.

2.4. ESTIMACIÓN DE LA EDAD DE LOS PAVIMENTOS

Como se había hecho mención en el numeral 2.1 de verificación y recomendaciones, la edad de los pavimentos se constituye en una de las variables más importantes para poder aplicar convenientemente un modelo que deteriore los componentes estructurales y funcionales de la

estructura de pavimento. Por tal motivo, se hace necesario estimar esta variable para todos y cada uno de los elementos viales que conforman la malla vial de Bogotá.

Para llevar a cabo los cálculos requeridos, como fuente primaria de información se utilizó la base de datos de seguimiento a obras con póliza de estabilidad vigente, en donde se registran las fechas de terminación de los contratos de construcción, rehabilitación y mantenimiento de los segmentos viales. A partir de esta base de datos se determinó la edad para 12.686 elementos viales.

De otra parte, con el fin de determinar el índice de falla (MDR) y la condición global del pavimento (OPI), a estos elementos se les asoció el IRI del último contrato de inventario, así como las severidades y las extensiones para cada una de las fallas contempladas en la metodología PAVER 2 a partir de los valores consignados en la base de datos del IDU. A continuación se relacionan los tipos de fallas de la metodología PAVER 2 para pavimentos rígidos y flexibles, así como el código identificador de la falla en la base de datos:

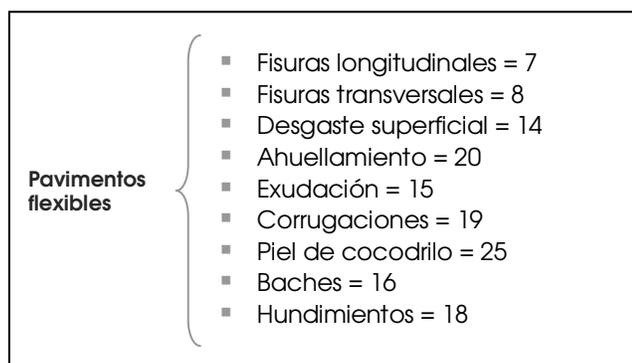


Figura 13. Fallas en pavimentos flexibles – Metodología PAVER 2.

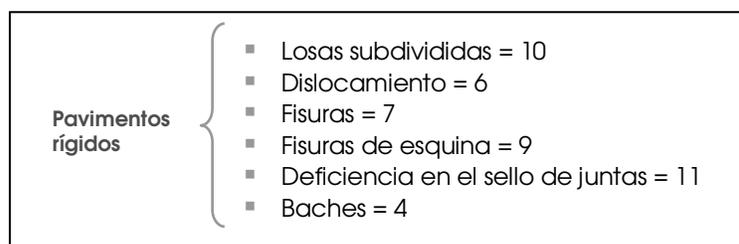


Figura 14. Fallas en pavimentos rígidos – Metodología PAVER 2.

Una vez asociadas las severidades y las extensiones para cada uno de los tipos de falla, se procedió a determinar el peso de cada una de estas mediante las ecuaciones de las curvas PAVER. Las curvas PAVER a emplear para la determinación de los pesos correspondientes para cada una de las fallas de pavimentos flexibles se consignan a continuación:

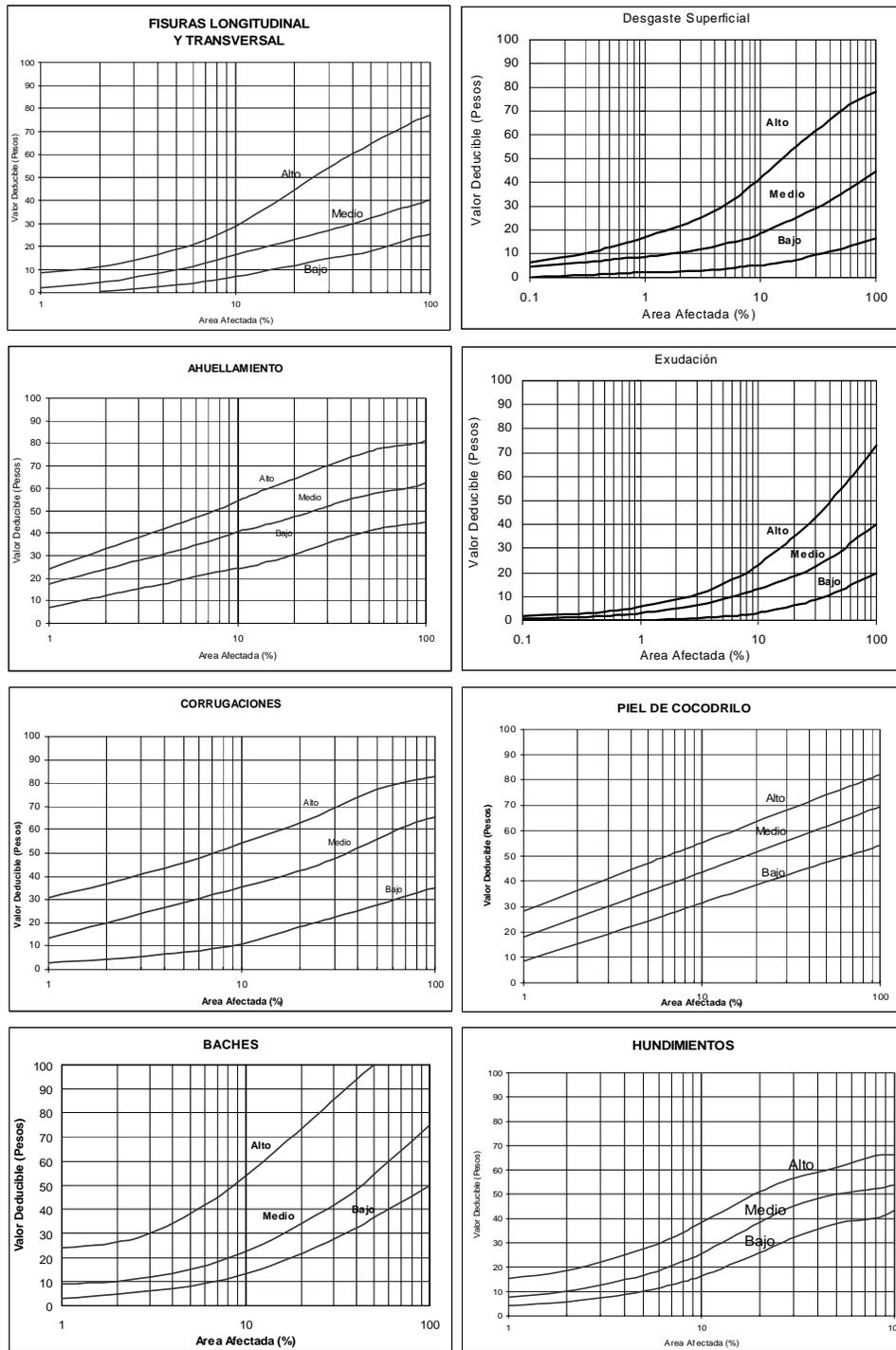


Figura 15. Curvas PAVER para pavimentos flexibles.

De igual forma, las curvas PAVER a emplear para la determinación de los pesos correspondientes para cada una de las fallas de pavimentos rígidos se consignan a continuación:

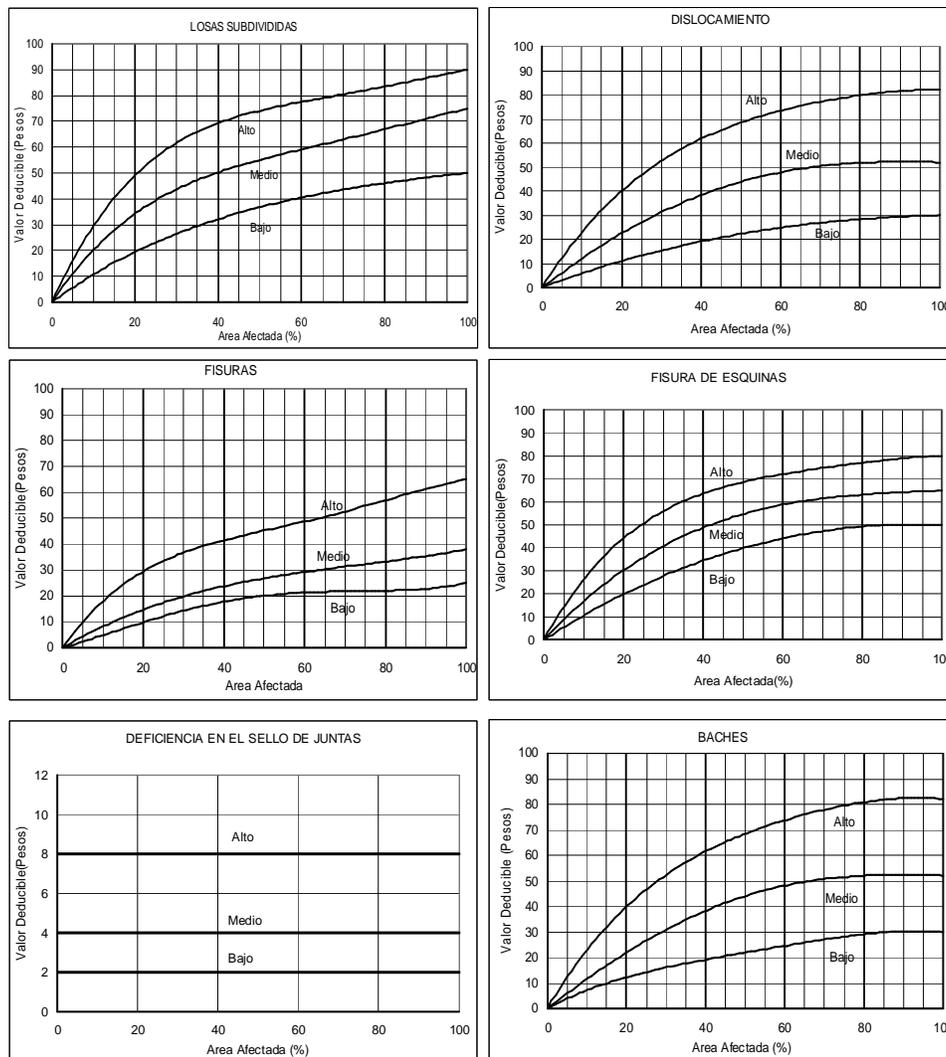


Figura 16. Curvas PAVER para pavimentos rígidos.

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, con base en los pesos calculados según las curvas PAVER, se procedió a calcular el valor del índice de falla (MDR) para cada uno de los 12.686 elementos viales de la siguiente forma:

$$MDR = 100 - \sqrt{\sum (P_n)^2}$$

Adicionalmente, a partir del valor del índice de falla (MDR) calculado mediante la anterior expresión, y del índice de rugosidad internacional (IRI) para el elemento vial, se obtuvo el valor del índice de condición global del pavimento OPI, así:

$$OPI = MDR * \left(\frac{5 * e^{0.198 - 0.000261 * IRI}}{5} \right)^{0.12}$$

Una vez calculado el OPI para cada uno de los 12.686 elementos, estos fueron clasificados en las familias “típicas” de deterioro para pavimentos flexibles y rígidos descritas en el numeral 2.3. del presente documento, y se generaron gráficas de OPI vs. Edad en que fue tomado el valor de OPI, es decir, que la edad corresponde a la diferencia entre la fecha en la cual se intervino el elemento y la fecha en la cual se realizó el inventario y diagnóstico del mismo. Es importante aclarar que debido a que la edad de los pavimentos flexibles y rígidos de transmilenio es conocida, no se hace necesario efectuar el procedimiento que se ha descrito para los elementos que conforman dicho sistema.

Posteriormente, sobre la nube de puntos de cada una de las gráficas se procedió a eliminar aquellos que se alejaban del comportamiento típico o que arrojaban valores incoherentes tales como la presencia de valores de OPI extremadamente bajos para edades muy cortas. Una vez efectuada dicha depuración de los datos, se aplicaron distintos modelos de regresión para encontrar la curva que presentaba mayor ajuste a la tendencia que marcaba la nube de puntos. Las ecuaciones encontradas para cada una de las familias se relacionan a continuación (ver **Anexo 2**):

Tabla 23. Ecuaciones de OPI vs. Edad para familias “típicas” de deterioro de pavimentos flexibles en Bogotá D.C.

FAMILIA	ECUACION
Familia 1	OPI = -6.7071*(EDAD)^2 + (12.22)*(EDAD) + 95.695
Familia 2	OPI = 1.5623*(EDAD)^2 + (-16.834)*(EDAD) + 102.87
Familia 3	OPI = -0.3455*(EDAD)^2 + (-2.1747)*(EDAD) + 98.22
Familia 4	OPI = -3.037*(EDAD)^2 + (0.6894)*(EDAD) + 95.004
Familia 5	OPI = -2.1651*(EDAD)^2 + (1.6723)*(EDAD) + 96.53
Familia 6	OPI = -4.8235*(EDAD)^2 + (-6.5712)*(EDAD) + 101.51
Familia 7	OPI = -6.1181*(EDAD)^2 + (-7.1545)*(EDAD) + 98.091
Familia 8	OPI = -5.6795*(EDAD)^2 + (4.803)*(EDAD) + 97.407
Familia 9	OPI = -5.4794*(EDAD)^2 + (5.3071)*(EDAD) + 94.183
Familia 10	OPI = -19.145*(EDAD)^2 + (4.3425)*(EDAD) + 94.99

Tabla 24. Ecuaciones de OPI vs. Edad para familias “típicas” de deterioro de pavimentos rígidos en Bogotá D.C.

FAMILIA	ECUACION
Familia 1	OPI = -0.3116*(EDAD)^2 + (-0.6005)*(EDAD) + 100.18
Familia 2	OPI = -1.4374*(EDAD)^2 + (4.6167)*(EDAD) + 98.451
Familia 3	OPI = -6.0197*(EDAD)^2 + (10.573)*(EDAD) + 98.061
Familia 4	OPI = -0.2253*(EDAD)^2 + (-0.3208)*(EDAD) + 99.563

FAMILIA	ECUACION
Familia 5	$OPI = -1.0582*(EDAD)^2 + (2.8549)*(EDAD) + 97.967$
Familia 6	$OPI = -1.5384*(EDAD)^2 + (3.5502)*(EDAD) + 96.265$
Familia 7	$OPI = -4.4478*(EDAD) + 100$
Familia 8	$OPI = -2.0401*(EDAD)^2 + (-6.4651)*(EDAD) + 98.025$
Familia 9	$OPI = -56.274*(EDAD)^2 + (51.215)*(EDAD) + 91.683$
Familia 10	$OPI = -76.092*(EDAD)^2 + (14.507)*(EDAD) + 100$

Como procedimiento alterno, a los elementos clasificados en las familias "típicas" de deterioro como pavimentos flexibles y como pavimentos rígidos (45.954 elementos flexibles y 18.448 elementos rígidos), se les calculó el valor del índice de falla (MDR) y de la condición global del pavimento (OPI) según la metodología descrita para los elementos de pólizas; de tal forma, que a partir de la ecuación de la curva de tendencia del OPI encontrada para cada familia "típica" de deterioro, fue posible determinar la edad de los elementos viales para los cuales ese dato era desconocido. En dicho proceso se supuso que una vez un elemento vial había sido intervenido su valor de OPI era igual a 100 .

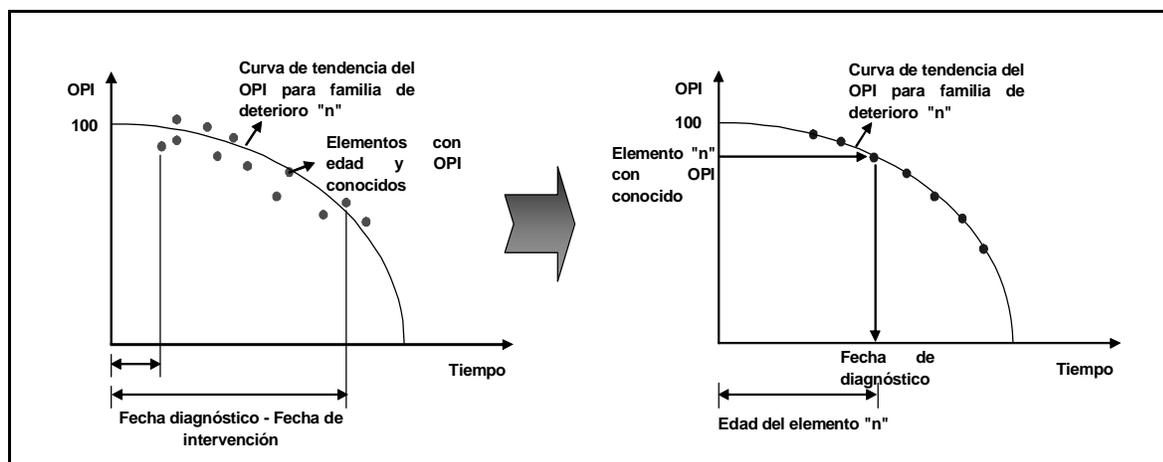


Figura 17. Estimación de edad del pavimento a partir de la curva de tendencia del OPI.

En los Cuadros y Figuras que se consignan a continuación, se presenta el número de elementos por rangos de edades para cada una de las familias "típicas" de deterioro de pavimentos flexibles y rígidos:

Tabla 25. Cantidad de elementos por rangos de edades para familias “típicas” de deterioro de pavimentos flexibles en Bogotá D.C.

FAMILIA	RANGOS						TOTAL
	0 - 2 Años	2 - 4 Años	4 - 6 Años	6 - 8 Años	8 - 10 Años	> 10 Años	
1	1902	2748	590	0	0	0	5240
2	2253	678	156	0	0	0	3087
3	8234	2407	2581	2202	1348	1345	18117
4	1664	1592	1904	0	0	0	5160
5	1329	497	242	113	0	0	2181
6	4277	1538	0	0	0	0	5815
7	1251	1534	0	0	0	0	2785
8	1545	729	156	0	0	0	2430
9	291	525	117	0	0	0	933
10	188	18	0	0	0	0	206
TOTAL	22934	12266	5746	2315	1348	1345	45954

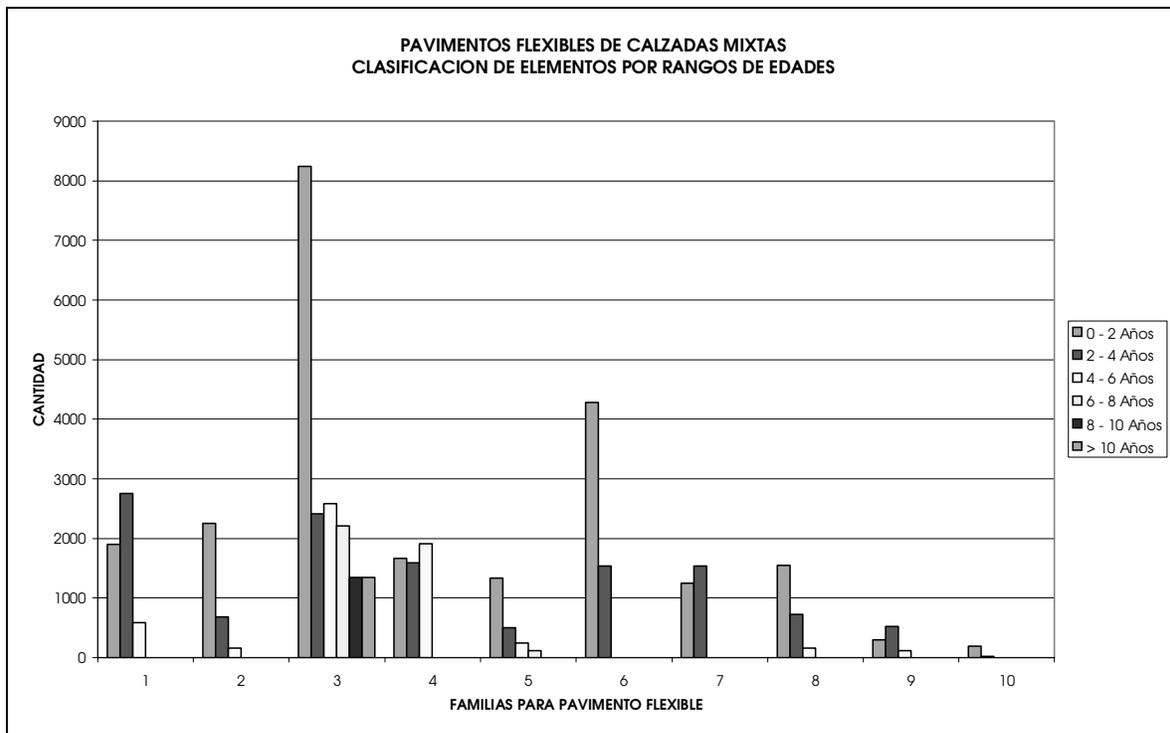


Figura 18. Distribución de elementos por rangos de edades para familias “típicas” de deterioro de pavimentos flexibles en Bogotá D.C.

Tabla 26. Cantidad de elementos por rangos de edades para familias “típicas” de deterioro de pavimentos rígidos en Bogotá D.C.

FAMILIA	RANGOS						TOTAL
	0 - 2 Años	2 - 4 Años	4 - 6 Años	6 - 8 Años	8 - 10 Años	> 10 Años	
1	258	101	73	65	51	168	716
2	0	1246	425	99	60	1	1831
3	313	1043	680	0	0	0	2036
4	824	138	504	173	120	206	1965
5	488	567	178	84	26	5	1348
6	482	4101	2048	822	107	0	7560
7	37	17	12	16	16	96	194
8	644	398	204	0	0	0	1246
9	1397	0	0	0	0	0	1397
10	155	0	0	0	0	0	155
TOTAL	4598	7611	4124	1259	380	476	18448

**PAVIMENTOS RIGIDOS DE CALZADAS MIXTAS
CLASIFICACION DE ELEMENTOS POR RANGOS DE EDADES**

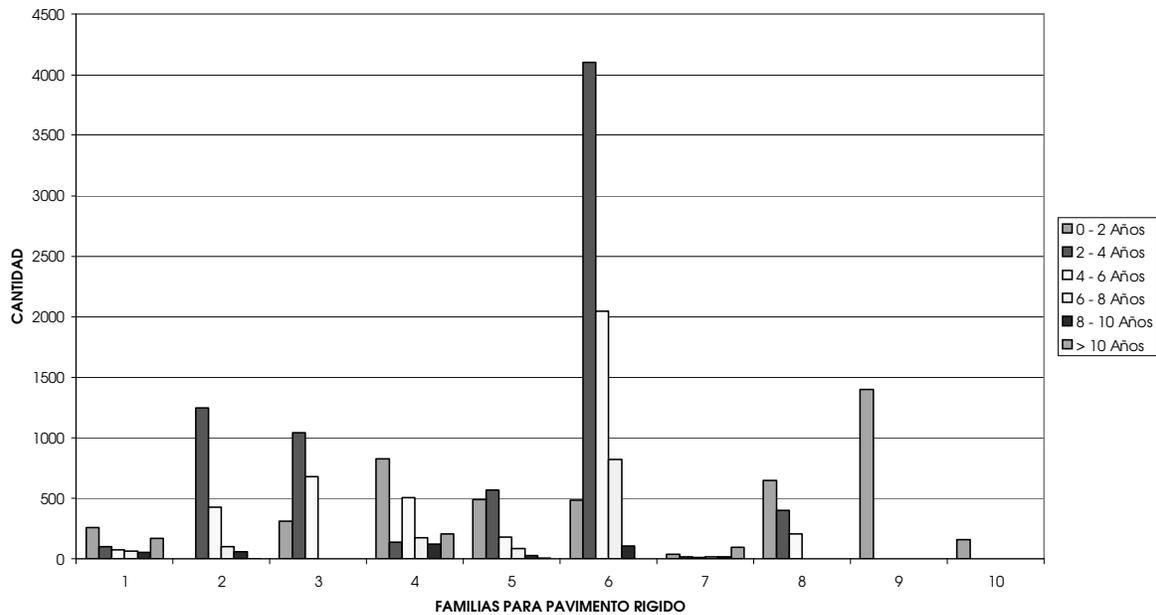


Figura 19. Distribución de elementos por rangos de edades para familias “típicas” de deterioro de pavimentos rígidos en Bogotá D.C.

De otra parte, para los pavimentos adoquinados se trató de efectuar el procedimiento descrito

anteriormente, sin embargo, al calcular el OPI para estos pavimentos de acuerdo con la metodología propuesta, el valor que se obtuvo era de 100 para la gran mayoría de los elementos.

De lo anterior se concluye que al momento de hacer el inventario de pavimentos adoquinados, la edad de construcción de los mismos era muy corta, y por tal razón se puede adoptar como edad general para los pavimentos adoquinados un promedio de la consignada en la base de datos de pólizas.

2.5. DEFINICION DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA

El tamaño de la muestra es un elemento de suma importancia, ya que la confiabilidad del estudio depende del valor que se escoja. Para estimar el tamaño de la muestra es necesario escoger el número de elementos viales de la malla vial de Bogotá que conforman cada una de las familias discriminadas para cada tipo de superficie, y el porcentaje mínimo de elementos viales en cada una de las familias típicas. El producto del número de elementos que conforman cada familia típica por el porcentaje mínimo encontrado, dará como resultado el tamaño de la muestra en cada familia. Por último, la suma de los elementos que conforman cada una de las muestras dará como resultado el tamaño de la muestra.

El número de elementos viales de la malla vial de Bogotá, que conforman cada una de las familias típicas, fue definido previamente, tal como se explicó en el análisis detallado del Numeral 2.3. Como se explicó anteriormente, los criterios de clasificación utilizados para la conformación de las familias fueron el tipo de pavimento, el tráfico, la capacidad estructural y la capacidad de soporte de la subrasante. Según los criterios mencionados se generaron diez (10) familias típicas para pavimentos flexibles de funcionalidad mixta, diez (10) familias típicas para pavimentos rígidos de funcionalidad mixta, cinco (5) familias típicas para pavimentos flexibles de funcionalidad Transmilenio, cinco (5) familias típicas para pavimentos rígidos de funcionalidad transmilenio y seis (6) familias típicas para pavimentos adoquinados (adoquin en arcilla y/o adoquin en concreto).

El porcentaje mínimo de elementos viales en cada familia típica de deterioro, se debe escoger lo más alto posible con el objeto de tener una mejor confiabilidad del estudio. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que los recursos públicos son limitados y que dado que es la primera vez que se realizará una calibración de este tipo en la ciudad, no existe un antecedente que permita estimar este porcentaje estadísticamente dado que se desconoce el nivel de dispersión y el error de estimación que conlleva este proceso. En el Numeral 2.11 "Plan de Trabajo Propuesto para las Fases Subsiguientes del Proyecto", se analiza y se recomienda sobre la definición del tamaño de la muestra para las siguientes fases a implementar en la Calibración de las curvas de deterioro de los pavimentos en Bogotá D.C.

Inicialmente en la Fase I del proyecto, la Pontificia Universidad Javeriana recomendó como mínimo un tamaño de la muestra por familia de deterioro del 3% de elementos viales asociados a cada una de las familias encontradas, para conformar la muestra. Sin embargo, se decidió hacer el estudio tomando como muestra 2.408 elementos viales de la ciudad de Bogotá, lo que corresponde a un porcentaje de elementos viales aproximado al 3.64%. Por efectos prácticos y para hacer un análisis

completo sobre la totalidad de elementos viales, este valor se debe conservar en cada una de las familias típicas con el fin de conformar una muestra representativa.

La distribución del total de la muestra, teniendo en cuenta cada una de las familias típicas, y considerando que se seleccionaron 2.408 elementos como pistas, se representa en la siguiente tabla.

Tabla 27. Definición del Tamaño de la muestra

TIPO DE SUPERFICIE	FAMILIA	CANTIDAD DE ELEMENTOS VIALES
Pavimento Flexible	Familia 1	191
	Familia 2	113
	Familia 3	659
	Familia 4	188
	Familia 5	79
	Familia 6	212
	Familia 7	100
	Familia 8	89
	Familia 9	34
	Familia 10	8
		TOTAL FLEXIBLES
Pavimento Rígido	Familia 1	77
	Familia 2	45
	Familia 3	265
	Familia 4	75
	Familia 5	32
	Familia 6	85
	Familia 7	39
	Familia 8	36
	Familia 9	14
	Familia 10	4
		TOTAL RIGIDOS
Familias Restantes (Transmilenio y Pavimento Adoquinado)	Adoquín en Arcilla	12
	Adoquín en Concreto	23
	Transmilenio Flexible	6
	Transmilenio Rígido	22
	TOTAL RESTANTES	63
TOTAL ELEMENTOS		2408

2.6. DEFINICION DE LA MUESTRA DE ELEMENTOS VIALES QUE SERVIRAN COMO PISTAS

Tenidndo ya definido la cantidad de elementos, para cada tipo de pavimento, se procedió a seleccionar de la base de datos del IDU, los 2408 elementos que servirán como pistas. Las pistas se seleccionarán según la cantidad de elementos que se anotan a continuación:

• Pavimento Flexible de Calzadas Mixtas	1.673 elementos
• Pavimentos Rígidos de Calzadas Mixtas	672 elementos
• Pavimento Flexible de Calzadas Transmilenio	6 elementos
• Pavimento Rígido de Calzadas Transmilenio	22 elementos
• Pavimentos Adoquinados(Adoquín de Arcilla)	12 elementos
• Pavimentos Adoquinados(Adoquín de Concreto)	23 elementos

Para la selección de los elementos se tuvieron en cuenta aspectos de inventario y diagnóstico para cada uno, tales como:

- La funcionalidad de los elementos debe ser vehicular.
- Los elementos deben tener el dato de la edad de pavimento.
- La longitud de los elementos debe encontrarse entre 50 y 100 metros.
- El elemento debe tener un Índice de Condición Global de Pavimento bueno (OPI > 70), con el fin de poder llevar un seguimiento suficiente antes de hacerse necesaria su rehabilitación.

El procedimiento que se describe a continuación es el que siguió para la selección de pistas de pavimentos flexibles de calzadas Mixtas. Sin embargo, es el mismo procedimiento que se adoptó para cada tipo de estructura encontrada.

A partir de la información tabulada sobre segmentos viales intervenidos en contratos recientes, entregada por el IDU, se procedió a analizar la información con el fin de extraer de allí la mayor cantidad de elementos que fuera posible, ya que la información contenida en estos archivos contempla fecha de intervención, espesores de la estructura, TPD, CBR y SN.

Se procedió a filtrar los segmentos con longitudes mayores a 50 metros. Posteriormente se clasificaron los elementos en las familias típicas de deterioro encontradas con anterioridad. De esta manera se obtuvieron sólo algunos de los elementos que cumplieran con las condiciones impuestas.

La búsqueda de elementos se complementó con la información entregada en el archivo "Segmentos con póliza". En este archivo se tiene información de la fecha de terminación de los contratos de construcción, rehabilitación y mantenimiento de los segmentos viales.

Sabiendo que para Pavimentos Flexibles de Calzadas Mixtas se identificaron 10 familias típicas, se buscó una cantidad de elementos para las pistas, proporcional a la cantidad de elementos de cada familia que se encontró en la distribución inicial, así:

Familia 1	11.40 %	Familia 6	12.65 %
Familia 2	6.72 %	Familia 7	6.06 %
Familia 3	39.42 %	Familia 8	5.29 %
Familia 4	11.23 %	Familia 9	2.03 %
Familia 5	4.75 %	Familia 10	0.45 %

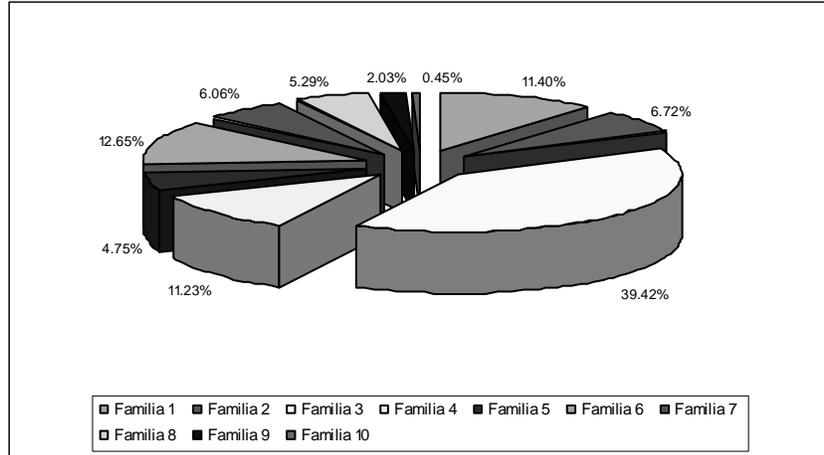


Figura 20. Distribución porcentual de elementos con Pavimento Flexible en Calzadas Mixtas.

De igual manera para pavimentos rígidos se identificaron 10 familias, y la distribución de los elementos clasificados previamente es la siguiente:

Familia 1	3.88 %	Familia 6	40.98 %
Familia 2	9.93 %	Familia 7	1.05 %
Familia 3	11.04 %	Familia 8	6.75 %
Familia 4	10.65 %	Familia 9	7.57 %
Familia 5	7.31 %	Familia 10	0.84%

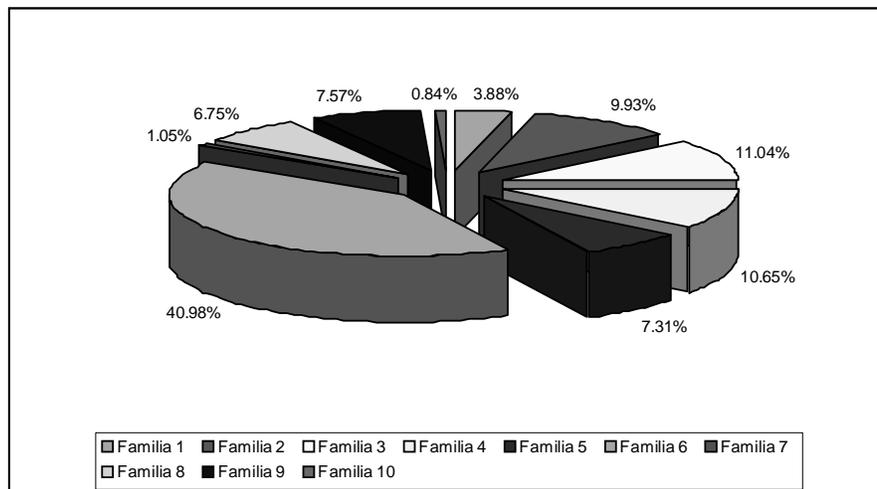


Figura 21. Distribución porcentual de elementos con Pavimento Rígido en Calzadas Mixtas.

Para algunas de las familias no se pudo completar el porcentaje requerido según la distribución anterior, siendo necesario completar el mismo con elementos que cumplieran tres (3) de esas condiciones, optando por tomar elementos calzada con funcionalidad vehicular, con longitud entre 50 y 100 metros y con OPI > 70.

En el **Anexo 3**, se presentan las tablas con los elementos seleccionados para la calibración. Esta información corresponde a la ubicación del segmento, dirección y localidad, y la longitud de cada elemento. Estos datos fueron tomados de la base de datos del IDU.

2.7. TRABAJO DE CAMPO

Para el inicio de las actividades propias de la toma de información en campo, se consideró necesario hacer una verificación de los elementos viales seleccionados en la oficina, con el fin de eliminar los factores de error que se pudieron presentar durante la selección. Inicialmente se escogió una muestra de 2408 elementos viales distribuidos por toda la ciudad. La selección se basó en el tipo de superficie del pavimento y en la respectiva familia. En la selección se guardaron los mismos porcentajes de la muestra global que hay en la ciudad de Bogotá para las familias de cada superficie seleccionadas.

La selección de la muestra se hizo en la oficina de TNM Limited a partir de la información disponible de los elementos viales de la ciudad. Se escogieron elementos ubicados en todas las localidades que conforman el distrito capital a excepción de Sumapaz, la cual deberá ser incluida en Fases posteriores. En la siguiente tabla se resume el listado de elementos seleccionado inicialmente, distribuidos por localidad.

Tabla 28. Distribución de los elementos escogidos por localidad.

Localidad	Cantidad de Elementos
ANTONIO NARIÑO	97
BARRIOS UNIDOS	38
BOSA	39
CANDELARIA	29
CHAPINERO	79
CIUDAD BOLÍVAR	99
ENGATIVA	329
FONTIBÓN	76
KENNEDY	241
MÁRTIRES	69
PUENTE ARANDA	251
RAFAEL URIBE	109
SAN CRISTÓBAL	166
SANTA FE	35
SUBA	283
TEUSAQUILLO	19

Localidad	Cantidad de Elementos
TUNJUELITO	133
USAQUEN	298
USME	23
TOTAL	2408

Los principales parámetros que se analizaron para llevar a cabo la verificación en campo de los elementos seleccionados fueron:

- Longitud del elemento: Se midió la longitud del elemento seleccionado que debería ser superior a 50m.
- Estado del pavimento: Se comprueba que el estado el pavimento se aceptable de manera que se pueda realizar el seguimiento de daños sin una intervención durante el proceso.
- Geometría del Eje del elemento: Se observa que el elemento no presente mucha curvatura. El proceso de georreferenciación de fallas se hará a partir de los puntos ya georeferenciados para cada segmento y una curvatura muy pronunciada en el elemento puede afectar los cálculos.
- Pendiente del elemento: La pendiente del elemento no puede ser muy alta ya que esta impide una adecuada georreferenciación de las fallas de manera similar a como se explica en el item anterior.

Durante cerca de tres (3) semanas, hasta mediados del mes de Enero de 2005, se realizó la primer etapa de verificación que consistió en la visita a los elementos inicialmente escogidos y la revisión de los parámetros citados anteriormente.

De esta primera etapa de verificación, se obtuvo una base de 1813 elementos aprobados para la realización del estudio. Sin embargo en 595 elementos se debió repetir el proceso, iniciando por una nueva selección, la cual se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 29. Distribución de los elementos que se deben verificar en la segunda etapa.

Localidad	Cantidad Elementos
Rafael Uribe	89
Tunjuelito	3
Ciudad Bolívar	6
Bosa	67
Antonio Nariño	22
Usme	41
Mártires	5
Santa Fe	2
Teusaquillo	8
Fontibón	81

Localidad	Cantidad Elementos
Kennedy	69
Barrios Unidos	22
Chapinero	43
Engativa	72
Puente Aranda	14
Suba	38
Usaquen	13
TOTAL	595

Este proceso de verificación en campo, se terminó en su segunda etapa, encontrando aún elementos que era necesario cambiar y volver a repetir el proceso de selección y verificación. Sin embargo, ya se contaba con una cantidad de elementos debidamente verificados en campo, como para iniciar el trabajo de medición de fallas georeferenciadas en las pistas seleccionadas.

De acuerdo a las recomendaciones consignadas en el informe final de la fase I sobre la metodología a utilizar para el cálculo del índice de falla MDR, se recomendó la metodología PAVER por tener los tipos de fallas que más se presentan en los elementos viales de la zona de estudio. La propuesta consignada en la fase I contempla de igual forma la inclusión de algunas fallas que no tiene en cuenta la metodología PAVER, razón por la cual se recomendó la metodología PAVER 2 que tiene en cuenta las siguientes fallas superficiales y estructurales:

Pavimentos Flexibles.

1. Fisura Longitudinales.
2. Fisura Transversales.
3. Desgaste Superficial.
4. Ahuellamiento.
5. Exudación.
6. Corrugación.
7. Piel de Cocodrilo.
8. Baches.
9. Hundimiento.

Pavimento Rígido

1. Losas subdivididas.
2. Dislocamiento.
3. Fisuras.
4. Fisuras de Esquina.
5. Deficiencia en el sello de junta.
6. Baches

Pavimento Adoquinados.

1. Ahuellamiento.
2. Desunión.
3. Huecos.
4. Fisuración.
5. Escalonamiento.
6. Hundimientos.

La metodología PAVER 2 exige adicionalmente al tipo de falla, el conocimiento de la severidad de la falla (puede ser baja, media o alta) y la extensión de la falla en términos de porcentaje de área fallada con respecto al área total del elemento vial auscultado. Con la información del tipo, la severidad y la extensión de la falla es posible determinar el índice de falla MDR.

Adicional al inventario de fallas superficiales, se exigía conformar una base de datos, con las fallas georeferenciadas. Georeferenciar se refiere a ubicar geográficamente un punto en el espacio con respecto a una referencia dada, de la cual se conoce su posición en dicho espacio.

Dado que los elementos viales que componen la base de inventario y diagnóstico del IDU se encuentran georeferenciados en la cobertura Malla Vial a través de las coordenadas X y Y iniciales de cada elemento, se recomendó para el trabajo de campo que la referencia para la ubicación de cada una de las fallas sea de acuerdo a éstas coordenadas iniciales.

Las coordenadas iniciales de cada elemento vial están consignadas en dos campos de la base de datos de inventario y diagnóstico del IDU, denominados $X_{\text{mínimo}}$ y $Y_{\text{mínimo}}$, campos cuyos valores espacialmente corresponden a la intersección entre el elemento vial en estudio y el elemento vial que le genera la nomenclatura.

A partir de las coordenadas $X_{\text{mínimo}}$ y $Y_{\text{mínimo}}$, se ubicaron las fallas dentro del segmento inventariado. Para esto se midieron las distancias X y Y, que corresponde a las proyecciones sobre el eje del segmento y sobre el eje perpendicular al mismo de la distancia entre el nodo inicial y la ubicación de la falla. Para las fallas de pavimento rígido donde se calcule sobre las dimensiones de la losa, se ubicó el centro de la losa y para las demás fallas se ubicará el centro de la falla.

La referencia del Nodo Inicial (coordenadas $X_{\text{mínimo}}$ y $Y_{\text{mínimo}}$) se dejó materializada sobre el pavimento mediante una puntilla y pintura sobre la misma. Al dejar materializado este nodo de inicio, se contaba con información para las demás mediciones en campo.

En la siguiente figura se ilustra brevemente el proceso de georreferenciación.

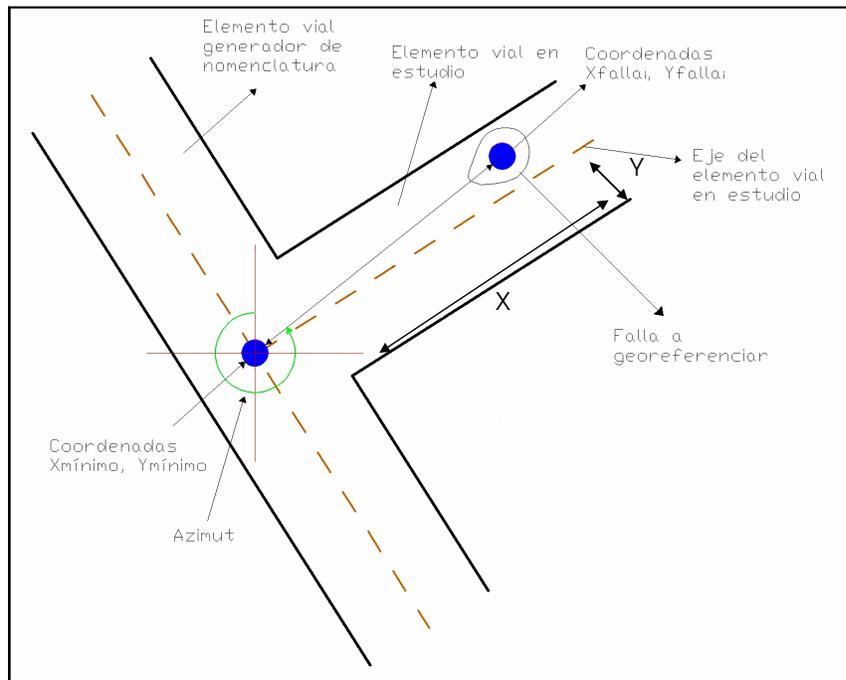


Figura 22. Proceso de georreferenciación de fallas.

La tercera verificación de elementos viales, que se estaba adelantando simultáneamente con la georreferenciación de daños superficiales, se canceló a partir de la comunicación IDU-59-31 emitida por la Interventoría el día 26 de enero del año en curso y en la cual solicitaban, a petición del Instituto de Desarrollo Urbano-IDU, la cotización de las siguientes actividades tendientes a variar el alcance de los estudios del contrato:

- Suprimir la medición de fallas en las pistas.
- Suprimir la medición del IRI.
- Determinación del espesor real del pavimento rígido mediante la extracción de núcleos.
- Determinación del espesor real del pavimento flexible empleando un georradar para tal fin.
- Determinación del tráfico promedio diario mediante conteos de 15 minutos en cada una de las pistas seleccionadas.
- Entrega de la Base de Datos en programa Excel o Access.

T.N.M. analizó, desde el punto de vista técnico y económico, el impacto que se generaba al variar el alcance inicial del contrato y presentó su propuesta la cual incluía una disminución notable del tamaño de la muestra. Adicionalmente, ante la inquietud por parte de la Interventoría de la verificación de los datos arrojados por el Georradar respecto al espesor de la estructura del pavimento, se explicó que con el fin de obtener una certeza absoluta de los datos entregados se deberían llevar a cabo apiques en todos los elementos analizados. Ante esta nueva eventualidad, se propuso ejecutar apiques en todas las pistas con pavimento flexible, en reemplazo del estudio con Georradar.

A raíz de las reuniones realizadas en las que participaron la Interventoría, el IDU y esta consultoría, se procedió a suspender las labores de medición de fallas georeferenciadas en las pistas desde el día 11 de febrero, acordando que se reconocería el pago del levantamiento de fallas realizados hasta la fecha en mención.

Del tamaño de la muestra inicial de 2408 elementos, se redujo a 1078 elementos, los cuales incluirán la información correspondiente a:

- Espesor del Pavimento mediante la ejecución de apiques y sondeos
- Volumen de Tráfico, extrapolado a partir de los conteos de 15 minutos.
- Medición de Deflectometría para el cálculo del SN y DOL.

Cabe anotar que de los 1078 elementos que serán entregados, existen 89 elementos que contaban con información reciente y por tanto no se vió la necesario de realizar nuevamente la toma de datos en campo, de allí que la muestra a la cual se le van a realizar todas las actividades nuevas mencionadas anteriormente, equivalen a los 989 elementos restantes para completar el tamaño total de la muestra.

La selección de los 989 elementos se hizo teniendo en cuenta el tipo de pavimento y su respectiva familia, cumpliendo con el objetivo inicial de mantener los mismos porcentajes calculados para un tamaño de muestra muycho mayor.

Tabla 30. Cantidad de elementos por familia seleccionados. Muestra de 989 elementos.

FAMILIA	FLEXIBLE	RIGIDO	FLEXIBLE TRANSMILENIO	RIGIDO TRANSMILENIO	ADOQUIN ARCILLA	ADOQUIN CONCRETO
1	79	11		1	5	
2	45	27	1	1	1	
3	271	31	1	5		
4	77	31		2		8
5	33	20				1
6	87	110				
7	42	3				
8	36	19				
9	14	22				
10	3	2				
TOTAL	687	276	2	9	6	9

La selección de la muestra se hizo en la oficina del consultor a partir de la información disponible de los elementos viales y de la muestra inicial que contenía 2408 elementos. De igual manera se escogieron elementos ubicados de tal manera que se abarcara la mayor cantidad de localidades que conforman el distrito capital. En el cuadro siguiente se muestra el listado de elementos distribuidos por localidad. En el **Anexo 4** se representa la ubicación de los elementos seleccionados como pistas.

Tabla 31. Distribución de los 989 elementos escogidos por localidad.

LOCALIDAD	CANTIDAD DE ELEMENTOS
BARRIOS UNIDOS	1
BOSA	17
CANDELARIA	6
CHAPINERO	15
CIUDAD BOLÍVAR	40
ENGATIVA	128
FONTIBÓN	43
KENNEDY	129
MÁRTIRES	9
PUENTE ARANDA	165
RAFAEL URIBE	120
SAN CRISTÓBAL	4
SANTA FE	11
SUBA	137
TEUSAQUILLO	22
TUNJUELITO	47
USAQUEN	50
USME	45
TOTAL	989

Como ya se había iniciado el proceso de inventario y georeferenciación de fallas superficiales en el pavimento, se acordó entregar la información levantada. Se cuenta con información de fallas superficiales de 569 elementos viales. De estas 569 pistas, se encuentran 426 elementos que hacen parte del tamaño de la muestra final (989), seleccionados para el estudio.

Para este grupo de 569 elementos se entregará la información correspondiente a identificación, longitud y ancho del elemento, ubicación (localidad), listado de fallas georeferenciadas con su respectiva severidad y extensión y cálculo del MDR (Modified Distress Testing).

A partir de las modificaciones llevadas a cabo en el alcance del contrato, se procedió a iniciar los trabajos de realización de apiques y sondeos para definir la estructura del pavimento, y de conteos de 15 minutos para establecer el TPD en las pistas seleccionadas. Todos los procedimientos empleados en campo para la toma de información serán debidamente documentados en el siguiente Numeral.

2.8. PROCEDIMIENTOS PARA LA TOMA DE INFORMACION EN CAMPO

2.8.1. Levantamiento de Daños Superficiales

A continuación, se encuentra consignado el procedimiento para llevar a cabo la inspección, evaluación, inventario y diagnóstico en campo de las fallas superficiales y estructurales presentes tanto en pavimentos flexibles como en pavimentos rígidos.

De acuerdo a las recomendaciones consignadas en el informe final de la fase I sobre la metodología a utilizar para el cálculo del índice de falla MDR (PAVER 2), los tipos de fallas superficiales y estructurales que se deben medir en campo son los siguientes:

PAVIMENTOS FLEXIBLES

1. Fisura Longitudinal
2. Fisura Transversal
3. Desgaste Superficial
4. Ahuellamiento
5. Exudación
6. Corrugación
7. Piel de Cocodrilo
8. Baches
9. Hundimiento

PAVIMENTOS RIGIDOS

1. Losas Subdivididas
2. Dislocamiento
3. Fisuras
4. Fisuras de Esquina
5. Deficiencia en el sello de Junta
6. Baches

PAVIMENTOS ADOQUINADOS

1. Ahuellamiento
2. Desunión
3. Huecos
4. Fisuración
5. Escalonamiento

6. Hundimientos

Adicionalmente al tipo de falla, la metodología PAVER 2 exige para el cálculo del índice de falla MDR, conocer tanto la severidad de la falla (baja, media o alta) como su extensión en términos de porcentaje de área fallada con respecto al área total del elemento vial auscultado.

$$\% \text{ extensión} = \frac{\sum \text{Área afectada}}{\text{Área total}}$$

2.8.1.1. Descripción de los daños a evaluar en los Pavimentos Flexibles, y Severidades

Fisuras Longitudinales y Transversales

- Largo: Se mide la longitud en metros.
- Ancho: Se tendrá 0.10 m, para severidad baja, 0.15m para severidad media y 0.20 m para severidad alta.
- Se registra su severidad según la siguiente tabla:

Tabla 32. Severidad para las fisuras longitudinales y transversales

Severidad	Ancho de la fisura
Baja	0 – 20 mm
Media	20 – 25 mm
Alta	> 25 mm



Figura 23. Fisuras en pavimento flexible

Desgaste Superficial

- Largo y Ancho, se mide la longitud y el ancho en metros.
- Se registra su severidad según la siguiente tabla:

Tabla 33. Severidad del Desgaste Superficial

Severidad	Descripción del grado de severidad
Baja	Cuando la superficie ha perdido su textura uniforme y se muestra ligeramente áspera o rugosa, con irregularidades hasta de 3 mm aproximadamente.

Media	Cuando la profundidad de las irregularidades está entre 3 mm y 10 mm. Se observan las partículas de agregado grueso y se siente la vibración y una diferencia de sonido de las llantas al transitar sobre el pavimento.
Alta	Si en la superficie ha comenzado a producirse la desintegración superficial de la capa de rodadura y se presentan desprendimientos evidentes y partículas sueltas sobre la calzada

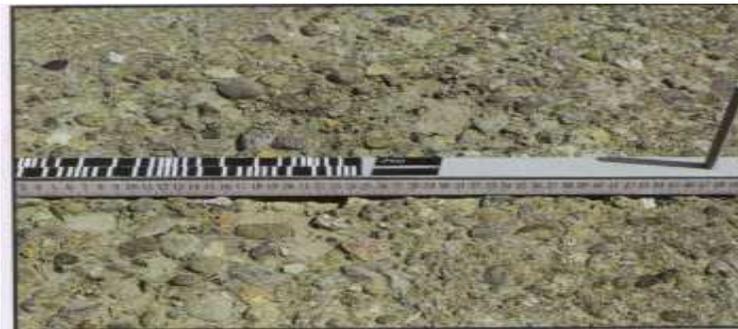


Figura 24. Desgaste Superficial en el pavimento flexible

Ahuellamientos

- Largo y Ancho, se mide la longitud y ancho del ahuellamiento en metros.
- Se registra su severidad según la siguiente tabla:

Tabla 34. Severidad de los Ahuellamientos

Severidad	Profundidad
Baja	0 – 3 cm
Media	3 – 5 cm
Alta	> 5 cm



Figura 25. Ahuellamiento en el pavimento flexible

Exudación

- Largo y Ancho, se mide la longitud y ancho de la exudación en metros.
- Con respecto a la severidad se expresa según la siguiente tabla:

Tabla 35. Severidad de la exudación

Severidad	Extensión (% de área afectada)
Baja	< 25%
Media	25% a 60%
Alta	> 60%



Figura 26. Exudación

Corrugación

- Largo y Ancho, se mide la longitud y ancho de la corrugación en metros.
- Se registra su severidad según la siguiente tabla:

Tabla 36. Severidad de la corrugación

Severidad	Profundidad
Baja	0 – 3 cm
Media	3 – 5 cm
Alta	> 5 cm



Figura 27. Corrugación

Piel de Cocodrilo

- Largo y Ancho, se mide la longitud y ancho de la piel de cocodrilo en metros.
- Se registra su severidad según la siguiente tabla:

Tabla 37. Severidad de la piel de cocodrilo

Severidad	Ancho de la fisura
Baja	< 5 mm
Media	5 – 7 mm
Alta	> 7 mm



Figura 28. Piel de Cocodrilo

Baches

- Largo y Ancho, se mide la longitud y ancho del bache en metros.
- Se registra su severidad según la siguiente tabla:

Tabla 38. Severidad de los baches

Severidad	Profundidad
Baja	< 5 cm

Media	5 – 7 cm
Alta	> 7 cm



Figura 29. Bache

Hundimiento

- Largo y Ancho, se mide la longitud y ancho del hundimiento en metros.
- Se registra su severidad según la siguiente tabla

Tabla 39. Severidad del Hundimiento

Severidad	Profundidad
Baja	0 – 3 cm
Media	3 – 5 cm
Alta	> 5 cm



Figura 30. Hundimiento

2.8.1.2. Descripción de los daños a evaluar en los Pavimentos Rígidos, y Severidades

Losas Subdivididas

Para cada losa que se encuentre subdividida se registrará:

- Ancho de la losa subdividida, en metros.
- Largo de la losa subdividida, en metros
- Su severidad según la siguiente tabla:

Tabla 40. Severidad para las losas subdivididas

Severidad	No. de Bloques
Baja	< 3
Media	3 – 4
Alta	> 4



Figura 31. Losa subdividida

Dislocamiento

Para **cada losa** que se encuentre con dislocamiento se registra:

- Ancho de la losa con dislocamiento, en metros.
- Largo de la losa con dislocamiento, en metros.
- Su severidad según la siguiente tabla:

Tabla 41. Severidad para el dislocamiento

Severidad	Altura (cm)
Baja	< 2
Media	2 – 3
Alta	> 3



Figura 32. Dislocamiento

Fisuras transversales, longitudinales y diagonales aisladas

- Longitud de la fisura, en metros.
- Ancho aferente. Se tendrá 0.10 m, para severidad baja, 0.15m para severidad media y 0.20 m para severidad alta.
- Se registra su severidad según la siguiente tabla:

Tabla 42. Severidad de las fisuras

Severidad	Ancho de la fisura
Baja	0 – 3 mm
Media	3 – 12 mm
Alta	> 12 mm



Figura 33. Fisuras en pavimento rígido

Fisuras de esquina

- Su severidad según la siguiente tabla:

Tabla 43. Severidad de la fisura de esquina

Severidad	Ancho de la fisura
Baja	0 – 1.5 mm
Media	1.5 – 3 mm
Alta	> 3 mm

- Longitud de la fisura, en metros.
- Ancho aferente. Se tendrá 0.10 m, para severidad baja, 0.15m para severidad media y 0.20 m para severidad alta.



Figura 34. Fisura de Esquina

Deficiencia en el sello de Juntas

- Se registra su severidad según la siguiente tabla:

Tabla 44. Severidad de la deficiencia en el sello de Juntas

Severidad	Longitud del total de la junta
Baja	< 20%
Media	20 – 40 %
Alta	> 40 %

- Longitud de la junta con deficiencia, en metros.
- Ancho aferente, se colocará igual a 0.50 m.



Figura 35. Deficiencia en el Sello

Baches

Para **cada losa** que presente bache se registra:

- Su severidad según la siguiente tabla:

Tabla 45. Severidad de los baches

Severidad	Profundidad
Baja	< 2.5 cm
Media	2.5 – 3.5 cm
Alta	> 3.5 cm

-
- Largo del bache, en metros.
- Ancho del bache, en metros.



Figura 36. Bache en pavimento rígido

2.8.1.3. Descripción de los daños a evaluar en los Pavimentos Adoquinados, y Severidades

Ahuellamiento

Esta falla consiste en un desplazamiento vertical del pavimento en la zona que ocupa la huella de los vehículos, relacionada con la acción de las cargas repetidas sobre la estructura.



Figura 37. Ahuellamiento en pavimentos adoquinados.

- Largo del Ahuellamiento, en metros.
- Ancho del Ahuellamiento, en metros.
- Su severidad según la siguiente tabla, de acuerdo a la profundidad de los mismos:

Tabla 46. Severidad de los ahuellamientos.

Severidad	Profundidad
Baja	< 25 mm
Media	25 – 50 mm
Alta	> 50 mm

Desunión

La desunión es una falla consistente en la pérdida del entramamiento entre adoquines contiguos debido a que la superficie del pavimento articulado tiende a moverse horizontalmente bajo la acción de fuerzas de tracción generadas por el paso de vehículos o por la pérdida de la arena llenante de juntas.



Figura 38. Desunión en pavimentos adoquinados.

- Largo y Ancho del Area afectada, en metros.
- La severidad de las desuniones se establece de la siguiente forma:

Tabla 47. Severidad de la desunión.

Severidad	Ancho (mm)
Baja	< 25
Media	25 – 50
Alta	> 50

Huecos

Falla consistente en la pérdida de uno o más adoquines, que deja expuestas a los agentes ambientales las capas inferiores de la estructura del pavimento.

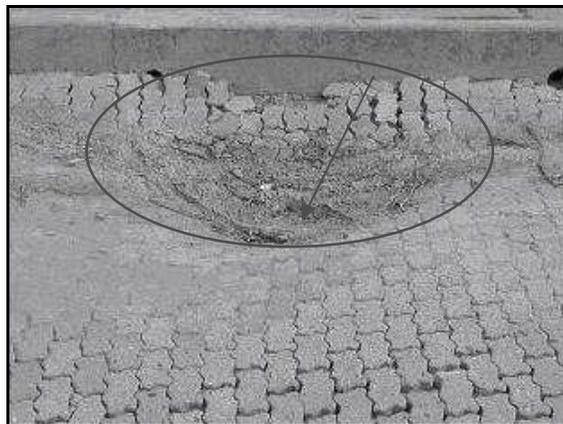


Figura 39. Huecos en pavimentos adoquinados.

Se debe registrar para cada hueco:

- Longitud, en metros.
- Ancho, en metros.

- La severidad de los huecos se establece de la siguiente forma, de acuerdo a la profundidad del mismo:

Tabla 48. Severidad de los huecos.

Severidad	Profundidad (cm)
Baja	< 2.5
Media	2.5 – 5.0
Alta	> 5.0

Fisuración

Falla consistente en la separación lineal de dos hileras contiguas de adoquines, asociada con desplazamientos horizontales o verticales de parte de la estructura del pavimento.

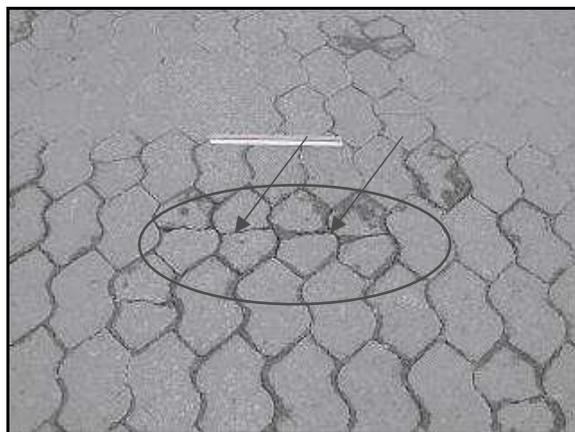


Figura 40. Fisuración en pavimentos adoquinados.

Se debe registrar para las fisuras:

- Longitud, en metros.
- Ancho, en metros. Se tendrá 0.10 m, para severidad baja, 0.15m para severidad media y 0.20 m para severidad alta.
- La severidad de las fisuras se establece de la siguiente forma, de acuerdo al ancho medido de la misma:

Tabla 49. Relación entre la severidad de la fisura y el ancho medido en campo.

Severidad	Ancho (mm)
Baja	0 – 5
Media	5 – 10
Alta	> 10

Escalonamiento

Consiste en desplazamientos verticales o rotacionales relativos entre adoquines adyacentes, que afectan el comportamiento articulado de la superficie del pavimento.



Figura 41. Escalonamiento en pavimentos adoquinados.

Se debe registrar para los Escalonamientos:

- Longitud, en metros.
- Ancho, en metros.
- La severidad del Escalonamiento se establece de la siguiente forma, de acuerdo a la diferencia de nivel (altura) entre adoquines:

Tabla 50. Severidad del escalonamiento.

Severidad	Altura (cm)
Baja	< 1
Media	1 – 2
Alta	> 2

Hundimientos

Son deformaciones grandes y notorias de la plataforma de la vía que alteran su perfil longitudinal, las cuales pueden ser localizadas o consecutivas de forma relativamente circular.



Figura 42. Ondulaciones y hundimientos en pavimentos adoquinados.

Se debe registrar para los Hundimientos:

- Longitud, en metros.
- Ancho, en metros.
- La severidad del Hundimiento se establece de la siguiente forma, de acuerdo a la profundidad del mismo:

Tabla 51. Severidad de las ondulaciones y hundimientos.

Severidad	Profundidad (mm)
Baja	< 50
Media	50 – 100
Alta	> 100

2.8.1.4. Georreferenciación de daños

Georreferenciar se refiere a ubicar geográficamente un punto en el espacio con respecto a una referencia dada, de la cual se conoce su posición en dicho espacio.

En cada uno de los elementos viales seleccionados para el proceso de calibración del modelo de deterioro, se deben georreferenciar tanto las fallas presentes al inicio del proceso como las que se vayan presentado a lo largo del mismo, con el objeto de poder establecer la tasa de progresión de cada uno de los daños.

Dado que los elementos viales que componen la base de inventario y diagnóstico del IDU se encuentran georreferenciados en la cobertura Malla Vial a través de las coordenadas X y Y iniciales de cada elemento, se recomienda que la referencia para la ubicación de cada una de las fallas sean éstas coordenadas iniciales.

Las coordenadas iniciales de cada elemento vial están consignadas en dos campos de la base de datos de inventario y diagnóstico del IDU, denominados $X_{\text{mínimo}}$ y $Y_{\text{mínimo}}$, campos cuyos valores espacialmente corresponden a la intersección entre el elemento vial en estudio y el elemento vial que le genera la nomenclatura.

A partir de las coordenadas $X_{\text{mínimo}}$ y $Y_{\text{mínimo}}$, se ubicarán las fallas dentro del segmento inventariado. Para esto se deberán las distancias X y Y , que corresponde a las proyecciones sobre el eje del segmento y sobre el eje perpendicular al mismo de la distancia entre el nodo inicial y la ubicación de la falla. Para las fallas de pavimento rígido donde se calcule sobre las dimensiones de la losa, se ubicará el centro de la losa y para las demás fallas se ubicará el centro de la falla.

La referencia del Nodo Inicial (coordenadas $X_{\text{mínimo}}$ y $Y_{\text{mínimo}}$) se dejará sobre el pavimento mediante una puntilla y pintura sobre la misma.

En la Gráfica a continuación se ilustra brevemente el proceso de georreferenciación.

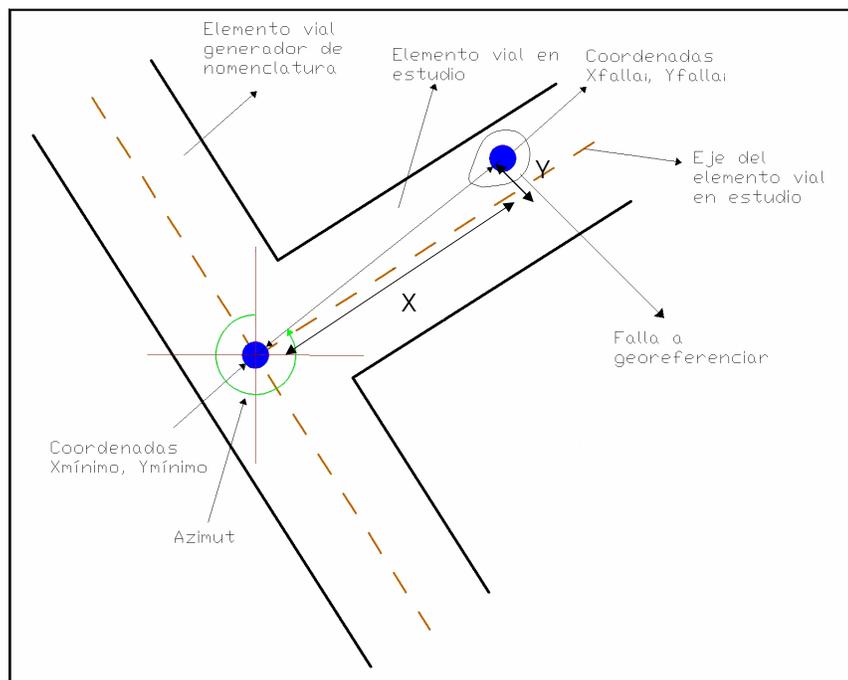


Figura 43. Proceso de georreferenciación de fallas.

2.8.1.5. Equipos a Emplear

El equipo a emplear para el la captura de información será un Computador portátil PSION WORKABOUT, el cual contiene un programa especial para la toma de esta información.



Figura 44. Capturador Portátil de Datos PSION

El programa de captura de datos se implementó de la siguiente manera:

Contiene una Pantalla Principal, en el cual se deberán registrar los siguientes datos (para pasar de campo a campo se procede con la flecha hacia abajo):

Grupo No.: Corresponde a la identificación dada a cada Comisión.

CC_ID: Corresponde al identificadores del segmento (entregado en tablas de recorrido).

OrdElem: Corresponde al Número de Orden del Elemento dentro del segmento (entregado en tablas de recorrido y verificado en campo).

CodElem: Corresponde al Código del elemento (entregado en tablas de recorrido).

Ancho (m): Corresponde al ancho de la calzada (información levantada en campo).

Largo (m): Corresponde a la longitud del segmento (entregado en tablas de recorrido y verificada en campo).

CodSuperf: Corresponde al código dado según el tipo de superficie. Este dato se puede ingresar o se puede seleccionar con la siguiente variable.

TipSuperf: Corresponde al Tipo de Superficie de la calzada: Flexible, Rígido, Flexible TM, Rígido TM, Adoquín Concreto, Adoquín Arcilla. La selección se hace con el empleo de las flechas izquierda y derecha.

En esta pantalla la opción Menú, me permite Salir del programa.



Figura 45. Pantalla Principal Programa Fallas

Al dar "Enter", aparecerá la Primera Pantalla de Fallas (Fallas 1 / 2), en la cual se podrán verificar y en caso de ser necesario modificar, los datos del segmento (CC_ID, Número de Orden, Código del elemento y Tipo de Superficie). Se tendrán las siguientes variables que se deberán registrar:

CodFalla: Corresponde al código dado según el tipo de falla, para cada tipo de superficie. Este dato se puede ingresar o se puede seleccionar con la siguiente variable.

Tipo Falla: Corresponde al Tipo de Falla según la Superficie de la calzada. La selección se hace con el empleo de las flechas izquierda y derecha.

En esta pantalla la opción Menú, me permite Salir del programa o regresar a la Pantalla Principal.

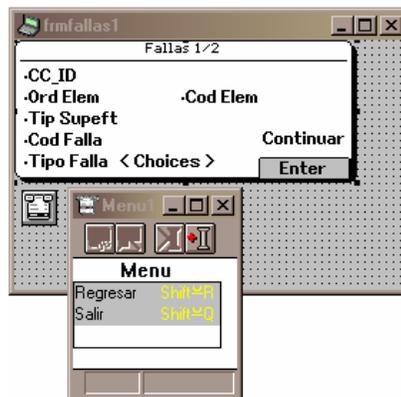


Figura 46. Pantalla 1 / 2 Programa Fallas

Al dar "Enter", aparecerá la Segunda Pantalla de Fallas (Fallas 2 / 2), en la cual se tendrán las siguientes variables que se deberán registrar, para cada una de las fallas encontradas:

Ancho (m): Corresponde al Ancho de la Falla (Ver Metodología de Levantamiento de Fallas).

Largo (m): Corresponde a la longitud de la Falla (Ver Metodología de Levantamiento de Fallas).

X Dist (m): Corresponde a la distancia X de ubicación de la Falla (Ver Metodología de Georreferenciación).

Y Dist (m): Corresponde a la distancia Y de ubicación de la Falla (Ver Metodología de Georreferenciación).

Severidad: Corresponde a la Severidad de la Falla. La selección se hace con el empleo de las flechas izquierda y derecha (Ver Metodología de Levantamiento de Fallas).

En esta pantalla la opción Menú, me permite Salir del programa o Registrar los datos de la falla. Para cada falla se deberá dar la opción de Registrar para que efectivamente quede almacenada la información, esto se podrá verificar porque al ingresar otra falla, los datos de ancho, longitud y distancias aparecerán en 0. Al registrar cada falla, el programa regresará automáticamente a la Primera Pantalla de Fallas.



Figura 47. Pantalla 2 / 2 Programa Fallas

Adicionalmente, cada una de las comisiones contó con un odómetro manual, el cual permitirá medir las distancias necesarias según la metodología detallada anteriormente, y con un flexómetro.



Figura 48. Odómetro Manual

En el registro fotográfico del trabajo de campo, que se presenta a continuación, se muestra la materialización del nodo inicial, para cada segmento.

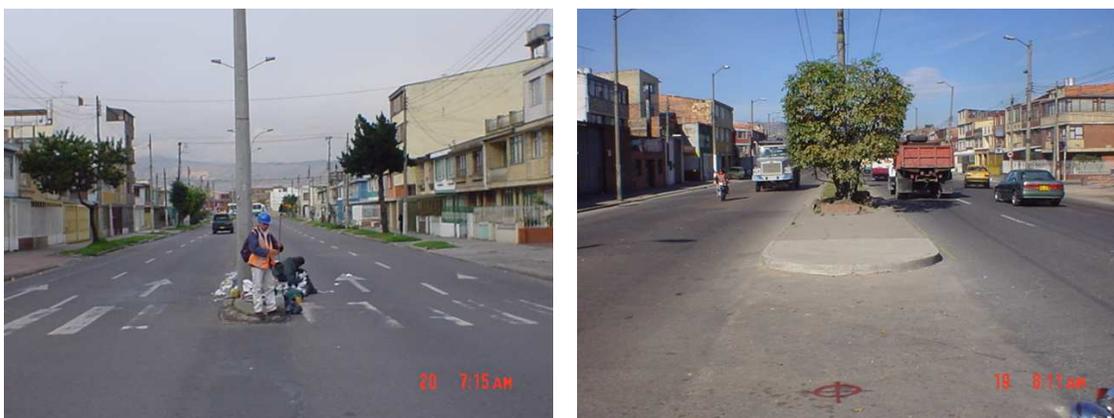


Figura 49. Identificación y Materialización del nodo inicial.

De igual manera, y después de materializado el nodo inicial, a partir del mismo, se georeferenciaba cada una de las fallas encontradas en las calzadas.



Figura 50. Levantamiento de fallas superficiales en el pavimento.

2.8.2. Mediciones Deflectométricas

Muchos sistemas se utilizan para medir las deflexiones, según la información requerida en la base de datos general del IDU (D0, D30, D60, D90, D120, D150 y D180) se realizarán mediciones deflectométricas utilizando un equipo que pueda medir todo el cuenco de deflexiones, para tal fin se utilizó un equipo denominado Falling Weight Deflectometer (FWD).

El proceso que sigue el FWD consiste en aplicar una carga dinámica (variable entre 2 t y 12 t) en el pavimento causada por la caída de una masa sobre un plato circular (de diámetro 30 cm) cuya superficie de contacto se asemeja al de la rueda de un camión. Las deflexiones producidas son medidas por medio de un grupo de geófonos en unidad de micrones (milésimas de milímetros) en siete puntos cada uno separado de la carga a una distancia de 30 cm, teniendo en cuenta que el primer geófono se encuentra bajo el punto de aplicación de la carga.

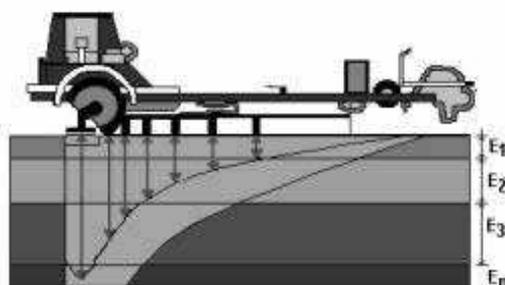


Figura 51. Esquema de toma de deflexiones con FWD.

La magnitud de la carga es registrada en KN o KPa por otro sensor ubicado en el centro del plato de carga durante el instante que la carga es aplicada al pavimento. En cada estación se miden tres veces las deflexiones producidas por la caída de la carga. La triple aplicación de la carga permite verificar la posibilidad de repetición de deflexiones similares sobre el mismo punto y ejecutar nuevamente una medición en el mismo instante en que se observe dispersión en el resultado.

La captación de los efectos deflectivos en el instante de aplicación de la carga es registrada automáticamente por una computadora portátil presente en el vehículo que remolca el deflectómetro la cual se consigna en archivos para ser procesados en la oficina por el software que analiza los resultados.

Para realizar el estudio deflectométrico se utilizó el equipo Falling Weight Deflectometer (Deflectómetro de Impacto), el cual permite obtener las deflexiones y valorar la capacidad estructural del pavimento existente y subrasante. Estos equipos son los adoptados y homologados por el programa SHARP USA, en la evaluación de las pistas de prueba.

Al llegar al segmento vial, se verifica el correcto funcionamiento del trailer de medición, los procesadores interfase, el computador y el vehículo. Verificadas las condiciones de funcionamiento del equipo, se liberan los seguros de transporte del trailer de medición, se inicia el programa (software) de medición en el computador y se procede a tomar las primeras curvas de Deflexión. Una vez se termina la rutina de aplicación de la carga, se verifica la coherencia de las mediciones (carga aplicada esperada, deflexiones decrecientes), así finaliza el primer punto de medición.

Luego se viaja a la siguiente abscisa distante 50.0 m, iniciando nuevamente la rutina de aplicación de la carga. En algunos puntos de medición donde se presenten inconsistencias en las mediciones (deflexiones fuera de lo común, no decrecen, etc), se verificará la posición de los sensores en el pavimento (dado que un deterioro importante de la vía puede afectar las mediciones) o se moverá el trailer de medición uno o dos metros hacia delante, pues podrían haber obras de drenaje que causen que la medición no sea correcta. Sin importar la longitud del elemento vial, en cada uno de ellos se tomarán dos puntos de deflectometría, y estas se ejecutan en el carril más deteriorado de la calzada, que generalmente coincide con el carril lento de circulación.

La ubicación de cada punto de medida puede alterarse por seguridad o para evitar zonas excepcionales como pozos de inspección, alcantarillas, o en donde la placa de impacto no pueda ajustarse correctamente. Se realizará la medida de la deflexión en la huella externa (generalmente más dañada que la otra huella).

Los dispositivos de seguridad y la señalización de que dispone el equipo Deflectómetro de Impacto, para su correcta utilización en campo:

- El remolque del equipo FWD dispone de una señal de Pare ubicada en la parte posterior del remolque.
- El remolque tiene dos licuadoras en su parte posterior, que se mantienen encendidas durante su desplazamiento y durante las mediciones.
- El vehículo que mueve el remolque tiene en su parte delantera una licuadora que también permanece encendida durante el desplazamiento del vehículo y durante las mediciones.
- Las luces de parqueo tanto del remolque, como del vehículo que lo mueve, permanecen encendidas siempre, mientras que el equipo se desplaza a lo largo de cualquier corredor o vía.

Cabe anotar que el equipo FWD, es un equipo de alto rendimiento capaz de tomar mediciones en tiempos cortos, sin necesidad de realizar ensayos de tipo destructivo, por lo cual la calzada no es intervenida en ningún momento.

En las fotografías que se presentan a continuación, se observan los dispositivos de seguridad y señalización descritos anteriormente:



Figura 52. Dispositivos de Seguridad del equipo FWD.

Con el fin de ajustar las deflexiones obtenidas con el FWD en campo y de calcular otras variables, para ingresarlas a la base temporal de datos, se harán los siguientes cálculos:

Las deflexiones se ajustarán a la carga de 40 kN por interpolación lineal, teniendo en cuenta el valor de la carga con que fueron generadas.

La función de corrección de la deflexión central, D_{fo} , está basada en un análisis numérico para llevar las deflexiones medidas a ciertas condiciones de referencia, tales como la temperatura y espesor de la carpeta existente.

La función de regresión para la corrección de la deflexión central, $factor(T)$, se expresa de la siguiente manera:²

² Metodología para la realización de estudios de rehabilitación de pavimentos flexibles. Universidad del Cauca. Colombia,

$$\text{factor}(T) = \frac{1}{1 - 0.0008 * h1 * (T - t)}$$

Donde:

h1= Espesor de la carpeta asfáltica existente, en centímetros

t= Temperatura de la capa Asfáltica en el momento de la medición, en grados centígrados.

T= Temperatura de referencia, en grados centígrados.

Considerando el espesor de carpeta asfáltica del sector y la temperatura a la que se realizaron las mediciones, se calcula el factor que afecta las mediciones de deflexión.

Esta corrección se considerada solo para la deflexión central (Dfo), la cual es altamente sensible a las variaciones de temperatura. Así se tiene la corrección de la siguiente manera:

$$Df_o(T) = \text{factor}(T) \times Df_o(t)$$

Para el presente proyecto la normalización por temperatura se llevó a cabo para 20°C.



Figura 53. Toma de Temperatura previo a la medición de deflexiones.



Figura 54. Toma de deflexiones.

A pesar que las deflexiones se normalizan por carga y temperatura, se recomienda que su medida se realice en la época del año más crítica, es decir, al finalizar los períodos de invierno donde el nivel freático bajo la estructura de pavimento alcanza su mayor nivel. Esto implica que es posible que las capas subyacentes de la estructura, incluida la subrasante, se encuentren saturadas y por ende las deflexiones serán mayores.

2.8.3. Determinación de espesores mediante apiques y sondeos

La determinación del espesor de la estructura de pavimento se realiza empleando el procedimiento que se describe a continuación:

1. Se localiza el elemento vial al cual se le va a extraer el núcleo, de acuerdo a la ubicación previamente verificada.
2. Al llegar al elemento vial se ubica el carril derecho, de acuerdo al sentido en el que avanza la nomenclatura; de allí se localiza el tercio medio del segmento a ser medido y se procede a colocar la señalización mínima requerida según el tipo de vía, la cual fue presentada en el Plan de Manejo de Tráfico y a su vez aprobada por la Secretaria de Tránsito y Transporte. Los planes de manejo de tráfico se presentan en el **Anexo 5**.



Figura 55. Señalización autorizada según STT.

3. Se prepara el sitio en el cual se va a realizar la perforación y se procede a realizar la extracción de un núcleo de 3 a 4 pulgadas empleando un taladro eléctrico el cual es accionado por una planta eléctrica y es lubricado con agua.



Figura 56. Taladro y Planta eléctrica empleadas para la extracción del núcleo.



Figura 57. Extracción del núcleo.

4. En los casos en que la superficie encontrada es flexible, se procede a realizar una profundización de la perforación empleando una barra y hoyador hasta que se logre encontrar la subrasante.



Figura 58. Profundización de perforación en pavimento flexible.

5. Después de extraído el núcleo, se hace la toma de espesores de cada una de las capas que componen la vía así como la profundidad de la subrasante.



Figura 59. Toma de espesores.

6. Posteriormente se procede a realizar la colocación y compactación de los materiales granulares así como la capa de pavimento que fue removida con el fin de sellar la perforación y dejar la vía en buen estado.



Figura 60. Reparación de las Capas Granulares



Figura 61. Reparación de la capa de rodadura.

7. Finalmente se retiran los equipos y la señalización ubicada y se realiza la limpieza del sitio de trabajo.

2.8.4. Conteos de tránsito

En la base de datos del IDU, la variable correspondiente al tránsito se encuentra consignada en términos de ejes equivalentes de 8.20 toneladas, variable calculada a partir del **volumen y composición del tránsito** que solicitará la estructura de pavimento durante el período de vida útil de la misma, convertido en cantidades de un eje patrón. Este eje patrón produce un efecto en la estructura equivalente al que producen los distintos ejes de los vehículos, o sea que el eje equivalente causa el mismo deterioro en la estructura de pavimento que el tránsito mixto.

La asignación de tránsito realizada por la firmas T.N.M. Limited y Consultoría Colombiana S.A. durante el desarrollo de los contratos de Inventario y Diagnóstico de la Malla Vial, se realizó a partir de la información de aforos de la oficina de semaforización electrónica de la ETB de los años 1997, 1998 y 1999; estos aforos fueron realizados en diferentes periodos del día, para lo cual, las firmas consultoras mencionadas, estudiaron un factor de extrapolación a tránsito de 24 horas, ayudadas por estaciones maestras de aforo localizadas en diferentes sitios de la Ciudad.

De otra parte, es importante tener en cuenta que las intervenciones realizadas por el Distrito en la malla vial de Bogotá, así como la restricción de pico y placa al transporte público y privado, han cambiado las condiciones de operación de algunos corredores, lo cual muy seguramente ha afectado la asignación de tránsito establecida en la base de datos del IDU.

El objetivo de la asignación del tránsito real en las pistas de calibración, está orientado a determinar los volúmenes vehiculares y su composición, de manera que permita establecer el número de ejes equivalentes, base para la clasificación de los elementos viales que conforman la malla vial de la ciudad, en familias de deterioro típicas.

Las actividades necesarias para la estimación de los ejes equivalentes en las pistas de calibración son las siguientes:

- Ejecución en campo de aforos de tránsito con una duración de 15 minutos en los elementos viales establecidos como pistas de calibración en el desarrollo del contrato, en dos períodos distintos, uno en la mañana y otro en la tarde. La ejecución del aforo se realizará de forma manual, diferenciando los vehículos por siluetas (autos, buses, camiones y articulados).
- Determinación a partir del aforo de 15 minutos del Tráfico Promedio Diario presente en el elemento vial y su composición de acuerdo a la siguiente clasificación:
 - Autos: Corresponden a todos los vehículos livianos (de cuatro ruedas).
 - Buses: Incluyen los buses y busetas.

- Camiones: Corresponden a todos los vehículos de carga con cuatro o más ruedas, de acuerdo con la siguiente clasificación de ejes: Camión C2: Camión de dos (2) ejes, Camión C3: Camión de tres (3) ejes, Camión C4: Camión de cuatro (4) ejes, Camión C5: Camión de cinco (5) ejes y Camión >C5: Camión de más de cinco (5) ejes.

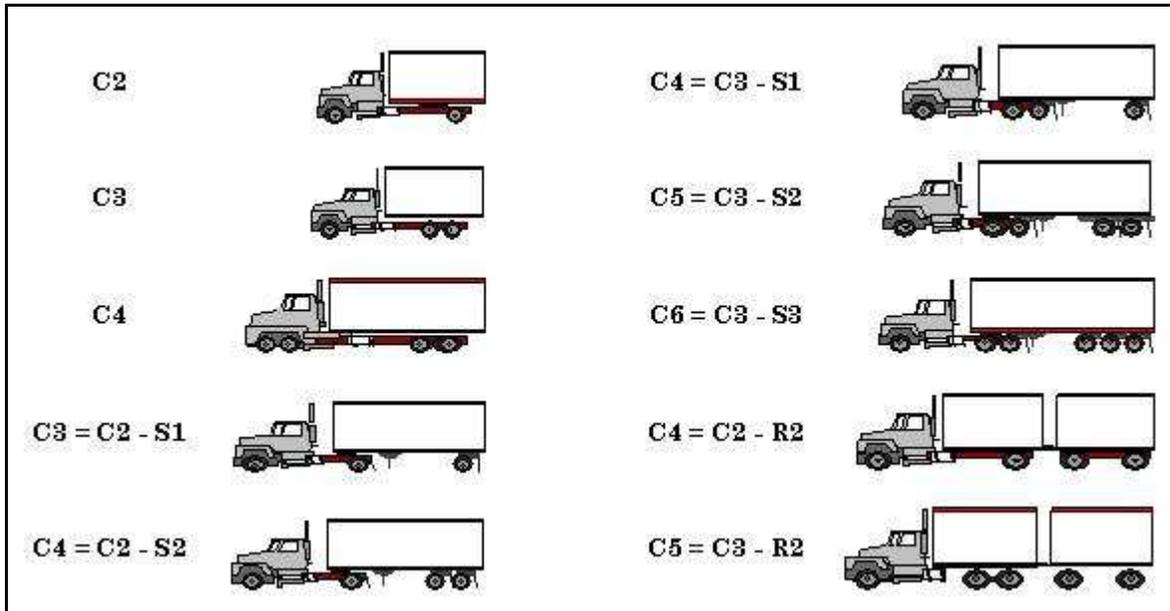


Figura 62. Clasificación general de los camiones

Paralelo al trabajo de campo relativo a los aforos, se debió ejecutar un trabajo en oficina correspondiente al análisis de la información entregada por la Secretaria de Tránsito y Transporte de Bogotá de las intersecciones semaforizadas en Bogotá.



Figura 63. Conteos de Tránsito

A partir de la información entregada, se analizaron 9 estaciones maestras. Para cada una de estas estaciones maestras se analizaron todos los movimientos agrupados en cuatro grupos principales, estos son Norte-Sur (Grupo 1), Sur-Norte (Grupo 2), Oeste -Este (Grupo 3) y Este-Oeste (Grupo 4). Para tres (3) de estas estaciones maestras no se encontró uno de estos grupos. De esta manera se levantó y

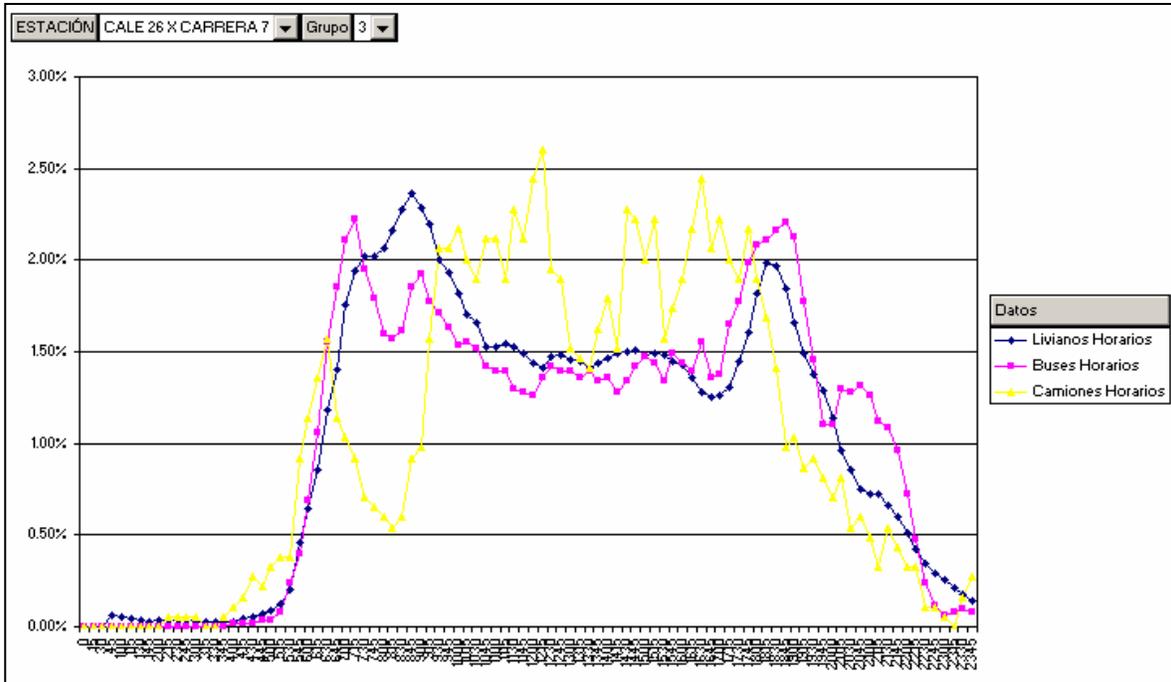
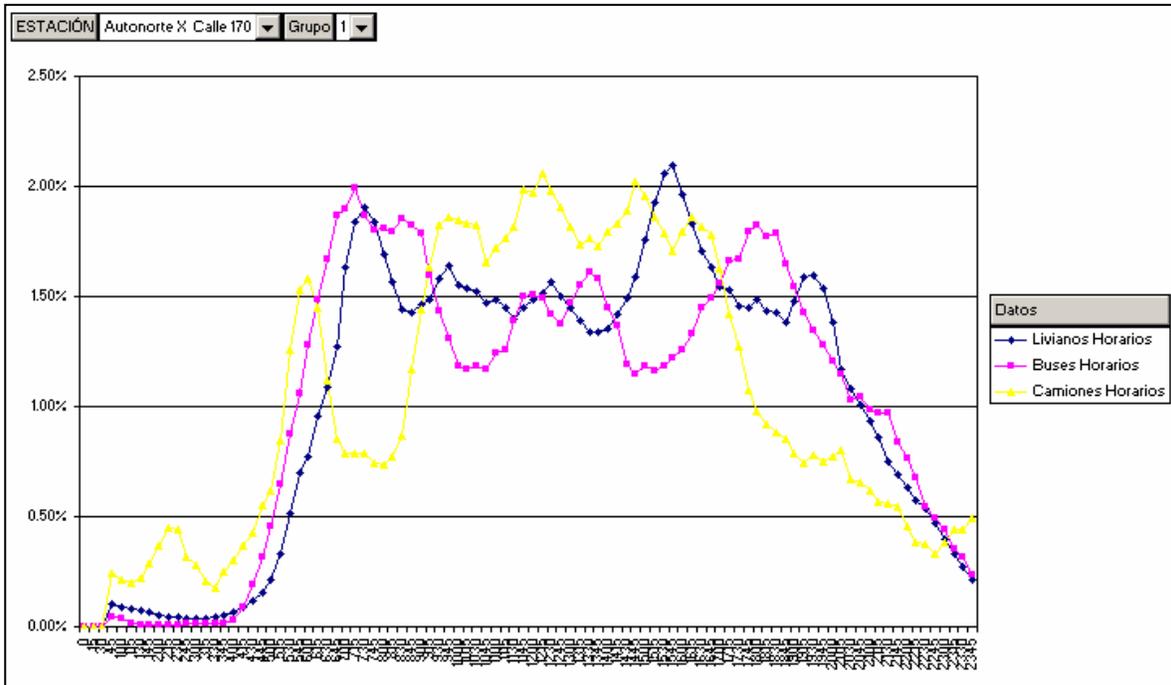
consolidó información de Treinta y tres (33) maestras. En la tabla que se presenta a continuación, se identifican las maestras que se emplearon en el análisis.

Tabla 52. Identificación de las Maestras empleadas apra el análisis de TPD.

ESTACIÓN	Grupo
Autonorte X Calle 170	1
Autonorte X Calle 170	2
Autonorte X Calle 170	3
Autonorte X Calle 170	4
Av. Boyaca X Calle 13	1
Av. Boyaca X Calle 13	2
Av. Boyaca X Calle 13	3
Av. Boyaca X Calle 13	4
Av. Cali X Calle 80	1
Av. Cali X Calle 80	2
Av. Cali X Calle 80	3
Av. Cali X Calle 80	4
Av. Carrera 68 X Calle 26	1
Av. Carrera 68 X Calle 26	2
Av. Carrera 68 X Calle 26	3
Av. Carrera 68 X Calle 26	4
Av. Villavicencio X Av. Boyaca	1
Av. Villavicencio X Av. Boyaca	2
Av. Villavicencio X Av. Boyaca	3
Av. Villavicencio X Av. Boyaca	4
CALE 26 X CARRERA 7	2
CALE 26 X CARRERA 7	3
CALE 26 X CARRERA 7	4
CALLE 26 X AVENIDA CIUDAD DE CALI	1
CALLE 26 X AVENIDA CIUDAD DE CALI	2
CALLE 26 X AVENIDA CIUDAD DE CALI	3
CALLE 26 X AVENIDA CIUDAD DE CALI	4
CARRERA 10 X CALLE 27 SUR	1
CARRERA 10 X CALLE 27 SUR	2
CARRERA 10 X CALLE 27 SUR	3
CARRERA 7 X CALLE 127	1
CARRERA 7 X CALLE 127	2
CARRERA 7 X CALLE 127	3

Con la información agrupada para cada una de las maestras, se pueden elaborar gráficas del comportamiento durante el día, para cada uno de los tipos de vehículo. En el eje X de la gráfica se representan los intervalos de 15 minutos que existen durante el día, y en el eje Y se ilustra el porcentaje del flujo vehicular para cada período de 15 minutos, respecto al período completo del día.

Figura 64. Gráfico de comportamiento de las maestras.



La información definida y procesada para cada una de las estaciones maestras, se llevó a cabo a partir de la información entregada en la STT, correspondiente a la "Evaluación de Campo de Cruces Individuales", cuyos formatos fueron entregados en formato de hojas de cálculo.

Posteriormente con el análisis de la información tomada en campo, relativa a los conteos se analizó para cada uno de los elementos, cual era la maestra que asemejaba mejor su comportamiento. Ya teniendo la maestra a emplear, identificada para cada uno de los elementos viales independientemente, se procedió a hacer las respectivas proyecciones para encontrar el TPD discriminado para autos, buses, camiones y articulados (en el caso de elementos con funcionalidad Transmilenio).

2.8.5. Validación de la Información

Durante el tiempo en que se llevó a cabo la toma de información en campo, la interventoría ejecutó validaciones periódicas de la información, con el fin de corroborar los procedimientos documentados contra los realmente empleados. Para cada uno de los trabajos, se tomaron muestras específicas, con el fin de llevar a cabo las mediciones de validación.

TNM Ltd., colocó a disposición de la interventoría, el personal, tiempo y equipos necesarios para llevar a cabo la validación de los datos levantados en campo.

Para la toma de deflexiones, se emplearon en algún momento del contrato, los dos equipos deflectómetro de impacto que posee la empresa. El equipo FWD se utilizó durante los primeros días del mes de febrero. Para este equipo se relaciona el certificado de calibración con fecha 08 de Enero de 2005, donde se aprecia que en las columnas de Fuera de Límite, se arrojó el reporte que ninguno de los geófonos se encuentra descalibrado. De igual manera se anexa el certificado de calibración del equipo deflectómetro HWD, con fecha 22 de Marzo de 2005, fecha en la cual se empleó para terminar las mediciones deflectométricas. Estos dos certificados se presentan en el **Anexo 6** del presente informe.

2.9. RESULTADOS DE LOS TRABAJOS

Los cálculos derivados de todo el análisis que se llevo a cabo a partir de la información recolectada en campo, se entregan en un archivo de excell, tal como se acordó a partir de la comunicación IDU-59-31y el cambio en el alcance del contrato que este generó. Estas tablas contenidas en medio magnético, se presentan resumidas en el **Anexo 7** del presente informe. A continuación se describen las metodologías empleadas para llevar a cabo estos cálculos:

2.9.1. Cálculo del Modified Distress Rating – MDR (Metodología PAVER)

La metodología PAVER, concebida por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, define la condición del pavimento mediante un índice de falla, denominado MDR por sus siglas en inglés Modified Distress Rating³, el cual es un valor adimensional que se calcula con base en valores deducibles obtenidos de curvas calculadas y calibradas de la metodología PAVER, para cada tipo de daño en función del grado de severidad y de la extensión del mismo.

El valor del MDR varía en un rango comprendido entre 0 y 100, en donde si MDR es igual a 0 indica una estructura de pavimento completamente destruida, mientras un valor de MDR igual a 100 indica que la estructura de pavimento está en perfecto estado. Para los daños que afectan la superficie de un pavimento, se toman las áreas afectadas con un determinado daño y se relacionan con respecto al área total de la calzada, así:

$$\% \text{extensión} = \frac{\sum \text{Área afectada}}{\text{Área total}} \quad (10)$$

Por otro lado, para establecer la extensión de los daños a medir en forma lineal (fisuras), se toman las longitudes de fisuras medidas en campo y se multiplica por un factor Z (que sirve para medir la variable a términos de área), el cual varía de acuerdo a la severidad del daño. Para llevar a cabo éste cálculo se usa la siguiente expresión:

$$\% \text{ extensión} = \frac{\text{Longitud fisuras} * (Z)}{\text{Área total de la calzada}} \quad (11)$$

Donde:

- Z = 0.10 m para severidad Baja
- Z = 0.15 m para severidad Media
- Z = 0.20 m para severidad Alta

Los daños considerados por ésta metodología que deben ser evaluados por medio de la anterior expresión son las fisuras transversales y las fisuras longitudinales.

Para el cálculo del valor correspondiente al índice MDR se debe hacer uso de la siguiente expresión:

$$\text{MDR} = 100 - \sqrt{\sum (P_n)^2} \quad (12)$$

Donde p_n es el coeficiente que determina el peso de ponderación del daño evaluado según su severidad y extensión. Así, cada daño posee curvas con las cuales se determina éste valor.

La identificación del valor de p_n se hace a partir del conocimiento del porcentaje exacto de extensión de la superficie dañada en el pavimento el cual está localizado en el eje X y sobre el cual

³ Fuente: IDU – T.N.M. Limited. Documento Maestro Inventario Vial de 7 Localidades en Bogotá. 2000.

se hace la lectura hasta el punto de intersección con la correspondiente curva de severidad (alta, media o baja) y se busca el correspondiente valor en el eje Y.

Para el caso de vías con alto grado de deterioro, la raíz cuadrada de la sumatoria de los pesos al cuadrado puede resultar mayor que 100, por lo que se podrían obtener en el cálculo valores negativos, razón por la cual en el caso de presentarse ésta situación, se asigna un valor de MDR igual a cero.

Cabe anotar que la firma T.N.M. Limited utilizó la presente metodología para la estimación de la condición del pavimento en el contrato de inventario y diagnóstico No. 834/99 y ajustó las curvas a partir de verificación visual en campo lo que permitió obtener los pesos a introducir en las fórmulas, que representaran más fielmente las condiciones locales.

De acuerdo con la metodología PAVER, la condición del pavimento se clasifica de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 53. Rangos del MDR

Estado Superficial	Rango MDR
Bueno	100 – 70
Regular	70 – 30
Malo	0 – 30

En las Figuras que siguen, se muestran los nomogramas establecidos por la metodología PAVER para la estimación del peso "Pn" de acuerdo a la severidad y extensión de las fallas presentes en pavimentos flexibles y pavimentos rígidos.

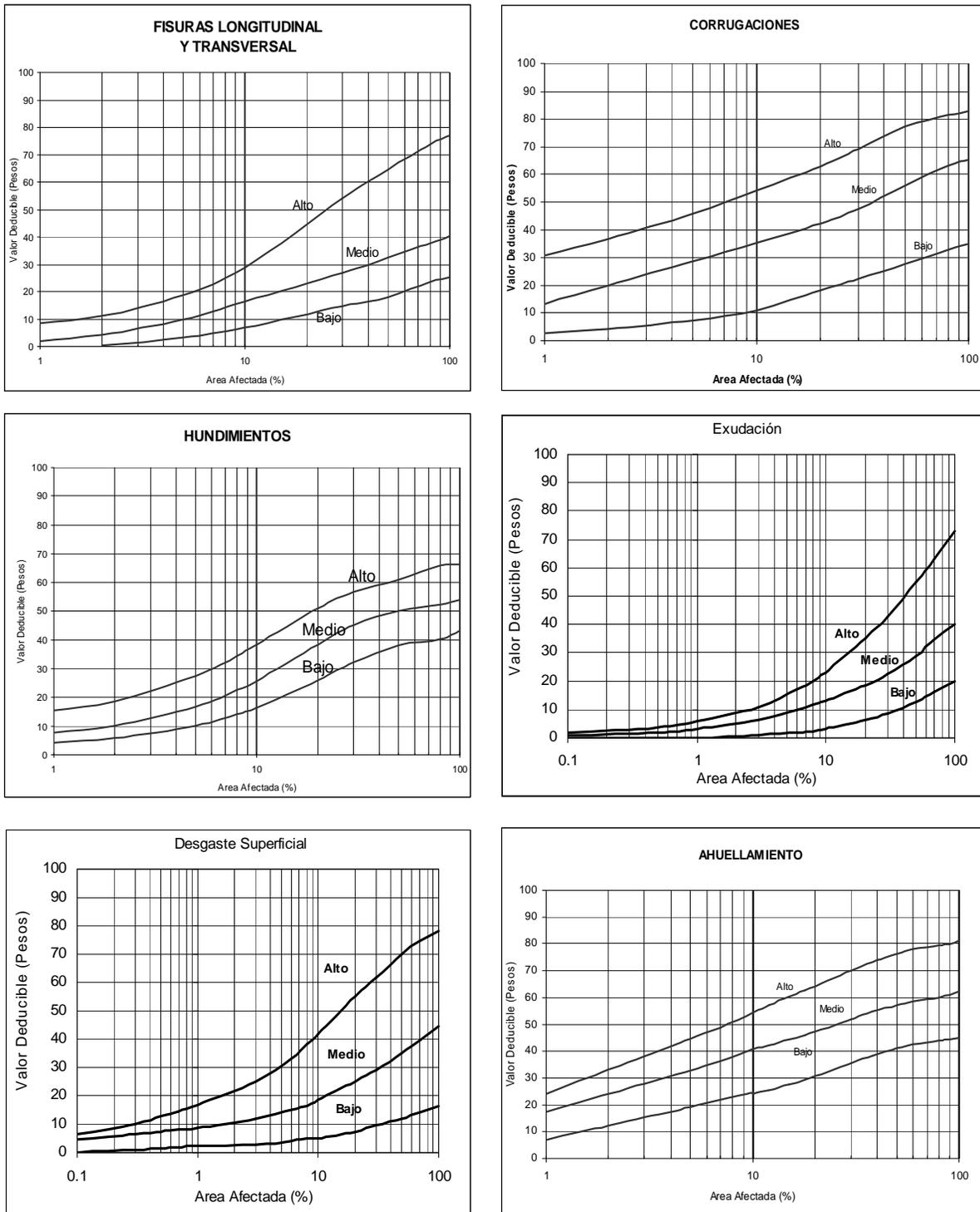


Figura 65. Nomogramas metodología PAVER – Pavimentos flexibles⁴.

⁴ Fuente: IDU – T.N.M. Limited. Documento Maestro Inventario Vial de 7 Localidades en Bogotá. 2000.

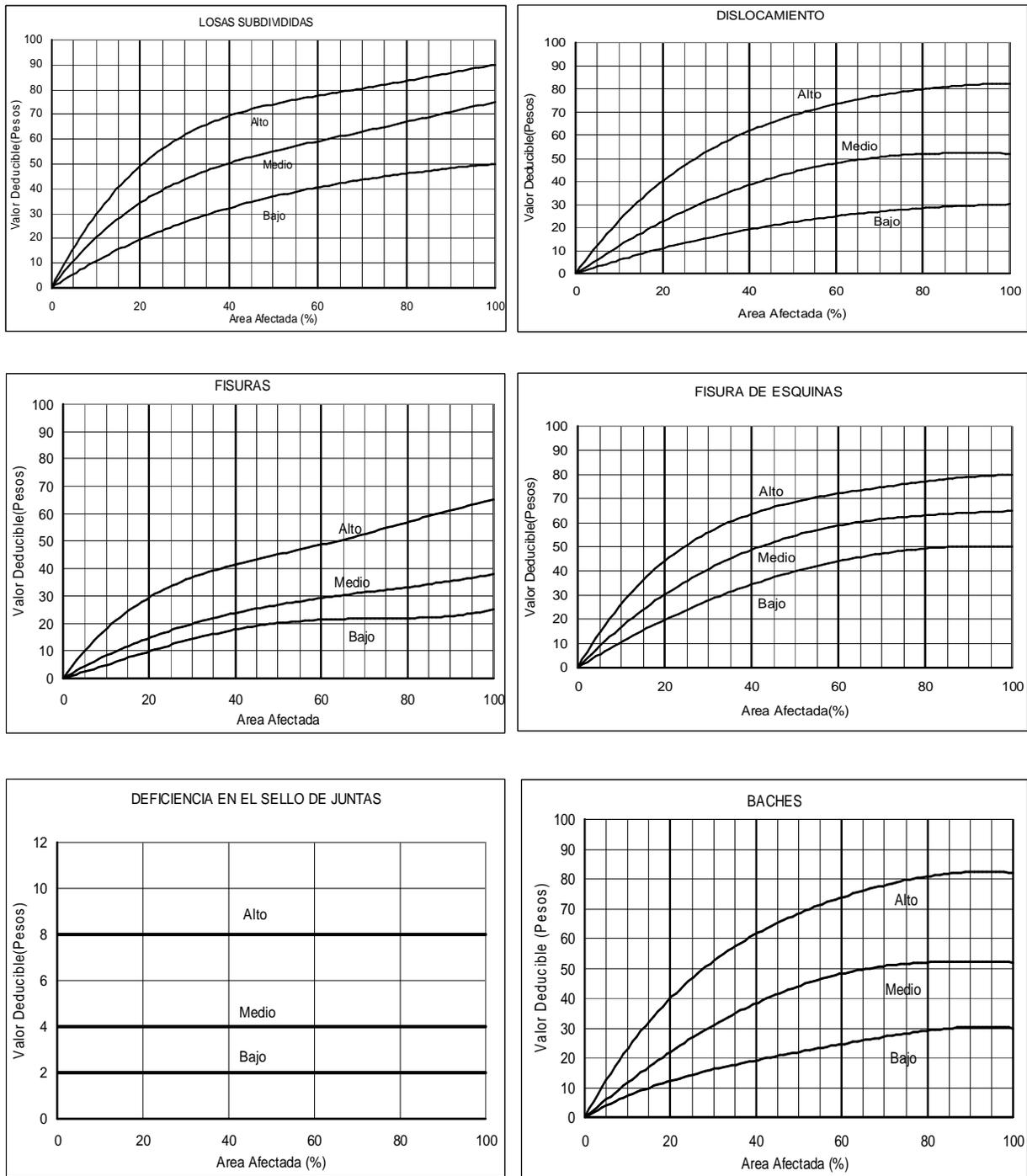


Figura 66. Nomogramas metodología PAVER – Pavimentos rígidos⁵.

⁵ Fuente: IDU – T.N.M. Limited. Documento Maestro Inventario Vial de 7 Localidades en Bogotá. 2000.

2.9.2. Cálculo del SN para Pavimento Flexible

El número estructural (SN) efectivo se estimará por retrocálculo a partir de las deflexiones mediante la metodología Rohde, para pavimentos flexibles.

El concepto que se maneja es el siguiente: El valor máximo de deflexión d_0 (medido a partir de FWD) es una combinación de la deflexión en la subrasante y la compresión elástica de la estructura del pavimento. Para explicar esto, el investigador Irwin explica la distribución de esfuerzos y el origen de las deflexiones bajo la carga de un FWD, así:

Se puede asumir que la deflexión medida en la superficie del pavimento a una distancia imaginaria de 1.5 veces el espesor total (h_t) de la estructura de pavimento (desde el centro del plato de carga), se origina totalmente en la subrasante.

Ahora, al relacionar el valor de la deflexión producida a 1.5 veces el espesor total (h_t) de la estructura de pavimento, con el valor de la deflexión central (bajo el plato de carga), se puede encontrar un "índice" asociado con la magnitud de la deformación que ocurre dentro de la estructura de pavimento y se define así⁶:

$$SIP = D_0 - D_{1.5 \cdot H_t}$$

Donde:

SIP	Índice estructural del pavimento.
D_0	Deflexión central, bajo el plato de carga bajo una carga de 40Kn (9000lb).
$D_{1.5 \cdot H_t}$	Deflexión medida en la superficie del pavimento bajo una carga de 40 KN (9000lb) a una línea imaginaria de 1.5 veces el espesor total (h_t) de la estructura de pavimento.
H_t	Espesor total del pavimento en pulgadas.

Hipotéticamente, el índice SIP debe estar relacionado directamente con la rigidez de la estructura de pavimento y subsecuentemente a su número estructural (SN). Se investigó esta hipótesis y se desarrolló una relación entre las medidas de deflexión en la superficie a partir de FWD y el número estructural (SN) del pavimento luego de analizar un gran número de estructuras utilizando la teoría elástica. Los cálculos del número estructural de las diferentes estructuras se realizaron mediante la ecuación de la AASHTO:

$$SN = \sum_{i=1}^n h_i \cdot a \cdot \left(\frac{E_i}{E_g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

⁶ Fuente: "Determining a pavement's structural number from FWD testing". Gustav T. Rohde.

Donde:

- h_i Espesores de las capas de la estructura de pavimento, en pulgadas.
- a_i Valores de coeficientes de capa de los materiales utilizados en el ensayo de AASHTO.
- E_i Módulo resiliente de los materiales de la estructura de pavimento.
- E_g Módulo resiliente de los materiales utilizados en el ensayo AASHTO.

Luego del análisis de las diferentes estructuras de pavimento, la mejor relación que se encontró fue incluyendo el espesor total del pavimento en el análisis. La relación tiene el siguiente formato:

$$SN = k_1 * SIP^{k_2} * H_p^{k_3}$$

Donde:

- SN Número estructural.
- SIP Índice del pavimento, calculado con la expresión relacionada anteriormente.
- H_p Espesor total del pavimento en mm.
- k_1, k_2 y k_3 Coeficientes que se muestran en la Tabla.

Tabla 54. Coeficientes de la ecuación de Rohde para diferentes tipos de superficies.

Tipo de superficie	K1	K2	K3
Sello de asfalto	0.1165	-0.3248	0.8241
Concreto asfáltico	0.4728	-0.4810	0.7581

2.9.3. Cálculo del Dol para Pavimento Rígido

En pavimentos rígidos, el espesor faltante de losa, expresado en cm de concreto asfáltico, se determina considerando la metodología AASHTO, con base en los siguientes puntos:

- ✓ Determinación de espesores del pavimento existente ($D_{existente}$).
- ✓ Análisis de tránsito, determinando la cantidad de ejes equivalentes para el período de diseño.
- ✓ Determinación de la condición superficial de las losas, esto es, establecer el MDR de cada segmento.

- ✓ Determinación del módulo de reacción de la subrasante - k dinámico a partir del estudio de las deflexiones. Se efectúa el retrocálculo considerando los siguientes puntos:

Cálculo del área del cuenco producido por deflexiones según FWD. El cálculo del área (A), equivale al cuenco producido bajo la losa luego de aplicar la carga del FWD. Se usa la siguiente expresión, según la metodología AASHTO:

$$A = 6 * (1 + (2 * d_{30} / d_o) + (2 * d_{60} / d_o) + (d_{90} / d_o))$$

Donde:

d_{30} , d_{60} y d_{90} son las deflexiones producidas a 30, 60, 90 cms del plato de carga (en pulgadas).

d_o es la deflexión producida en el centro del plato de carga (en pulgadas).

Cálculo de l_k , rigidez relativa del líquido denso, según AASHTO.

$$l_k = \left[\frac{\ln * \left(\frac{36 - AREA}{1812.279133} \right)}{-2.559340} \right]^{4.387009}$$

Cálculo del k dinámico en función de la deflexión central (d_o) y del área calculada anteriormente. Utilizando la ecuación de Westergard, se procede a obtener el valor del módulo de reacción del material (k) debajo de la losa, obtenido mediante la siguiente expresión de la AASHTO:

$$k = \left(\frac{P}{8 * d_o * l_k^2} \right) * \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right) * \left[\ln \left(\frac{a}{2 * l_k} \right) + 0.5772156649 - 1.25 \right] * \left(\frac{a}{l_k} \right)^2 \right\}$$

Donde:

d_o es la deflexión producida en el centro del plato de carga, en pulgadas.

P es la carga, en libras.

a es el radio de aplicación de la carga, en pulgadas.

Cálculo del k estático. El k calculado a partir de deflexiones de FWD es un valor dinámico, y para el diseño del refuerzo se requiere de un valor estático. A partir de estudios realizados, se ha encontrado que reduciendo el $k_{dinámico}$ en 2, se obtiene un valor razonable para valores de K estáticos.

$$K_{\text{estático}} = K_{\text{dinámico}} / 2$$

Determinación del espesor de losa requerido para el tránsito futuro (Dr). Con base en el K efectivo estático obtenido y con cada uno de los siguientes coeficientes, se aplica la ecuación de la AASHTO para pavimentos rígidos y se obtiene el espesor de losa necesario para sobrellevar el tránsito futuro hasta un nivel de serviciabilidad final de PSI =1.5. Para las vías se sugiere este valor de PSI_r, como el menor nivel aceptable de serviciabilidad del pavimento antes de una reconstrucción o recapeo.

Se definen los parámetros utilizados por AASHTO para el cálculo del espesor de losa requerido, mediante la expresión indicada a continuación:

- S'c: módulo de rotura del hormigón = 614 psi. Este valor corresponde a un módulo del hormigón de 43 kg/cm².
- E: Módulo de elasticidad del hormigón = 3'600.000psi (para Mr = 43 kg/cm²),
- J: Coeficiente de transferencia de carga = 3.6. Este valor de J corresponde a un criterio de construcción sin pasadores y sin bermas.
- C_d: Coeficiente de drenaje = 1.2.
- S_o: Desviación estándar = 0.39, indica la variación que puede haber en la proyección del tránsito futuro.
- R: Confiabilidad del 70%, asumido por ser vías urbanas locales.
- En lo referente a la serviciabilidad del pavimento, se hace una correlación en función del índice de condición global - OPI. Así:
 - OPI = 100 : Pavimento en perfecto estado
 - OPI = 0 : Pavimento en pésimo estado

$$\log W_{18} = ZR * S_o + 7.35 \times \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log(1 - (OPI / 100))}{1 + \frac{1.624 * 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32Pt) * \log \left[\frac{S'c * C_d * \left[D^{0.75} - 1.132 \right]}{215.63 * J * \left[D^{0.75} - \left(\frac{18.42}{(E/K)^{0.25}} \right) \right]} \right]$$

Cálculo del espesor de losa efectivo existente, Def. Los espesores de losa existentes, obtenidos por alguno de los métodos convencional o alternativo, se afectan con los factores relativos a la condición superficial del pavimento.

Según AASHTO:

$$Def = D_{\text{existente}} * F_{jc} * F_{dur} * F_{fat}$$

Donde:

F_{jc} factor de ajuste por juntas y fisuras.

F_{dur} factor de ajuste por durabilidad.

F_{fat} factor de ajuste por fatiga.

Según el Índice de fallas superficiales (MDR), el cual va desde MDR = 0 (vía en mal estado) a MDR=100 (vía en perfecto estado) se estableció el factor $F_{jc} * F_{dur} * F_{fat}$, tal cual como se muestra en la tabla adjunta:

Tabla 55. Factores de ajuste para el cálculo del espesor de losa efectivo por rangos de MDR.

MDR	$F_{jc} * F_{dur} * F_{fat}$
80-100	0.9
50-80	0.7
< 50	0.5

Cálculo el espesor de refuerzo faltante, D_{faltante}. Conociendo el espesor necesario para sobrellevar el tránsito futuro (D_r) y el espesor existente efectivo (Def) se calcula el D faltante, expresado en cm de concreto asfáltico:

$$D_{\text{faltante}} = (D_r - D_{\text{ef}}) * A$$

2.9.4. Asignación del TPD

De acuerdo al procedimiento descrito en el Numeral 2.8.4 del presente documento, la asignación del Tráfico Promedio Diario (TPD) discriminado para autos, buses, camiones y articulados, en cada uno de los elementos viales seleccionados como pistas, se llevó a cabo mediante la correlación de los conteos tomados en campo, con la información de las Estaciones Maestras descritas en ese mismo Numeral.

Los conteos se llevaron a cabo en dos períodos de 15 minutos cada uno, uno en la mañana y otro en la tarde. El análisis de los conteos permitió relacionar los valores encontrados con los valores graficados para cada una de las maestras, calculando finalmente el TPD, mediante la proyección de los datos de la maestra aplicada.

2.9.5. Determinación del CBR⁷

Una de las variables que inciden en el proceso de deterioro de una estructura de pavimento es la capacidad de soporte del suelo de fundación de la misma, la cual en la base de datos de inventario y diagnóstico del IDU se encuentra expresada por medio del CBR (California Bearing Ratio ó Relación de Soporte de California).

El **CBR** es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones controladas de densidad y humedad. El **CBR** se define como la relación entre el esfuerzo requerido para introducir un pistón normalizado dentro del suelo en estudio, y el esfuerzo requerido para introducir el mismo pistón hasta la misma profundidad en una muestra patrón de piedra triturada. Esta relación se expresa en porcentaje de la siguiente forma⁸.

$$C.B.R = \frac{\text{Esfuerzo en el suelo ensayado}}{\text{Esfuerzo en la muestra patrón}} * 100$$

El CBR usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2,54 mm, sin embargo, si el valor obtenido para una penetración de 5,08 mm es mayor, dicho valor debe aceptarse como valor final de **CBR**.

Su valor se puede obtener directamente en campo o mediante el ensayo de muestras de suelo en el laboratorio y puede variar en el ciudad desde 0% hasta valores cercanos al 25%. Un valor de **CBR** igual a 0% indica que el suelo es tan blando, que el pistón penetró sin la necesidad de la aplicación de una carga y en la medida que su valor aumenta, indica que la carga necesaria para que el pistón penetre debe ser mayor, lo cual a su vez indica que la rigidez del suelo es mayor.

El **CBR** también puede ser estimado en otro tipo de materiales de préstamo o tratados como subbases y bases granulares, donde el valor del **CBR** puede superar el 80%.

En el presente proyecto, el CBR de la subrasante fue asignado de acuerdo a la distribución de los elementos viales, de acuerdo a la siguiente tabla:

⁷ PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. Informe Final Contrato 529/2002. Tomo V

⁸ ARENAS LOZANO, Hugo León. Ingeniero Mg. Teoría de los Pavimentos. Universidad del Cauca.

Tabla 56. Zonas definidas para asignación del CBR.

ZONA No.	RANGO DE % DE CBR	LOCALIDADES	OBSERVACIONES
1	1.6 - 2.5	SUBA, ENGATIVA, KENNEDY	El límite oriental de ésta zona se establece en el corredor existente de la Avenida Ciudad de Cali entre la Avenida Ciudad de Villavicencio y la Avenida Alsacia, y entre la Avenida José Celestino Mutis y la terminación del perímetro urbano en el norte de la ciudad. En los límites anteriores, se excluye la localidad de Fontibón.
2	2.6 - 3.0	SUBA, USAQUEN, ENGATIVA, BARRIOS UNIDOS, FONTIBON, TEUSAQUILLO, CHAPINERO, KENNEDY, PUENTE ARANDA, SANTAFE, ANTONIO NARIÑO Y LA CANDELARIA	El límite occidental de ésta zona se establece en el corredor existente de la Avenida Ciudad de Cali y el límite oriental se establece en el corredor de Avenida Carrera 7. De igual forma, el límite sur se establece a lo largo del río Tunjuelito y el límite norte se establece aproximadamente en el corredor de la proyectada Avenida Tibabita. Dentro de ésta zona se encuentra la localidad de Fontibón.
3	3.1 - 4.0	SUBA, USAQUEN, CHAPINERO, SANTAFE, LA CANDELARIA	Esta zona se encuentra en los cerros orientales partiendo desde la Avenida Carrera 7. Su límite sur se encuentra en la frontera que divide a la localidad de La Candelaria con la localidad de San Cristóbal. Adicionalmente, el sector ubicado en los cerros de suba, hacen parte de ésta zona.
4	4.1 - 5.0	SAN CRISTOBAL, USME, RAFAEL URIBE, TUNJUELITO, BOSA, CIUDAD BOLIVAR	Esta zona se encuentra ubicada al sur del río Tunjuelito, incluyendo los cerros ubicados en las localidades de San Cristóbal y Usme, así como los cerros ubicados en la Localidad de Ciudad Bolívar.

A partir de la sectorización geotécnica de la ciudad, desarrollada por la firma Consultoría Colombiana S.A (subproducto del estudio de microzonificación sísmica elaborado por INGEOMINAS), se determinó y asignó el valor del CBR para los elementos viales en estudio.

2.9.6. Clasificación en familias “típicas” de los elementos analizados

Con los datos levantados en campo y el análisis posterior llevado a cabo en la oficina, se procedió a reclasificar en las familias de deterioro “típicas”, encontradas con el procedimiento descrito en el Numeral 2.3, cada uno de los 989 elementos viales que se seleccionaron como pistas para llevar a cabo los trabajos.

Este análisis y clasificación se presenta tanto de forma tabular como mediante los planos del **Anexo 8** y sus resultados se resumen en las Tablas 57 a 59 y gráficos 67 y 68.

Tabla 57. Resumen de Cantidad de segmentos por familia típica de deterioro. Tipo de Estructura: FLEXIBLE

FAMILIA TÍPICA NUEVA	CAPACIDAD DE LA SUBRASANTE	TRÁNSITO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CANTIDAD DE SEGMENTOS
1	Alta	Bajo	Baja	4
	Baja	Bajo	Baja	6
	Media	Bajo	Baja	11
2	Baja	Bajo	Media	60
3	Media	Bajo	Media	147
4	Alta	Bajo	Media	68
5	Alta	Bajo	Alta	22
	Baja	Bajo	Alta	20
	Media	Bajo	Alta	111
6	Baja	Medio	Media	6
	Media	Medio	Baja	3
			Media	31
7	Alta	Medio	Media	3
8	Alta	Medio	Alta	9
	Baja	Medio	Alta	32
	Media	Medio	Alta	129
9	Alta	Alto	Alta	4
	Baja	Alto	Alta	7
	Media	Alto	Alta	10
			Media	5
TOTAL CANTIDAD DE SEGMENTOS				688

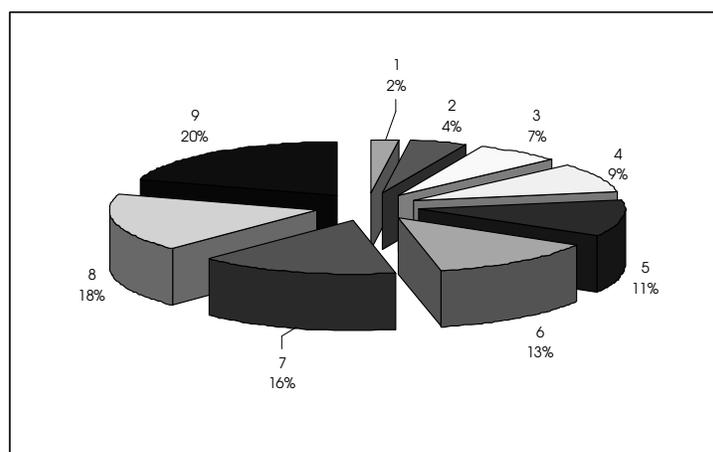


Figura 67. Resumen de cantidad de segmentos por Familia de Deterioro – PAVIMENTO FLEXIBLE

Tabla 58. Resumen de Cantidad de Segmentos por Familia Típica de Deterioro. Tipo de Estructura: RÍGIDA

FAMILIA TÍPICA NUEVA	CAPACIDAD DE LA SUBRASANTE	TRÁNSITO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	CANTIDAD DE SEGMENTOS
1	Alta	Bajo	Baja	155
	Baja	Bajo	Baja	27
			Media	1
	Media	Bajo	Baja	51
2	Media	Bajo	Media	1
3	Alta	Bajo	Media	6
7	Alta	Medio	Baja	8
	Baja	Medio	Baja	10
	Media	Medio	Baja	16
10	Media	Alto	Baja	1
TOTAL CANTIDAD DE SEGMENTOS				276

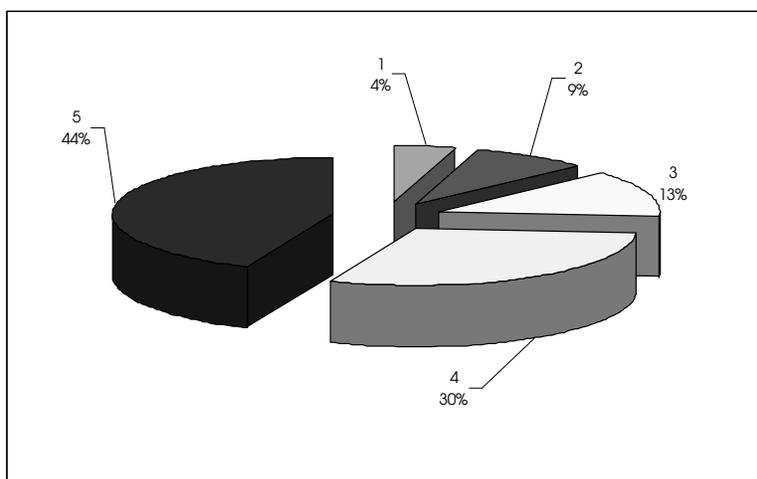


Figura 68. . Resumen de cantidad de segmentos por Familia de Deterioro – PAVIMENTO RÍGIDO

Tabla 59. Resumen de Cantidad de segmentos por familia típica de deterioro – CALZADAS TRANSMILENIO

FAMILIA TÍPICA NUEVA	CAPACIDAD DE LA SUBRASANTE	TRÁNSITO	CAPACIDAD ESTRUCTURAL	FLEXIBLE	RÍGIDO
0	Media	Bajo	Baja		5
1	Alta	Bajo	Baja		4
3	Media	Bajo	Alta	2	
TOTAL CANTIDAD DE SEGMENTOS				2	9

2.10. PLAN DE ASEGURAMIENTO DE CALIDAD

Teniendo en cuenta la magnitud de la información requerida en el proceso de calibración del modelo de deterioro, se diseñó e implementó un modelo de aseguramiento de la calidad, conforme con las Normas NTC-ISO 10005 y NTC-ISO 9001, versión 2000, que aplique para cada caso de tal manera que proporcione al IDU un trabajo de calibración acorde con la calidad esperada del proceso.

TNM Ltd., durante el desarrollo del contrato fue responsable de la calidad de los trabajos de consultoría y el IDU, por medio de la Interventoría, se responsabilizó de la revisión de los procesos y la implementación de los procedimientos del plan de calidad.

En el diseño del plan de calidad que se presentó inicialmente, se definió la secuencia de actividades, las características relevantes del proyecto, los procedimientos aplicables, los objetivos y especificaciones, los responsables, los recursos, los métodos, los programas de inspección y ensayo, la programación de auditorías internas de calidad y los registros que se deben generar durante la ejecución de los trabajos tendientes a calibrar el modelo de deterioro. Este plan de calidad que se presentó al inicio del contrato, no se modificó en cuanto a sus procedimientos, ya que de acuerdo al alcance expresado en los Términos de Referencia, se debería diseñar un plan de aseguramiento de calidad para el manejo de la información y el desarrollo de la Fase II y la Fase III. T.N.M. Limited diseñó el Plan de Calidad que se consigna en el **Anexo 9** como una copia controlada.

2.11. PLAN DE TRABAJO PROPUESTO PARA LAS FASES SUBSIGUIENTES DEL PROYECTO

Dentro de las obligaciones contractuales consignadas en los Términos de Referencia del proyecto, se encuentra proponer el Plan de Trabajo que el IDU debe seguir durante las siguientes Fases, con miras a obtener el objetivo deseado, el cual se traduce en la consecución de las Curvas de Deterioro particulares de los pavimentos de Bogotá, las cuales servirán como insumo para la administración y gestión de la infraestructura vial de la ciudad.

Para tal efecto, se hace necesario realizar una descripción detallada de los trabajos desarrollados durante las dos primeras fases del proyecto de Calibración de Curvas de Deterioro, así como de los modelos de deterioro implementados en el nuevo Sistema de Gestión Vial y de Espacio Público que actualmente viene ejecutando el IDU. Lo anterior, con el objetivo de tener una visión clara de la situación actual y entender la estructura del Alcance del Plan de Trabajo consignado en el presente documento.

2.11.1. Trabajos desarrollados en las dos primeras fases del proyecto

2.11.1.1. Trabajos desarrollados en la Fase I

La Fase I del proyecto fue ejecutada por la Pontificia Universidad Javeriana, en la cual se plantearon varios objetivos dentro de los cuales se encontraba diseñar la estrategia y la metodología que se debía aplicar para obtener a futuro los modelos de comportamiento reales del

IRI es el Índice de Rugosidad Internacional

A su vez, el Índice de Fallas Superficiales de las vías pavimentadas denominado MDR es una variable cuyo valor varía de 0 a 100, donde 0 representa una superficie de pavimento completamente destruida y 100 una superficie de pavimento en perfecto estado superficial. El valor de MDR se calcula bajo la siguiente expresión basada en la Metodología Washington:

$$MDR = 100 - \sqrt{(\sum pn_i^2)}$$

Donde “ pn_i ” es el peso de ponderación del daño según su severidad y extensión para cada una de las fallas i encontradas para una determinada área de pavimento evaluado.

Este cálculo inicialmente se basa en los valores deducibles obtenidos de las respectivas curvas o pesos en función del grado de severidad y de la extensión del daño superficial de acuerdo con el Sistema PAVER¹³. Al igual que el propio índice en mención, los valores deducibles varían entre 0 y 100 pero se diferencian, en el sentido que el peso representa el impacto que cada daño tiene sobre la condición del pavimento; así un valor de 0 indica que el daño no tiene efecto en el comportamiento del pavimento, mientras un valor 100 indica un daño de gran influencia.

La determinación de los valores deducibles es sencilla mediante el uso de las curvas PAVER. Para cada tipo de daño evaluado a lo largo de la Red Vial Nacional (presentados en la metodología específica de Inventario de Daños) y conociendo el porcentaje de extensión de la superficie dañada en el pavimento (eje X), se intercepta con la curva que representa la respectiva severidad (baja, media o alta) y se establece el valor deducible (eje Y). En la siguiente Figura se da un ejemplo de una curva para la obtención de valores deducibles del modelo PAVER, para el daño denominado Piel de Cocodrilo.

Ejemplo de uso de curva PAVER

Daño: Piel de Cocodrilo
Extensión: 19 % del área evaluada

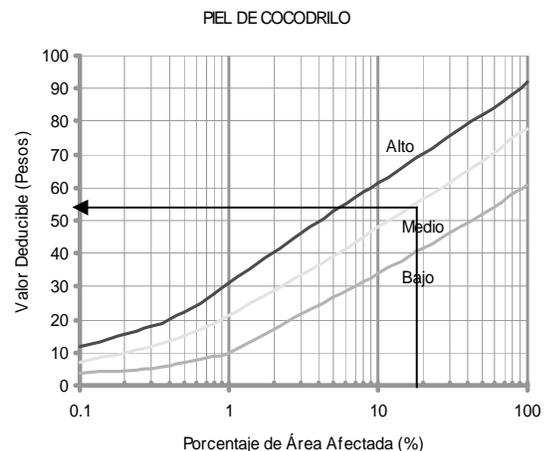


Figura 69. Ejemplo de uso de curva PAVER para un daño específico i

¹³ Sistema desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos de América

Los pesos encontrados para cada tipo de falla i de acuerdo a su extensión y severidad son deducibles y se introducen en la fórmula antes mencionada, obteniéndose el valor del MDR. En el caso de vías con alto grado de deterioro, la operación matemática que resta (raíz cuadrada de la sumatoria de los pesos al cuadrado) puede resultar mayor que 100, por lo cual al realizar el cálculo se obtendrían valores negativos. Sin embargo, por definición el MDR es un índice positivo y en estos casos se asigna un valor $MDR = 0$.

Es importante anotar que el valor del OPI no es estático y presenta una evolución en el tiempo, es decir, disminuye a medida que sobre la estructura de pavimento se van acumulando los ejes de diseño establecidos al inicio de su vida útil. Pavimentos con presencia de mantenimiento rutinario adecuado deben presentar el comportamiento de OPI esperado, en caso contrario, el índice decrece de manera importante.

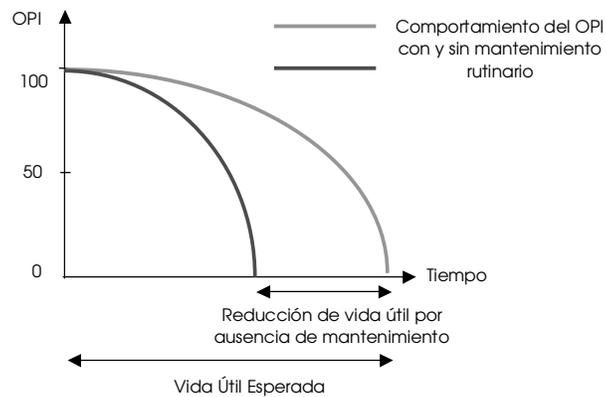


Figura 70. Fronteras de la evolución del OPI con y sin mantenimiento rutinario adecuado

La utilización de uno u otro índice depende del uso específico que se le quiera dar. En el caso del Índice de Serviciabilidad del Pavimento PSI que solo considera al IRI como variable asociada, se utiliza principalmente para la evaluación de la evolución o aumento en el tiempo de los costos de operación vehicular, costos que dependen de factores tales como velocidad de operación de la vía, tiempos de espera, tiempos de viaje, volumen de carga transportada, tipo de vehículo, costos de la operación del vehículo como el combustible, lubricantes y llantas; análisis que permite estimar la viabilidad y rentabilidad económica y financiera de un proyecto de inversión vial a través de la estimación de la relación Beneficio / Costo y la Tasa Interna de Retorno, utilizado principalmente en las Concesiones.

De otra parte, el Índice de Serviciabilidad expresado en términos de OPI, el cual considera tanto el IRI como el estado superficial del pavimento o daños superficiales, se constituye en un indicador general para realizar procesos de gestión vial encaminados a definir las actividades requeridas para mantener un cierto nivel de servicio a partir de su estado global y por ende, para definir el nivel de

inversión requerido en la malla vial analizada, motivo por el cual, el Sistema SAVU utiliza dicho parámetro.

Ahora bien, la fórmula mostrada anteriormente, establece el valor de OPI para una condición dada de IRI y MDR particular en un momento dado, pero su comportamiento a través del tiempo se define a través de la ecuación que representa su evolución. Teniendo en cuenta que no siempre se tienen los datos necesarios y suficientes para calibrar esta ecuación, el modelo del deterioro del OPI permite contar con una ecuación por "defecto" y otra, en la cual, se hace necesario realizar procesos de regresión para encontrar las constantes que la conforman. A continuación, se presentan las ecuaciones que representan la evolución del OPI por defecto y por procesos de regresión a partir de información real de campo.

$$OPI = 100 * \left(1 - \left(\frac{A}{A_f} \right)^c \right)$$

ECUACIÓN POR DEFECTO

Donde:

- OPI Índice de condición global del pavimento
- A Edad del pavimento correspondiente al OPI
- A_r Edad del pavimento cuando se alcanza un OPI = 0. Depende del tipo de superficie (25 para pavimento rígido y 20 para pavimento flexible)
- c coeficiente igual a 1.25 para pavimento rígido y 0.75 para pavimento flexible. Define una curva es cóncava o convexa

$$OPI = \left[100 * (1 - a) \left(\frac{A}{A_f} \right)^{\tau} - 3(1 - a) \left(\frac{A}{A_f} \right)^{2\tau} + 2(1 - a) \left(\frac{A}{A_f} \right)^{3\tau} \right]$$

ECUACIÓN PARA APLICAR PROCESOS DE REGRESIÓN

Donde:

- OPI Índice de condición global del pavimento

A Edad del pavimento correspondiente al OPI

a , A_r y τ parámetros a estimar en la regresión

Como se puede observar, la ecuación que define la evolución del OPI por defecto, no permite distinguir el comportamiento de la serviciabilidad del pavimento con base en factores tales como el clima y medio ambiente, tráfico, geometría del corredor vial y características geotécnicas y estructurales del pavimento. En cambio, la ecuación que permite definir la curva de comportamiento del OPI mediante procesos de regresión, admite clasificar previamente el pavimento en familias de deterioro "típicas" y para cada una de ellas particularizar dicho comportamiento. Sin embargo, este modelo de deterioro solo considera la evolución general de la serviciabilidad global de pavimento, dejando a un lado, la evolución particular de los daños superficiales, el IRI y las características estructurales del pavimento.

De otra parte, el **modelo de deterioro propuesto por la Pontificia Universidad Javeriana** se basa en la definición de modelos particulares del deterioro funcional y estructural del pavimento. Por lo tanto, se propone que la evolución del deterioro funcional se analice a través del IRI y de manera separada para cada uno de los tipos de fallas que se pueden presentar en el pavimento, y que el deterioro estructural se analice a través de la evolución de número estructural SN.

Para tal efecto, se consideraron factores determinantes en el proceso de deterioro de la estructura tales como el nivel de tránsito, la capacidad de soporte de la subrasante y la capacidad estructural del pavimento, los cuales, a través de rangos predefinidos establecen familias de deterioro típicas, agrupando segmentos viales donde se supone que la evolución del pavimento debe corresponder a una constante, teniendo en cuenta que el nivel de tránsito, la capacidad de soporte de la subrasante y la capacidad estructural son similares. No se consideró que el clima y medio ambiente fueran factores determinantes de la tipicidad de una familia, dado que en Bogotá se presenta solo un tipo de clima.

La Universidad Javeriana propuso que mediante la medida periódica del tipo, severidad y extensión de los daños superficiales, el IRI y el número estructural efectivo, se podían encontrar modelos que reflejaran la evolución de cada tipo de daño, la regularidad superficial y la capacidad estructural para cada familia de deterioro típica. Sin embargo, dicha Universidad consideró que algunas variables involucradas en el proceso tales como el nivel de tránsito (número de ejes equivalentes de 8.20 ton), la capacidad de soporte de la subrasante (CBR) y los espesores de la estructura de pavimento se tomaran directamente de la información contenida en la base de datos de inventario y diagnóstico del IDU y no de información real obtenida mediante procedimientos directos en campo.

Así mismo, la Universidad Javeriana definió un tamaño mínimo de la muestra de elementos viales para cada familia de deterioro típica, que debían ser objeto de mediciones periódicas para obtener las curvas propias de comportamiento de cada uno de los daños superficiales, MDR, IRI, OPI y SN, estableciendo este tamaño en el 3% de elementos consignados en la base de datos de inventario y diagnóstico. De igual forma, estableció una periodicidad de 4 meses entre cada toma de datos, proponiendo un mínimo de 9 datos relevados durante un período de tiempo de 3 años.

Por último, consideró necesario establecer la edad de cada uno de los pavimentos que conforman la malla vial de la ciudad, dado que esta variable, se constituye en un valor importante para definir el momento de la vida útil del pavimento en el cual se realizan las mediciones periódicas propuestas.

Analizada la metodología establecida por la Universidad Javeriana para el proceso de calibración de los modelos de deterioro de los pavimentos de Bogotá se encuentra que la misma se ajusta en gran medida a la filosofía y las necesidades básicas del nuevo Sistema de Gestión que en la actualidad se encuentra en su etapa de desarrollo. Sin embargo, presenta las siguientes consideraciones:

- El proceso conlleva la ejecución de importantes recursos presupuestales, teniendo en cuenta que se debe asegurar la medida continua de los datos, por lo menos cada 4 meses durante 3 años.
- Hasta tanto no se consolide la información periódica propuesta, no se sabrá si es necesario contar con mediciones adicionales para obtener los modelos de deterioro particulares para cada familia de deterioro.

2.11.1.2. Trabajos desarrollados en la Fase II

La Fase II del proyecto corresponde a los trabajos ejecutados mediante el presente contrato, cuya metodología consignada en los Términos de Referencia, corresponde a la recomendada por la Pontificia Universidad Javeriana para la obtención de modelos de deterioro particulares.

La primera tarea encomendada a TNM Limited en el desarrollo de la Fase II del proyecto, consistía en revisar y conceptuar sobre la metodología propuesta por la Universidad Javeriana. El resultado de dicho análisis se encuentra consignado en el Numeral 2.1. del presente informe y del mismo se pudo concluir lo siguiente:

- Las variables establecidas para la clasificación de elementos viales en familias de deterioro típicas son adecuadas, teniendo en cuenta que otras variables como el clima, medio ambiente y geometría no presentan variaciones importantes que puedan en un momento dado incidir en la definición de dichas familias. Sin embargo, la variable de geometría si incide en el comportamiento del deterioro de las vías rurales, motivo por el cual en Fases posteriores deberá ser tenida en cuenta para la definición de las familias de deterioro típicas en este tipo de red vial.
- La calidad de la construcción se constituye en una variable adicional a tener en cuenta para el proceso de clasificación de segmentos viales en familias de deterioro típicas. No obstante, debido a que no se cuenta con información estadística o determinística sobre la calidad de la construcción de los pavimentos de la ciudad, no es posible incluir este factor en el proceso de clasificación de los elementos. Se han recomendado valores por defecto para la calidad de la construcción de las capas bituminosas y capas granulares con el objetivo de alimentar el modelo de deterioro por defecto requerido por el IDU (HDM 4), los cuales deberán contar con un proceso de retroalimentación en campo, a partir de la verificación del cumplimiento de las

Especificaciones Técnicas de construcción, que permita retroalimentar dicho modelo a través del tiempo.

- Teniendo en cuenta que en su gran mayoría, los elementos viales que conforman la malla vial de Bogotá presentan datos referentes a la serviciabilidad del pavimento expresada a través de su Condición Global OPI, se recomendó adoptar la metodología planteada por TNM Limited para la estimación de la edad de los pavimentos, la cual consiste en asociar el comportamiento del OPI a cada una de las familias típicas de deterioro en los elementos donde se conoce la edad del pavimento y extrapolar los resultados a los elementos que carecen de dicha información.
- El tamaño de la muestra propuesto, si bien es pequeño, permite mediante un análisis juicioso de los resultados obtener curvas de comportamiento adecuadas para las condiciones de Bogotá.
- Para la estimación de la capacidad estructural del pavimento, definida a través del SN en pavimentos rígidos y del Dol en pavimentos rígidos, se hace necesario contar con la información real de los espesores de cada una de las capas que conforman dicha estructura, teniendo en cuenta que la información existente en la base de datos de inventario y diagnóstico fue obtenida mediante la aplicación de procedimientos indirectos utilizando para ello el Georradar. Por tal motivo, se deben realizar apiques y sondeos que permitan definir el valor del espesor real de la estructura de pavimento.
- Al igual que los espesores de la estructura de pavimento, la información referente al volumen y composición vehicular de los elementos que conforman la base de datos de inventario y diagnóstico fue asignada mediante un procedimiento indirecto con base en la definición de capas funcionales y de uso del suelo. Por lo anterior, se hace necesario contar con información de volumen y composición vehicular real de cada uno de los segmentos viales escogidos como pistas de calibración, dado que el tráfico es la variable que mas incide en el proceso de deterioro de la estructura de pavimento. Por lo anterior, se recomendó realizar aforos manuales durante períodos de tiempo que pudieron ser ampliados con los factores de hora pico obtenidos de diversas estaciones maestras desarrolladas en toda la ciudad.
- Con la información contenida en la base de datos de inventario y diagnóstico de la malla vial de Bogotá es posible implementar modelos de deterioro internacionalmente aceptados como los modelos de deterioro del Sistema HDM 4. Sin embargo, para aplicar dichos modelos, se hace necesario contar con la información referente a la calidad de la construcción de la estructura, así como con la información asociada a la caracterización de los materiales que constituyen la estructura de pavimento. De no contar con la información relacionada, se deben estimar valores por defecto para la correcta aplicación de los modelos de deterioro contemplados por el Sistema HDM 4, como los recomendados en el presente documento.

Bajo las consideraciones anteriores, tanto el IDU como la Interventoría realizaron un análisis de las conclusiones derivadas de la conceptualización realizada por el Consultor sobre la metodología de calibración propuesta por la Universidad Javeriana, tomando las siguientes decisiones:

- Las familias de deterioro típicas se definieron a partir de las variables consideradas por la Universidad Javeriana, es decir, mediante el análisis por rangos de las siguientes variables: a) volumen de tráfico expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas, b) capacidad estructural del pavimento expresada en términos de SN o Dol, dependiendo del tipo de superficie del

pavimento y c) capacidad de soporte de la subrasante expresada mediante el valor del CBR del suelo de fundación.

- No obstante lo anterior, los datos referentes al volumen y composición vehicular, así como los datos de espesores de la estructura de pavimento no se tomaron directamente de los consignados en la base de inventario y diagnóstico del IDU, dado que los mismos son el resultado de la aplicación de métodos de cálculo indirectos. Por esta razón, se ordenó la ejecución de conteos manuales de tráfico, consistentes en dos conteos de 15 minutos, así como la ejecución de apiques y sondeos en cada uno de los elementos viales escogidos como pistas de calibración.
- La variable para la clasificación de elementos viales referente a la capacidad de soporte de la subrasante, expresada en el CBR del suelo de fundación, se tomó directamente del valor consignado en la base de datos de inventario y diagnóstico del IDU. Lo anterior, teniendo en cuenta que este valor corresponde al resultado de una investigación exhaustiva realizada por el Distrito Capital, desarrollada dentro de los trabajos de microzonificación sísmica de la ciudad.
- Debido a que las actividades referentes a la ejecución de los conteos manuales y apiques y sondeos en las pistas de calibración no se encontraban contempladas en los trabajos inicialmente contratados, se decidió disminuir el número de la muestra a analizar en el presente contrato, pasando de 2.408 a 989 elementos viales, manteniendo el porcentaje de elementos previsto para cada familia de deterioro. Lo anterior, con el objeto de mantener el equilibrio económico del contrato.
- De igual forma, se decidió suspender la medición de los daños georeferenciados, tarea ésta que se encontraba avanzada en un 30% en el momento de dicha decisión, así como la medición del IRI, tarea que aún no se había iniciado en ese instante del contrato, lo cual implicó el no poder realizar los cálculos referentes al MDR y OPI.
- En igual sentido, se decidió no diseñar ni implementar en la presente Fase la base de datos particular que se debía estructurar para la administración de la información periódica resultante del proceso de calibración propuesto por la Universidad Javeriana, para lo cual, se le solicitó a TNM Limited, entregar la información relevada en campo en tablas planas de Excel.
- El procedimiento adoptado para la estimación de la edad de los pavimentos, fue el propuesto por TNM Limited.
- Las demás actividades contempladas en el Términos de Referencia del contrato, tales como el diseño de la metodología para la calibración del deterioro de pavimentos adoquinados, el desarrollo del plan de trabajo para las fases posteriores, entre otras, se ejecutaron de acuerdo a las especificaciones previstas en los mismos.

Paralelamente a las decisiones consignadas en el presente informe, el Consultor desarrolló las actividades propias del contrato, siguiendo los lineamientos e implementando los cambios establecidos por el IDU y la Interventoría.

2.11.2. Modelos de deterioro implementados en el nuevo Sistema de Gestión Vial y de Espacio Público que actualmente viene ejecutando el IDU

En desarrollo del contrato para el análisis, diseño, construcción e implementación del Sistema de Gestión Vial y de Espacio Público que actualmente viene ejecutando el IDU, se consideraron dos

modelos de deterioro básicos a ser implementados: a) el modelo de deterioro correspondiente a las curvas reales de comportamiento del pavimento que resulten del proyecto de calibración de curvas en todas sus fases y b) por defecto, el modelo de deterioro del Sistema HDM 4.

Lo anterior, teniendo en cuenta que para el funcionamiento adecuado del Sistema de Gestión en desarrollo, se hace necesario “deteriorar” las variables que inciden en la gestión de pavimentos para la obtención de los presupuestos de inversión multianuales y dado que, los resultados definitivos del proyecto de calibración de curvas puede demorarse dependiendo de la disponibilidad de recursos presupuestales asignados al mismo, se hace necesario contar con un modelo de deterioro por “defecto” que permita realizar la gestión encomendada al nuevo Sistema.

En tal sentido, el modelo de deterioro por defecto, es decir, el modelo de deterioro del Sistema HDM 4 trabajará por el momento con la información consignada en la base de datos de inventario y diagnóstico del IDU, información que en parte también alimentará los modelos de deterioro particulares, y asumirá los valores recomendados por el Sistema HDM 4, cuando estos no se encuentren en dicha base. En consideración del Consultor, esta situación conlleva a que el resultado de la gestión presente una confiabilidad más baja de la esperada, comparada con la confiabilidad de la gestión si se aplicara un modelo de deterioro particular, resultado del proyecto de calibración de curvas o si se aplicara el modelo de deterioro del Sistema HDM 4 utilizando para ello todas sus variables necesarias a partir de datos reales y no de valores recomendados.

En cuanto a la implementación de los modelos de deterioro mediante la obtención de curvas particulares para la ciudad, la misma se hace necesaria, teniendo en cuenta que el alcance de las actividades referidas al mantenimiento rutinario, mantenimiento periódico y de refuerzo estructural generadas por el nuevo Sistema de Gestión, se obtienen a partir del desarrollo del modelo denominado “Vallas Verdes”, el cual, considera como variables de entrada el OPI, el SN y el tipo, extensión y severidad de los daños superficiales, variables que deben corresponder a los valores deteriorados en el momento de realizar la gestión de pavimentos, con miras a obtener el nivel de servicio deseado.

La decisión de implementar en el nuevo Sistema de Gestión del IDU los dos modelos de deterioro ya referenciados, le genera un valor agregado al proceso de gestión de pavimentos que pretende implementar la Entidad, ya que permitiría realizar comparaciones de la evolución de las variables que inciden en el proceso de deterioro y de los parámetros del pavimento que se deterioran, permitiendo: a) un mejor proceso de calibración de los modelos y generando futuro, un adecuado nivel de confiabilidad en los resultados de la gestión de pavimentos, b) disminuir la inversión requerida para la actualización de los datos de diagnóstico de las estructura de pavimento, dado que modelos debidamente calibrados, permiten realizar pronósticos mas realistas. Sin embargo, esta consideración es válida si los dos modelos se alimentan con información real y no con valores asumidos.

De otra parte, se hace necesario precisar que el Sistema de Gestión Vial y de Espacio Público de Bogotá, actualmente en desarrollo, contará con una nueva estructura de datos manejada mediante un motor ORACLE, dentro de la cual se ha contemplado la estructura de datos para el almacenamiento de la información que alimentará los dos modelos de deterioro establecidos. Por

tal motivo, no se encuentra necesario que en Fases posteriores, se desarrolle la base de datos particular de deterioro que no fue estructurada en el presente contrato.

2.11.3. Alcance del Plan de Trabajo propuesto para las Fases posteriores del proyecto

El alcance del Plan de Trabajo propuesto por el Consultor, considera la implementación en algún momento del tiempo de los dos modelos de deterioro contemplados por el nuevo Sistema de Gestión, actualmente en desarrollo, los cuales deben ser alimentados con datos reales sobre las variables que inciden en el deterioro del pavimento y las variables funcionales y estructurales del pavimento que se ven afectadas por el uso de la estructura. Sin embargo, es tarea del IDU definir si dicho alcance se desarrollará en una sola etapa o en diferentes etapas, decisión que depende del monto de los recursos presupuestales que le sean asignados al proyecto.

A continuación se presenta de manera particular, las actividades que conforman el alcance del Plan de Trabajo recomendado:

2.11.3.1. Desarrollo de una etapa previa de análisis

Antes de iniciar cualquier Fase posterior, se recomienda que el Consultor encargado por el IDU para su desarrollo, formule una metodología de trabajo bajo los siguientes objetivos:

- Revisión y conceptualización sobre todos y cada uno de los documentos generados durante la Fase I y la Fase II del proyecto, realizando las recomendaciones para el mejoramiento de las metodologías establecidas hasta el momento referentes al proceso de calibración de los modelos de comportamiento del deterioro de los pavimentos de la ciudad. Especialmente, se deberá revisar y conceptualizar sobre el proceso para la identificación y agrupación de elementos viales en familias típicas de deterioro, incluyendo el análisis de cada una de las variables que intervienen en dicho proceso, teniendo en cuenta además, las variables que definen las familias de deterioro típicas para los pavimentos ubicados en la malla vial rural de la ciudad, analizando y conceptualizando sobre la conveniencia de incluir nuevos parámetros para la categorización de familias, tales como la geometría, clima y medio ambiente.
- Análisis, diseño e implementación de un nuevo plan de trabajo que involucre la consecución de información de inventario y diagnóstico de los pavimentos para la alimentación tanto de los modelos de deterioro propios como de los modelos de deterioro por defecto, los cuales en este caso en particular se refieren a los modelos de deterioro del sistema HMD 4, descritos mas adelante, buscando el mejoramiento de los procesos, procedimientos y análisis de los resultados obtenidos, así como de los procesos para la alimentación del nuevo Sistema de Gestión Vial y de Espacio Público, actualmente en desarrollo.
- Investigación sobre proyectos particulares cuyos objetivos hayan sido similares al del presente proyecto, desarrollados en otros países del mundo, con el objetivo de retroalimentar el nuevo plan de trabajo propuesto.
- De manera particular, se deberá incluir en el nuevo plan de trabajo el análisis, diseño e implementación de una metodología que permita identificar las causales y los procesos que involucran tanto la aparición de cada una de las fallas superficiales en pavimentos flexibles,

rígidos y articulados como su progresión y comportamiento a través del tiempo, diferenciando estas causales, procesos, progresiones y comportamientos de acuerdo a las variables que identifican la agrupación de los deterioros en familias típicas de deterioro. Además de todas las variables que han sido analizadas durante las Fases I y II, se deberán analizar las variables referentes a la calidad de los materiales y procesos constructivos, incluyendo los procesos y procedimientos para la consecución de la información que permita utilizar los modelos de deterioro (HDM 4) de manera confiable.

2.11.3.2. Complementación de los trabajos aplazados en el desarrollo de la Fase II

Las actividades aplazadas en el desarrollo de la Fase II deben ser desarrolladas en su totalidad, a efectos de poder contar con la primera toma de información recomendada por la Pontificia Universidad Javeriana. Dentro de las actividades a desarrollar en esta complementación se tienen:

- **Definición de las pistas de calibración faltantes para completar el tamaño de la muestra establecido para cada familia de deterioro.** La Pontificia Universidad Javeriana recomendó como mínimo un tamaño de la muestra por familia de deterioro del 3% de elementos viales asociados a cada familia. Se hace necesario definir las pistas de calibración faltantes, para lo cual, se debe implementar un proceso iterativo el cual consiste en: a) escoger las pistas con base en la información de TPD, SN y CBR contenida en la base datos, b) realizar conteos manuales, sondeos y apiques en las pistas escogidas, c) reclasificar nuevamente los elementos viales en familias de deterioro con base en el TPD real y el SN real, d) verificar el número de elementos faltantes por familia para completar la muestra del 3%, d) volver a la actividad relacionada en el literal a) y e) continuar con el proceso hasta completar toda la muestra. Es importante anotar que, debido a que la malla vial de la ciudad crece constantemente y nuevos inventarios viales han reportado un mayor número de elementos viales, el 3% de la muestra puede superar el valor de 2.408 elementos viales considerado en el presente proyecto. Adicionalmente, se deberán escoger los elementos viales ubicados de la malla vial rural que servirán como pistas de calibración de los modelos de deterioro para este tipo de red y en dicho proceso se deberán tener en cuenta, además de las variables ya señaladas, la geometría de la vía como complemento en el proceso de definición de las familias de deterioro típicas, aplicando en todo caso, el nuevo plan de trabajo que debe ser diseñado e implementado antes de iniciar los trabajos de campo.
- **Complementación de la información referente a los daños superficiales georeferenciados.** En la actualidad, se cuenta con información sobre el tipo, extensión y severidad de los daños georeferenciados para 569 elementos viales. Se hace necesario entonces, relevar el tipo, extensión y severidad, así como la georeferenciación de los daños superficiales presentes en los elementos viales faltantes hasta completar el 3% de la muestra recomendada, incluyendo las pistas que se escogerán en la malla vial rural.
- **Complementación del estudio deflectométrico y de capacidad estructural.** En desarrollo del presente estudio se realizó el estudio deflectométrico sobre la totalidad de los 989 elementos viales escogidos y se determinó la capacidad estructural de los mismos con base en las deflexiones reportadas por el FWD y los espesores de capas determinados mediante los apiques

y sondeos. Sin embargo, se hace necesario extender el estudio deflectométrico y el cálculo de la capacidad estructural de pavimento, en términos de SN o Dol, de los elementos viales faltantes para completar el tamaño de la muestra establecido, incluyendo las nuevas pistas ubicadas en la malla vial rural, realizando una recomendación particular, la cual consiste en que se materialice en campo el punto exacto de la toma de la deflexión, con el objetivo que el resultado de las siguientes medidas periódicas puedan ser comparadas dentro del análisis estadístico propuesto.

- **Estimación de la Regularidad Superficial (IRI).** Las pistas de calibración estudiadas en el presente proyecto adolecen de la estimación de la regularidad superficial IRI, variable de gran importancia para la implementación del modelo VOC (Disminución de los costos de operación vehicular y cálculo de la relación Beneficio / Costo incremental). De igual forma, se debe programar la estimación del IRI en las pistas de calibración faltante, incluyendo las nuevas pistas correspondientes a la malla vial rural.
- **Estimación del MDR y OPI.** Se hace necesario estimar los valores de MDR y OPI, tanto para las 989 pistas definidas en la Fase II, como para las pistas faltantes para completar la muestra, incluyendo las nuevas pistas correspondientes a la malla vial rural, teniendo en cuenta, como se explicó anteriormente, que estas variables hacen parte de los datos de entrada para la aplicación del modelo de gestión "Vallas Verdes".

2.11.3.3. Medida periódica de las variables susceptibles de deterioro

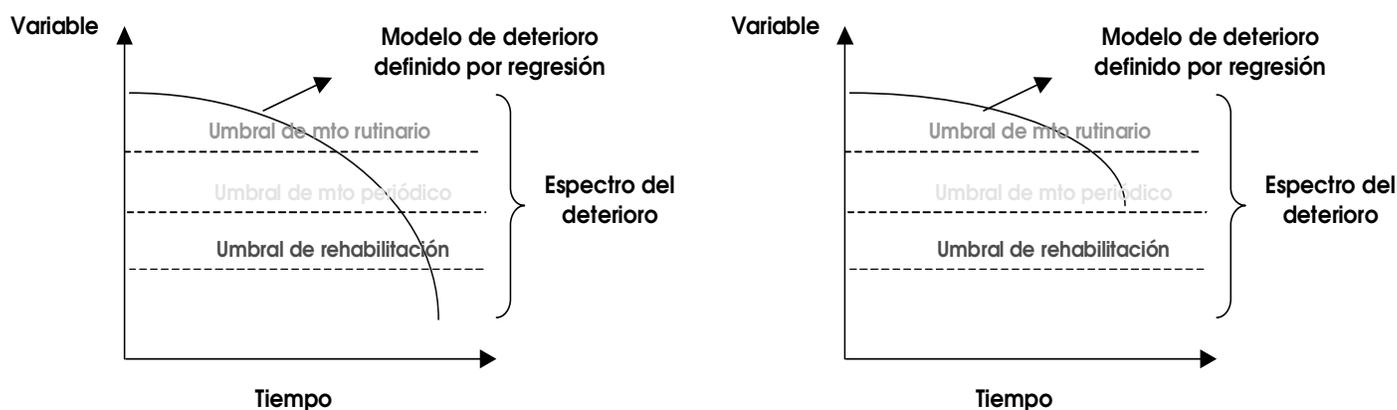
Las actividades descritas hasta el momento corresponden exclusivamente a la consecución de la primera medida completa de las variables que definirán los modelos de deterioro particulares para Bogotá. La Pontificia Universidad Javeriana definió en la Fase I del proyecto, que se deben tomar medidas periódicas de estas variables sobre la totalidad de la muestra, es decir, sobre el 3% de los elementos viales que conforman la malla vial de la ciudad, como mínimo con una frecuencia de medida cada 4 meses hasta completar nueve tomas de datos. Es importante anotar que la frecuencia y cantidad de las medidas recomendadas por la Universidad Javeriana corresponden a un valor estimado que puede variar dependiendo de los resultados obtenidos. Es decir, puede suceder que con los nueve datos tomados cada 4 meses se obtenga una curva de deterioro particular para cada variable estudiada que cumpla con las expectativas del modelo, pero, en caso que la curva obtenida no abarque el espectro total del deterioro de la variable, se hará necesario tomar medidas adicionales, manteniendo su frecuencia cada 4 meses, hasta lograr los resultados esperados. Las variables a medir periódicamente, en pistas tanto de la malla vial urbana como en la malla vial rural, serán:

- **La capacidad estructural** calculada mediante el estudio deflectométrico y el espesor de la estructura de pavimento. Se supone que una vez definida la totalidad de la muestra ya se cuenta con el valor real del espesor de las capas de la estructura de pavimento.
- El índice de regularidad superficial **IRI**.

- Tipo, severidad y extensión de los **daños superficiales** debidamente georeferenciados.
- **EI MDR**, calculado con base en los daños superficiales.
- **EI OPI**, calculado con base en el IRI y el MDR.

2.11.3.4. Análisis y seguimiento a los resultados obtenidos en las medidas periódicas

Se recomienda que una vez se ejecuten cada una de las medidas periódicas de las variables susceptibles de deterioro relacionadas en el numeral anterior, se realice el análisis y seguimiento de los resultados obtenidos, con el objeto de identificar si con la cantidad de datos obtenidos el modelo de deterioro particular de cada variable satisface las necesidades requeridas por el Sistema de Gestión para su óptimo desempeño. La validación propuesta se debe enfocar en el sentido de verificar si el modelo obtenido mediante procesos de regresión de los datos, cubre todo el espectro de deterioro, para lo cual, se deben revisar los umbrales que definen las fronteras establecidas para la aplicación de una actividad de mantenimiento rutinario, mantenimiento periódico o rehabilitación. En la siguiente **Figura**, se esquematiza el espectro del deterioro y los umbrales referenciados.



Modelo adecuado para la gestión
Figura 71. Espectro de deterioro y umbrales para la gestión de pavimentos
Modelo no adecuado para la gestión

Como se puede observar en la Figura, se encuentra que un modelo de deterioro para una variable en particular, definido por procesos de regresión a partir de los datos periódicos tomados en campo, es adecuado cuando su espectro cubre la totalidad de los umbrales definidos para la gestión de pavimentos. Si el modelo no cubre todo el espectro de deterioro, no podrá identificar cuándo se requiere algún tipo de actividad de mantenimiento o rehabilitación específica. Los umbrales o fronteras que definen la actividad de mantenimiento o rehabilitación han sido definidos en la estructuración del nuevo Sistema de Gestión del IDU. Por lo tanto, el Consultor que realice este análisis, deberá basarse en los umbrales definidos para cada una de las variables sometidas a deterioro durante la vida útil del pavimento.

2.11.3.5. Estimación de las variables para la aplicación y calibración de los modelos de deterioro del Sistema HDM 4

Para la correcta aplicación de los modelos de deterioro por “defecto” con los que contará el nuevo Sistema de Gestión del IDU, se hace necesario programar los trabajos de consultoría tendientes a:

- **Estimar las variables con las cuales se alimentan dichos modelos.** En estos modelos se encuentran variables como: a) CDS (indicador de defectos de construcción en superficies bituminosas) el cual presenta un valor de 0.5 para superficies frágiles, de 1.0 para superficies normales y de 1.5 para superficies blandas, y b) CDB (indicador de defectos de construcción para la base) el cual presenta un valor entre 0 (sin defectos en la construcción) y 1.5 (defectos severos en la construcción); los cuales deberán ser estimados para todas y cada uno de los elementos viales que conforman la base de datos de inventario y diagnóstico. Teniendo en cuenta que la consecución de esta información no es una tarea fácil, dado que el IDU no maneja cifras estadísticas o determinísticas que permitan asociar a cada elemento los datos referentes a la calidad de la construcción de las capas de rodado y las capas de base, se propone levantar dicha información para la muestra de elementos viales que servirán como pistas de calibración de los modelos de deterioro particulares, definir un valor único por familia de deterioro y extrapolar los resultados a los demás elementos viales que conforman dicha familia.

Adicionalmente, el modelo requiere de otras variables asociadas a la estructura de pavimento, tránsito, etc, las cuales se irán relacionando en cada uno de los modelos propuestos más adelante.

Para la variable “condición climática”, se propone que se adopte una sola condición para Bogotá.

- **Calibrar los modelos a partir de las medidas periódicas de las variables susceptibles a deterioro.** Cada uno de los modelos de deterioro del Sistema HDM 4 presenta un factor de calibración K_i , el cual, por defecto presenta un valor de 1. Se recomienda que a partir de los resultados de las mediciones periódicas programadas sobre las variables susceptibles a deterioro y que alimentarán los modelos particulares, se realice una calibración de los factores K_i , con miras a obtener resultados acordes a las condiciones locales. Para tal efecto, se propone la implementación de la metodología de “ventanas”, la cual, ha sido aplicada con éxito en Chile.

A continuación, se relacionan los modelos de deterioro del HDM 4 que se deben implementar en el nuevo Sistema de Gestión de pavimentos del IDU:

2.11.3.6. Modelos de deterioro en pavimentos flexibles.

- **Modelo de agrietamiento.** En el modelo de agrietamiento, se incluirá la implementación del modelo de grietas estructurales contemplado en el sistema HDM-4, el cual se describe a continuación:
 - **Grietas estructurales.** Para este modelo se diferencian tanto la iniciación como la progresión de los daños para: 1) todas las grietas estructurales y 2) grietas anchas.

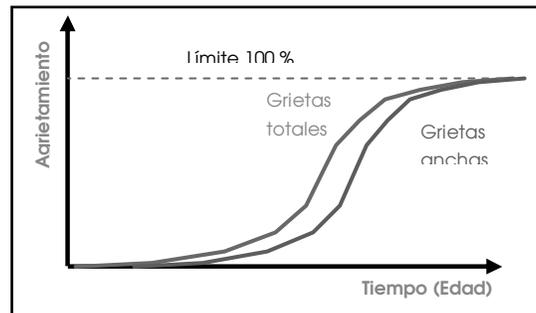


Figura 72. Comportamiento típico de las grietas totales y grietas anchas.

- a) Iniciación de todas las grietas estructurales. En donde se incluyen dos modelos, uno para estructuras de pavimento cuyas capa asfáltica es la original (HSOLD = 0) y otro para estructuras que han sido intervenidas con sobrecarpetas (HSOLD > 0).

Si HSOLD = 0, se tiene que el modelo viene gobernado por la siguiente fórmula:

$$ICA = K_{cia} \left\{ CDS^2 a_0 \exp \left[a_1 SNP + a_2 \left(\frac{YE4}{SNP^2} \right) \right] + CRT \right\}$$

De otra parte, si HSOLD > 0, se tiene que el modelo viene gobernado por las siguientes fórmulas:

- ✓ Para todas los materiales de superficie excepto CM (mezcla asfáltica suave – Mezcla en frío), SL (slurry seal) o CAPE (capa de sello):

$$ICA = K_{cia} \left\{ CDS^2 \left[\text{MAX} \left(a_0 \exp \left[a_1 SNP + a_2 \left(\frac{YE4}{SNP^2} \right) \right], * \text{MAX} \left(1 - \frac{PCRA}{a_3}, 0 \right) a_4 \right) \right] + CRT \right\}$$

- ✓ Para materiales de superficie CM (mezcla asfáltica suave – Mezcla en frío), SL (slurry seal) o CAPE (capa de sello):

$$ICA = K_{cia} \left\{ CDS^2 \left[\text{MAX} \left[a_0 \exp \left[a_1 \text{SNP} + a_2 \left(\frac{YE4}{\text{SNP}^2} \right) \right] \right] \right. \right. \\ \left. \left. * \text{MAX} \left(1 - \frac{\text{PCRW}}{a_3}, 0 \right) a_4 \text{HSNEW} \right] \right\} + \text{CRT}$$

- b) Progresión de todas las grietas estructurales. La forma general del modelo de progresión de todas las grietas estructurales se consigna a continuación:

$$dACA = K_{cpa} \left[\frac{\text{CRP}}{\text{CDS}} \right] Z_A \left[(Z_A a_0 a_1 \delta t_A + \text{SCA}^{a1})^{1/a1} - \text{SCA} \right]$$

- c) Iniciación de grietas estructurales anchas. El tiempo de iniciación de las grietas estructurales anchas se rige por la siguiente ecuación:

$$ICW = K_{ciw} \text{MAX}[(a_0 + a_1 \text{ICA}), a_2 \text{ICA}]$$

- d) Progresión de grietas estructurales anchas. La forma general del modelo de progresión de grietas estructurales anchas se consigna a continuación:

$$dACW = K_{cpw} \left[\frac{\text{CRP}}{\text{CDS}} \right] Z_w \left[(Z_w a_0 a_1 \delta t_w + \text{SCW}^{a1})^{1/a1} - \text{SCW} \right]$$

- **Modelo de pérdida de áridos.** La pérdida de áridos es la pérdida progresiva de material de la superficie por afectación del medio ambiente y/o por abrasión del tráfico. La ocurrencia de pérdida de áridos varía considerablemente de una región a otra de acuerdo con los métodos constructivos, especificaciones, calidad de los materiales y prácticas locales. Este fenómeno ocurre casi exclusivamente en tratamientos superficiales.

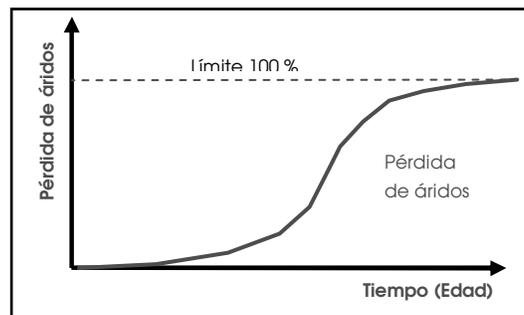


Figura 73. Comportamiento típico de la pérdida de áridos.

- **Iniciación.** El modelo de iniciación de pérdida de áridos está dado por la siguiente ecuación:

$$IRV = K_{vi} CDS^2 a_0 RRF \exp(a_1 YAX)$$

- **Progresión.** La forma general del modelo de progresión para la pérdida de áridos está dada por:

$$dARV = \left[\frac{K_{vp}}{RRF} \right] \left[\frac{1}{CDS^2} \right] Z \left[Z (a_0 + a_1 YAX) a_2 \delta t_v + SRV a_2 \right]^{1/a_2} - SRV$$

- **Modelo de baches.** Los baches usualmente se desarrollan en superficies que también se han visto afectadas por grietas y/o por pérdida de áridos. La presencia de agua acelera la formación de huecos, con un debilitamiento general de la estructura del pavimento y una pérdida de la resistencia de los materiales.

El modelo de baches usa el indicador de defectos en la construcción para la base (CDB) como una variable. En el modelo, los baches se expresan en términos del número de baches por unidad de área 0.1 m².

- **Iniciación.** La iniciación de baches debido a grietas solo aparece cuando el área total de grietas estructurales anchas (ACW) excede el 20%. La pérdida de áridos inicia la aparición de baches cuando el área afectada (ARV) excede el 30%. El tiempo entre la iniciación de grietas estructurales anchas o pérdida de áridos y la iniciación de baches está dado por:

$$IPT = K_{pi} * a_0 \left[\frac{(1 + a_1 HS)}{(1 + a_2 CDB) (1 + a_3 YAX) (1 + a_4 MMP)} \right]$$

- **Progresión.** La progresión de baches se presenta por baches debidos a grietas, pérdida de áridos y la presencia continua de baches. La progresión de los baches es afectada por el lapso de tiempo entre la ocurrencia del bache y la reparación del mismo.

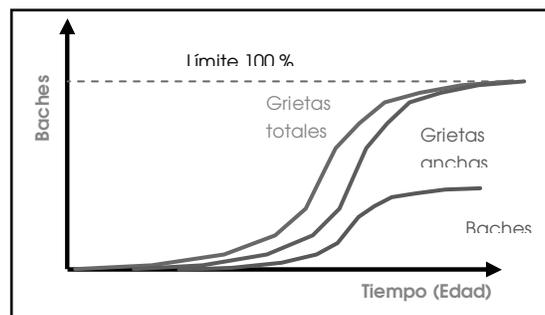


Figura 74. Comportamiento típico de los baches.

El número adicional de baches por kilómetro derivado de grietas estructurales anchas, pérdida de áridos o alargamiento de los baches iniciales está dado por:

$$dNPT_i = K_{pp} * a_0 * ADIS_i(TLF) \left[\frac{(1 + a_1 CDB)(1 + a_2 YAX)(1 + a_3 MMP)}{(1 + a_4 HS)} \right]$$

- **Modelo de fallas de borde.** Las fallas de borde pueden ser definidas como la pérdida de superficie y materiales de base en el borde del pavimento. Esta falla comúnmente se presenta en vías angostas con hombros sin sellar, en donde las ruedas de los vehículos pasan sobre o cerca del borde del pavimento.

El modelo de fallas de borde es un modelo de progresión continua, el cual se rige por la siguiente ecuación:

$$dVEB = K_{eb} a_0 PSH (AADT)^2 ESTEP(S)^{a1} \left[a_2 + \frac{MMP}{1000} \right] 10^{-6}$$

- **Modelo de ahuellamiento.** El ahuellamiento se define como una 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 cargas del tránsito.

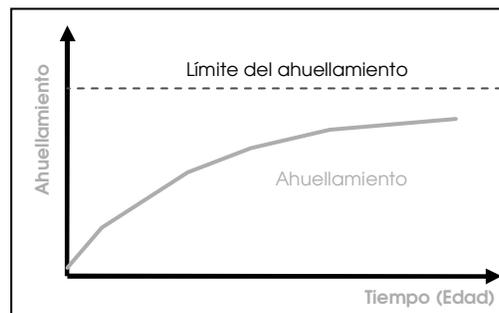


Figura 75. Comportamiento típico del ahuellamiento.

La modelación del ahuellamiento se realiza después que todos los valores de defectos de la superficie (grietas, pérdida de áridos, baches y fallas de borde) al final del año han sido calculados.

El modelo de ahuellamiento está basado en tres componentes:

- **Densificación inicial.** La densificación inicial depende del grado de compactación relativa de la base, la subbase y las capas del subsuelo. La densificación inicial está dada por:

$$RDO = K_{rid} \left[a_0 (YE4 10^6)^{(a_1 + a_2 DEF)} SNP^{a_3} COMP^{a_4} \right]$$

La variable "DEF" contenida en la anterior ecuación se refiere a las deflexiones medidas con viga Benkelman, para tal propósito se propone utilizar las correlaciones obtenidas por la Pontificia Universidad Javeriana como resultado del contrato IDU No. 529 de 2002.

- **Deformación estructural.** Se plantean de forma separada los modelos para deformaciones estructurales sin grietas y deformaciones estructurales después del agrietamiento.

Si no se presentan fisuras, el modelo está gobernado por la siguiente ecuación:

$$\Delta RDST_{uc} = K_{rst} (a_0 \text{ SNP}^{a_1} \text{ YE4}^{a_2} \text{ COMP}^{a_3})$$

Si por el contrario, si se presentan fisuras, el modelo está gobernado por la siguiente ecuación:

$$\Delta RDST_{crk} = K_{rst} [a_0 \text{ SNP}^{a_1} \text{ YE4}^{a_2} \text{ MMP}^{a_3} \text{ ACX}_a^{a_4}]$$

- **Deformación plástica.** El modelo de deformación plástica incluye la variable CDS, la cual indica en donde la superficie es propensa a deformaciones plásticas. La forma general del modelo de deformación plástica (sin incluir propiedades de los materiales) está dada por:

$$\Delta RDPD = K_{rpd} \text{ CDS}^3 a_0 \text{ YE4} \text{ Sh}^{a_1} \text{ HS}^{a_2}$$

La variable "Sh" contenida en la anterior ecuación se refiere a la velocidad de los vehículos pesados en km/h, para la cual se adoptará un valor de 60 km/h, siendo ésta la mayor velocidad de circulación permitida en la Ciudad.

- **Modelo de rugosidad.** El modelo de rugosidad está integrado por varios componentes (grietas, desintegración, deformación y mantenimiento). El incremento total de la rugosidad es la suma de estos componentes.

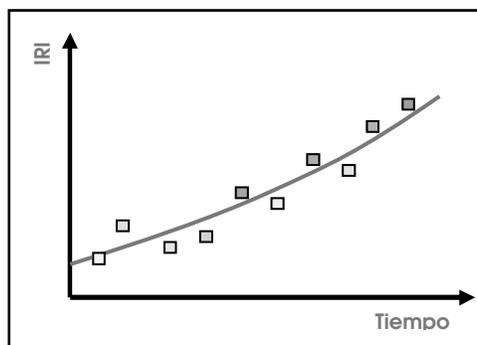


Figura 76. Comportamiento típico de la rugosidad.

- **Estructural.** El componente estructural de la rugosidad se relaciona con la deformación de los materiales del pavimento bajo esfuerzos de corte impuestos por las cargas de tráfico. Este componente está dado por:

$$\Delta RI_s = \alpha_o \exp (m K_{gm} AGE^3)(1 + SNPK_b)^{-5} YE^4$$

- **Grietas.** El cambio incremental en la rugosidad debido a grietas está dado por:

$$\Delta RI_c = \alpha_o \Delta ACRA$$

- **Ahuellamiento.** El cambio incremental en la rugosidad debido a la variación del ahuellamiento está dado por:

$$\Delta RI_r = \alpha_o \Delta RDS$$

- **Baches.** El efecto de los baches depende del número de vehículos que golpean los baches, lo cual a su vez depende del volumen de tráfico y de la libertad de maniobra. El cambio en la rugosidad es calculado de la siguiente forma si la política de reparaciones es parcial:

$$\Delta RI_t = \alpha_o(\alpha_1 - FM) * \Delta NPT * (NPT_\alpha + \Delta NPT/2)^{\alpha_2}$$

- **Medio ambiente.** El componente ambiental de la rugosidad está influenciado por factores que incluyen la temperatura y las fluctuaciones de humedad. Este componente está dado por:

$$\Delta RI_e = m * K_{gm} * RI_\alpha$$

Finalmente, el cambio total de la rugosidad del pavimento está dado por:

$$\Delta RI = K_{gp} (\Delta RI_s + \Delta RI_c + \Delta RI_r + \Delta RI_t) + \Delta RI_e$$

2.11.3.7. Modelos de deterioro en pavimentos rígidos.

Al respecto importante aclarar que los modelos de deterioro que incluye HDM-4 para pavimentos rígidos no han sido evaluados y la incertidumbre en los datos que arrojan es alta.

- **Modelo de grietas.** El modelo de grietas de HDM-4 considera grietas transversales en pavimentos de concreto debido a altos niveles de esfuerzos en las capas o defectos originados por fatiga de los materiales. Las tensiones son causadas generalmente por la combinación de efectos térmicos, cambios en la humedad y cargas de tráfico.

Las relaciones de este modelo son dadas de forma separada para predecir las grietas transversales en pavimentos en concreto con juntas y pavimento en concreto reforzado con juntas.

- **Pavimentos en concreto con juntas.** El agrietamiento transversal está modelado como una función de la fatiga acumulada en las losas. El porcentaje de losas agrietadas está dado por:

$$PCRACK = K_{jp_c} * \frac{100}{1 + 1.41 * FD^{-1.66}}$$

- **Pavimentos en concreto reforzado con juntas.** Las grietas transversales de severidad baja usualmente se presentan en pavimentos en concreto reforzados con junta debido a la contracción del concreto causada por variaciones en la temperatura. El acero de refuerzo en un pavimento en concreto reforzado con juntas, sostiene las grietas cerradas firmemente y asegura la transferencia de carga por el dispositivo de seguridad agregado. Sin embargo, la propagación de grietas puede incrementarse debido a cargas repetidas de tráfico y a efectos ambientales.

El número de grietas transversales por milla está dado por la siguiente relación:

$$DCRACK = K_{jr_c} * AGE^{2.5} * \left[\begin{array}{l} 6.88 * 10^{-5} * FI/SLABTHK + NE4 * (0.116 - 0.073 * BASE) \\ * (1 - \exp(-0.032 * MI)) \\ * \exp[7.5518 - 66.5 * PSTEEL - (1 - 5 * PSTEEL) * E_c * 10^{-6}] \end{array} \right]$$

- **Modelo de escalonamiento.** El escalonamiento es causado por la pérdida de material fino debajo de las losas y el aumento de material fino debajo de las losas próximas.

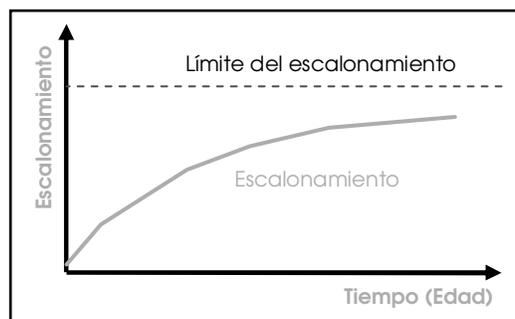


Figura 77. Comportamiento típico del escalonamiento.

El modelo de deterioro de pavimentos de HDM-4 considera escalonamiento en pavimentos en concreto con junta (con y sin dovelas de transferencia de carga) y en pavimentos en concreto reforzado con junta.

- **Pavimentos en concreto con juntas y sin dovelas de transferencia de carga.** La relación para la modelación del escalonamiento en pavimentos en concreto con juntas sin dovelas de transferencia de carga, es la siguiente:

$$FAULT = K_{jpn_f} * NE4^{0.25} * \begin{bmatrix} 0.2347 - 0.1516 * Cd - 0.00025 * (SLABTHK^2 / JTSPACE^{0.25}) \\ - (0.0115 * BASE + 7.78 * 10^{-8} * FI^{1.5} * PRECIP^{0.25}) \\ - (0.002478 * DAYS90^{0.5} - 0.0415 * WIDENED) \end{bmatrix}$$

- **Pavimentos en concreto con juntas y con dovelas de transferencia de carga.** El uso de dovelas como mecanismo de transferencia de carga reduce el escalonamiento en pavimentos de concreto. El escalonamiento en pavimentos en concreto con juntas y con dovelas de transferencia de carga se predice de acuerdo con la siguiente relación:

$$FAULT = K_{jpd_f} * NE4^{0.25} * \begin{bmatrix} 0.0628 * (1 - Cd) + 3.673 * 10^{-9} * BSTRESS^2 \\ + (4.116 * 10^{-6} * JTSPACE^2 + 7.466 * 10^{-10} * FI^2 * PRECIP^{0.5}) \\ - (0.009503 * BASE - 0.01917 * WIDENED + 0.0009217 * AGE) \end{bmatrix}$$

- **Pavimentos en concreto reforzado con juntas.** La relación para la modelación del escalonamiento en pavimentos en concreto reforzado con junta es la que se consigna a continuación:

$$FAULT = K_{jrf} * NE4^{0.25} * \begin{bmatrix} 0.0628 * (1 - Cd) + 3.673 * 10^{-9} * BSTRESS^2 \\ + (4.116 * 10^{-6} * JTSPACE^2 + 7.466 * 10^{-10} * FI^2 * PRECIP^{0.5}) \\ - (0.009503 * BASE - 0.01917 * WIDENED + 0.0009217 * AGE) \end{bmatrix}$$

- **Modelo de fisura de borde.**

- **Pavimentos en concreto con juntas.**
- **Pavimentos en concreto reforzado con juntas.** Las fisuras de borde transversales en pavimentos en concreto reforzado con juntas se predicen de acuerdo con la siguiente relación:

$$SPALL = K_{jr_s} * AGE^3 * JTSPACE * 10^{-5} * \left[\begin{array}{l} 1.94 * DWLCOR + 8.819 * BASE * (1 - PREFSEAL) \\ + 7.01 * FI * 10^{-3} \end{array} \right]$$

- **Modelo de fallas.** Este es el principal modo de deterioro que ocurre en pavimentos de concreto reforzado continuo. Las fallas localizadas son debidas al rompimiento del acero de refuerzo. Esto es causado por los esfuerzos y tensiones inducidas en el concreto y en el acero por las cargas de tráfico y por los factores ambientales.

Las fallas en pavimentos de concreto reforzado continuo se predicen de la siguiente forma:

$$\text{Log}_e(\text{FAIL}) = K_{cr_f} * \left[\begin{array}{l} 6.8004 - 0.0334 * \text{SLABTHK}^2 - 6.5858 * \text{PSTEEL} \\ + 1.2875 * \log_e(\text{NE4}) - 1.1408 * \text{AB} - 0.9367 * \text{SB} \\ - 0.8908 * \text{GB} - 0.1258 * \text{CHAIRS} \end{array} \right]$$

- **Modelo de rugosidad.**

- **Pavimentos en concreto con juntas.** La rugosidad en pavimentos en concreto con juntas es calculado en función del escalonamiento, de las fisuras de borde y de las grietas transversales:

$$RI_t = K_{jpr} * (RI_o + 2.6098 * TFAULT + 1.8407 * SPALL + 2.2802 * 10^{-6} * TCRACKS^3)$$

- **Pavimentos en concreto reforzado con juntas.** La rugosidad en pavimentos en concreto reforzado con juntas es calculado en función del PSR (Índice de serviciabilidad):

$$RI_t = K_{jrr} * (-\log_e((0.2 * PSR_t) / 0.0043))$$

- **Pavimentos en concreto reforzado continuo.** La rugosidad en pavimentos en concreto reforzado continuo es calculado como una función del PSR (Índice de serviciabilidad):

$$RI_t = K_{crr} * (-\log_e((0.2 * PSR_t) / 0.0043))$$

Como se puede observar, los modelos de deterioro HDM 4 no presentan curvas para la evaluación del deterioro de la capacidad estructural de los pavimentos. Sin embargo, la capacidad estructural se encuentra ligada, especialmente en los pavimentos flexibles, a los modelos de deterioro referentes a la evolución de las grietas anchas y grietas totales. Se plantea que el Consultor que

desarrolle el proceso de implementación de estos modelos proponga un procedimiento, el cual, a partir de las variables analizadas, permita evaluar la evolución de la capacidad estructural del pavimento, dato necesario para poder aplicar el proceso de gestión establecido en el programa Vallas Verdes.

2.11.4. Plan de aseguramiento de la calidad

Desde la Fase I del proyecto, la Pontificia Universidad Javeriana recomendó el diseño, implementación y seguimiento de un plan de aseguramiento de la calidad con el objetivo de poder contar con una herramienta administrativa y técnica que permitiera obtener un producto con la calidad exigida por la Entidad.

En el desarrollo de la presente Fase, se diseñó e implementó el plan de aseguramiento de la calidad con base en la norma ISO 9001 Versión 2000. El alcance logrado en este tema se consigna en el presente informe y se recomienda que los consultores que desarrollen las Fases posteriores, revisen, retroalimenten y mejoren el proceso definido durante el presente proyecto.

2.11.5. Seguimiento y control a las obras de mantenimiento y rehabilitación ejecutadas sobre las pistas de calibración definidas en la presente Fase y las Fases posteriores

Uno de los criterios utilizados en el presente proyecto para la escogencia de los elementos viales definidos como pistas de calibración del proceso consistió en tomar elementos cuyo estado superficial tuviera un nivel aceptable de serviciabilidad. Lo anterior con dos objetivos básicos:

- Evaluar desde etapas tempranas la evolución de las fallas superficiales.
- Contar con elementos viales que no fueran objeto de intervenciones durante el proceso de toma de datos.

No obstante lo anterior, es posible que varios de los elementos viales escogidos durante la presente Fase y los que se definan en Fases posteriores sean intervenidos mediante actividades de mantenimiento y rehabilitación. En realidad, esta situación no es tan importante, ya que el análisis de los resultados obtenidos mediante las mediciones periódicas debe contemplar procesos de ajuste a las pistas que sean intervenidas. Lo que sí resulta importante, es poder contar con un mecanismo que permita realizar un seguimiento y control a los procesos y procedimientos llevados a cabo en las intervenciones, con el objeto de poder establecer la incidencia de las mismas sobre la evolución del deterioro de las estructuras de pavimento original. El Consultor que desarrolle las Fases posteriores deberá presentar una propuesta metodológica en tal sentido.

Como se puede observar, el proyecto en general presenta un mínimo avance frente a los resultados globales esperados una vez se desarrollen todas y cada una de las actividades propuestas en el presente Plan de Trabajo. Sin embargo, el esfuerzo económico y técnico que ha demandado el proyecto desde su concepción y la importancia de los resultados finales en el proceso de Gestión de Pavimentos, obliga a la Entidad a continuar en esta tarea, pionera en América Latina.

2.12. PROGRAMA DE TRABAJO

La firma T.N.M. Limited en el desarrollo del contrato, período comprendido entre el 1 de octubre de 2004 y el 1 de mayo de 2005, dio cumplimiento a todas las actividades programadas y acordadas en conjunto con el IDU y la Interventoría, de acuerdo a la última reprogramación de actividades planteada y aprobada por la interventoría en comité del día 03 de febrero de 2004. En el **Anexo 10** se consigna la última reprogramación del plan de actividades.