UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

ÍNDICES DE CONDICIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Trabajo de graduación

Que para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil

Presenta:

Daniel Mata Rojas

Directora de Proyecto de Graduación:

Ing. Jenny Chaverri Jiménez, MscEng

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

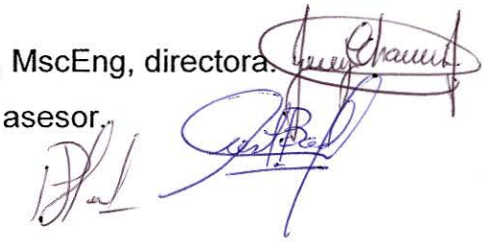
Costa Rica Febrero, 2010

Tribunal Examinador

-Ing. Jenny Chaverri Jiménez, MscEng, directora.

-Ing. Gustavo Badilla Vargas, asesor.

-Ing. Pablo Torres, asesor.



5 de enero de 2010

El suscrito, Daniel Mata Rojas, cédula 1-1285-0467, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné A43226, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación, bajo la dirección de la Ing. Jenny Chaverri Jiménez, MscEng, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos Nº6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta Ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

Dedicado a mis padres por todo el amor y el apoyo que me brindan en mi vida, para ellos con todo mi amor este gran logro.

Agradecimientos

Agradezco mis padres y a todos mis amigos, quienes en todo momento apoyaron mi crecimiento como persona y como profesional. También agradezco al personal del Lanamme UCR por el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.

A todos MUCHAS GRACIAS!

INDICE GENERAL

Contenidos

CAPITULO 1. ASPECTOS GENERALES 13

1.1 JUSTIFICACIÓN 13
1.1.1 Problema Específico 13
1.1.2 Importancia 16
1.2. ANTECEDENTES TEÓRICOS Y PRÁCTICOS DEL PROBLEMA 17
1.3. MARCO TEÓRICO DEL ANÁLISIS DEL PROBLEMA 21
1.3.1 Primera Etapa 22
1.3.2. Segunda Etapa 22
1.3.3. Tercera Etapa 24
1.3.4. Cuarta etapa 25
1.3.5. Quinta etapa 26
1.4. OBJETIVOS 27
1.4.1. Objetivo General 27
1.4.2. Objetivos Específicos 27
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES 28

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO 30

2.1. CONCEPTOS GENERALES Y DEFINICIONES 30
2.1.1. Respuesta estructural del pavimento 40
2.1.2. Respuesta funcional del pavimento 46
2.1.3. Índices de condición 51
2.1.4. Conceptos básicos de estadística 59
2.1.4.1 Media aritmética 59
2.1.4.2 Medidas de dispersión 60
2.1.4.3 Regresión 61
2.1.4.4 Distribución normal 63
2.1.5. Optimización lineal 65

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA 67

3.1. RECOPILACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA BASE DE DATOS 67
3.2. ÍNDICES ESTRUCTURALES 69
3.3. ÍNDICE FUNCIONAL 75
3.3. FORMULACIÓN DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTOS (PCI) 76

CAPÍTULO 4. ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO EN ESTUDIO 80

4.1. UBICACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTRUCTURAS 83
4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS TRAMOS EN ESTUDIO 86

CAPITULO 5. APLICACIÓN DE LOS ÍNDICES DE LAS CARRETERAS 88

5.1. ÍNDICES DE CONDICIÓN ESTRUCTURALES DE LAS CARRETERAS 89
5.2. ÍNDICES DE CONDICIÓN FUNCIONALES DE LAS CARRETERAS 93

CAPITULO 6. RESULTADOS 97

6.1. ÍNDICES ESTRUCTURALES 97
6.2 EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN FUNCIONAL DE LOS PAVIMENTOS 114
6.3 FORMULACIÓN DEL ÍNDICE COMPUESTO 118

6.4 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS 122
6.4.1 Aplicabilidad de índices estructurales 122
6.4.2 Índice funcional 127
6.4.3 Formulación del índice compuesto, PCI 128

CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 131

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA 134

CAPÍTULO 9. ANEXOS 136

9.1. ANEXO A. LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS, PARA CARACTERIZACIÓN DE ESPESORES Y MATERIALES DE LAS CAPAS DE LOS PAVIMENTOS 137
9.2. ANEXO B. VALORES OBTENIDOS DE LOS ÍNDICES DE CONDICIÓN ESTRUCTURALES 141
9.3. ANEXO C. MAPAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO 145
9.4. ANEXO D. BASE DE DATOS PARA EL RETROCÁLCULO DE MÓDULOS. CARACTERIZACIÓN DE LA CONDICIÓN FUNCIONAL DE LOS TRAMOS. 152
9.5. ANEXO E. GRÁFICOS DE CORRELACIÓN PARA LOS ÍNDICES ESTRUCTURALES, DIFERENCIADO POR TIPO DE ESTRUCTURA. 198
9.6. ANEXO F. RESUMEN DE LA PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA LA ZONA DE CONSERVACIÓN DEL CONAVI 1-9 (HEREDIA). RESULTADOS DEL SOFTWARE WOODSTOCK DE REMSOFT INC. 211
9.7. ANEXO G. GRÁFICAS PARA CORRECCIÓN POR TEMPERATURA (FUENTE: AASHTO, 1993). 221

Figuras

Figura 1. Diagrama de un sistema de administración de carreteras. 31
Figura 2. Actividades principales de un sistema de gestión de pavimentos. 32
Figura 3. Impresión de ArcView, Zonificación de la red vial según contratos de conservación vial, CONAVI. 34
Figura 4. Impresión de ArcView, tramificación de la red vial, tramos homogéneos del LanammeUCR. 34
Figura 5. Estructura de pavimento típica 36
Figura 6. Gráficos para la determinación de los coeficientes estructurales de bases 37
Figura 7. Gráficos para la determinación de los coeficientes estructurales de carpetas asfálticas. .. 38
Figura 8. Módulo de elasticidad 41
Figura 9. Respuesta de estructura a carga suministrada 43
Figura 10. Modelo de cuarto de carro. 47
Figura 11. Perfilómetro laser del LanammeUCR 48
Figura 12. Rango de IRI del Banco Mundial. 51
Figura 13. Definición del índice AREA. 53
Figura 14. Comparación del índice AREA para dos estructuras con diferente estado de deterioro. 54
Figura 15. Distribución normal. 63
Figura 16. Límites de confianza. 64
Figura 17. Tipos de estructura estudiadas. 69
Figura 18. Teoría de probabilidades para estimación de máximos y mínimos de la muestra. 71
Figura 19. Proceso de retrocálculo de módulos empleando el Sofware ELSYM5. 74
Figura 20. Ubicación de las zonas de estudio. 83
Figura 21. Secuencia seguida en el proceso de elección de los pesos k_i del Índice de Condición del Pavimento, PCI. 119
Figura 22. Comportamiento de la inversión anual durante el periodo de 20 años para los diferentes escenarios. 120
Figura 23. Comportamiento del PCI promedio de la red para los diferentes escenarios. 120
Figura 24. Ventanas de operación. 127
Figura 25. Perforaciones Zona 1-7 y Zona 1-9. 138

Figura 26. Perforaciones Zona 3-1. ..... *139*
Figura 27. Perforaciones Zona 4-2. ..... *140*
Figura 28. Caracterización de IRI para las zonas 1-7 y 1-9. ..... *146*
Figura 29. Caracterización de deflectometría para las zonas 1-7 y 1-9 ..... *147*
Figura 30. Caracterización de IRI para la zona 3-1. ..... *148*
Figura 31. Caracterización de deflectometría para la zona 3-1. ..... *149*
Figura 32. Caracterización de IRI para la zona 4-2. ..... *150*
Figura 33. Caracterización de deflectometría para la zona 4-2. ..... *151*
Figura 34. Costo total de la inversión. *212*
Figura 35. Estado de la red estudiada (ΣPCI). *213*
Figura 36. Comportamiento anual de la cantidad de carreteras en muy buen estado, en m^2. ..... *214*
Figura 37. Comportamiento anual de la cantidad de carreteras en buen estado, en m^2. ..... *215*
Figura 38. Comportamiento anual de la cantidad de carreteras en regular estado, en m^2. ..... *216*
Figura 39. Comportamiento anual de la cantidad de carreteras en mal estado, en m^2. ..... *217*
Figura 40. Comportamiento anual de la cantidad de carreteras en muy mal estado, en m^2. ..... *218*
Figura 41. Factor de corrección por temperatura para estructuras con bases granulares *222*
Figura 42. Factor de corrección por temperatura para estructuras con bases estabilizadas. *223*

Tablas

Tabla 1. Metodología de AASHTO 93 para la determinación del coeficiente de drenaje..... 38
Tabla 2. Rangos de módulos de elasticidad para distintas capas. 41
Tabla 3. Límites internacionales para aceptación de proyectos..... 49
Tabla 4. Tabla de pago en función del IRI. 50
Tabla 5. Rangos de IRI para la red vial nacional (LanammeUCR)..... 50
Tabla 6. Rangos de AREA según estructuras de pavimento de Colombia..... 55
Tabla 7. Índices de condición estructural: parámetro propuesto para el establecimiento de las diferentes relaciones. 58
Tabla 8. Interpretación del porcentaje de varianza explicada. 62
Tabla 9. Criterio de clasificación por nivel de tránsito. 68
Tabla 10. Tipos de estructura bajo estudio. 68
Tabla 11. Índices estudiados. 70
Tabla 12. Estimación de los valores máximos y mínimos para la deflexión central. 71
Tabla 13. Estimación de los valores máximos y mínimos para el índice AREA. 72
Tabla 14. Determinación de los valores máximo y mínimo del parámetro IRI. 76
Tabla 15. Escenario de programación de inversiones para Woodstock de Remsoft Inc. 78
Tabla 16. Propuestas de pesos para las variables del índice PCI. 79
Tabla 17. Información de los tramos de estudio de las zonas 1-7 y 3-1. 81
Tabla 18. Información de los tramos de estudio de las zonas 1-9 y 4-2. 82
Tabla 19. Caracterización climática de las zonas de estudio. 84
Tabla 20. Características de las regiones climáticas. 85
Tabla 21. Coeficiente de drenaje para las estructuras en estudio. 85
Tabla 22. Clasificación de los tramos muestreados. 87
Tabla 23. Tramos seleccionados para análisis 87
Tabla 24. Información de los índices analizados. 90
Tabla 25. Índices de condición, clase de estudio Tipo 1 (TPDA alto, base estabilizada)..... 90
Tabla 26. Índices de condición, clase de estudio Tipo 2 (TPDA alto, base granular). 91
Tabla 27. Índices de condición, clase de estudio Tipo 3 (TPDA moderado-bajo, base estabilizada). 91
Tabla 28. Índices de condición, clase de estudio Tipo 4 (TPDA moderado-bajo, base granular). 91
Tabla 29. Índices de condición, clase de estudio Tipo 5 (Tratamiento superficial, base granular). 92
Tabla 30. Índices de condición, clase de estudio Tipo 6 (Tratamiento superficial, base estabilizada). 92
Tabla 31. Resumen de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el Índice de Rugosidad del Pavimento (PRI) para la zona 1-7. 93
Tabla 32. Resumen de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el Índice de Rugosidad del Pavimento (PRI) para la zona 1-9. 94
Tabla 33. Resumen de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el Índice de Rugosidad del Pavimento (PRI) para la zona 3-1. 95
Tabla 34. Resumen de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el Índice de Rugosidad del Pavimento (PRI) para la zona 4-2. 95
Tabla 35. Valores de R^2 para los índices AREA, SAI (I y II) y BCI1. 98
Tabla 36. Información para análisis de varianza. 109
Tabla 37.Sumario de resultados de la regresión múltiple 109
Tabla 38. Prueba de hipótesis para medir la significancia del modelo. 110
Tabla 39. Porcentajes de varianza explicada del Análisis de Varianza. 112
Tabla 40. Valores de R^2 para otros índices de interés. 113
Tabla 41. Comparación de las diferentes propuestas. 121
Tabla 42. Resumen del estado de las correlaciones, para los tipos específicos 123
Tabla 43. Resumen del estado de las correlaciones, para la condición general 126

Tabla 44. Índices de condición, clase de estudio Tipo 1 (TPDA alto, carpeta asfáltica + base estabilizada). *142*
Tabla 45. Índices de condición, clase de estudio Tipo 2 (TPDA alto, carpeta asfáltica + base granular). *142*
Tabla 46. Índices de condición, clase de estudio Tipo 3 (TPDA moderado-bajo, carpeta asfáltica + base estabilizada). *142*
Tabla 47. Índices de condición, clase de estudio Tipo 4 (TPDA moderado-bajo, carpeta asfáltica + base granular) *143*
Tabla 48. Índices de condición, clase de estudio Tipo 5 (Tratamiento superficial + base granular). *144*
Tabla 49. Índices de condición, clase de estudio Tipo 6 (Tratamiento superficial + base estabilizada). *144*
Tabla 50. Variación anual de los costos totales de inversión para cada escenario. *219*
Tabla 51. Variación anual de la condición total de la red para cada escenario (PCI promedio). *220*

Gráficos

Gráfico 1. Estado de la Red Vial según las deflexiones. (LanammeUCR, 2006)..... 19
Gráfico 2. Estado de la Red Vial según el IRI. (LanammeUCR, 2006) 19
Gráfico 3. Relación SAI 1 vs. Número estructural..... 102
Gráfico 4. Relación SAI 2 vs. Número estructural..... 102
Gráfico 5. Relación SAI 1 vs. Deformación a tensión de la fibra extrema inferior de la capa de rodadura o base estabilizada, ε_t (criterio de fatiga)..... 103
Gráfico 6. Relación SAI 2 vs. Deformación a tensión de la fibra extrema inferior de la capa de rodadura o base estabilizada, ε_t (criterio de fatiga)..... 103
Gráfico 7. Relación BCI vs. Módulo de subrasante (psi)..... 104
Gráfico 8. Relación BCI vs. Deformación a compresión de la fibra superior de la subrasante, ε_c (criterio de fatiga). 104
Gráfico 9. Relación SAI 1 vs. Número estructural. Ajuste polinómico..... 105
Gráfico 10. Relación SAI 2 vs. Número estructural. Ajuste polinómico. 106
Gráfico 11. Relación SAI 1 vs. E_t (criterio de fatiga). Ajuste polinómico..... 106
Gráfico 12. Relación SAI 2 vs. E_t (criterio de fatiga). Ajuste polinómico..... 107
Gráfico 13. Comportamiento del IRI vs desviación estándar de la muestra. TH 44..... 116
Gráfico 14. Comportamiento del IRI vs desviación estándar de la muestra. TH 374 116
Gráfico 15. Correlación SAI vs SN, tipo 1. 199
Gráfico 16. Correlación SAI vs SN, tipo 2. 199
Gráfico 17. Correlación SAI vs SN, tipo 3. 200
Gráfico 18. Correlación SAI vs SN, tipo 4. 200
Gráfico 19. Correlación SAI vs SN, tipo 5. 201
Gráfico 20. Correlación SAI vs SN, tipo 6. 201
Gráfico 21. Correlación SAI vs ε_t, tipo 1. 202
Gráfico 22. Correlación SAI vs ε_t, tipo 2. 202
Gráfico 23. Correlación SAI vs ε_t, tipo 3. 203
Gráfico 24. Correlación SAI vs ε_t, tipo 4. 203
Gráfico 25. Correlación SAI vs ε_t, tipo 6. 204
Gráfico 26. Correlación BCI vs Mr, tipo 1. 204
Gráfico 27. Correlación BCI vs Mr, tipo 2. 205
Gráfico 28. Correlación BCI vs Mr, tipo 3. 205
Gráfico 29. Correlación BCI vs Mr, tipo 4. 206
Gráfico 30. Correlación BCI vs Mr, tipo 5. 206
Gráfico 31. Correlación BCI vs Mr, tipo 6. 207
Gráfico 32. Correlación BCI vs ε_c, tipo 1. 207
Gráfico 33. Correlación BCI vs ε_c, tipo 2. 208
Gráfico 34. Correlación BCI vs ε_c, tipo 3. 208
Gráfico 35. Correlación BCI vs ε_c, tipo 4. 209
Gráfico 36. Correlación BCI vs ε_c, tipo 5. 209
Gráfico 37. Correlación BCI vs ε_c, tipo 6. 210

Mata Rojas, Daniel
Índices de Condición de Pavimentos Flexibles
Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:
D. Mata R., 2010
Xii, 124, [87]h; ils. Col. – 24 refs.

RESUMEN

Los índices de condición son una herramienta fundamental para los Sistemas de Administración de Activos. El uso de índices ayuda a caracterizar de manera rápida y precisa la condición de la red. Uno de los índices más utilizados es el Índice de Condición de Pavimentos (PCI), el cual para esta investigación estuvo compuesto por un índice estructural y funcional.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la aplicabilidad de algunos índices de condición de pavimentos, generados y utilizados en los países desarrollados, a las condiciones presentes en Costa Rica, así como valorar la procedencia de ejecutar una investigación de mayor escala que contemple una caracterización de materiales exhaustiva para las diferentes estructuras, tránsito y climas existentes en nuestro país. Finalmente, se buscó recomendar una formulación matemática para el cálculo del Índice de Condición de Pavimentos (PCI).

Este trabajo hizo uso de una limitada base de datos, organizada en diferentes tipos de estructuras (seis tipos), caracterizados mediante criterios de volumen de tránsito y tipo de material de las capas de la estructura de pavimento.

Se obtuvo como resultado que Índice de Adecuación Estructural (SAI) presenta una alta correlación con el Número Estructural (SN) para pavimentos con base estabilizada; por otro lado no fue posible concluir una buena correlación para los otros tipos de estructuras debido al número de muestras existente. Con respecto al Índice de Curvatura de la Base (BCI), se encontraron niveles de correlación entre moderados y altos con respecto al Módulo de Resilencia de la subrasante. Del mismo modo, al analizar el Índice de Regularidad de Pavimentos (PRI), se determinó que el valor máximo del Índice Internacional de Regularidad Superficial (IRI) es de 13,03m/km para las condiciones de la red vial de Costa Rica. Finalmente, se tomó el caso de estudio de la zona 1-9 de conservación vial del CONAVI para evaluar los pesos relativos del componente funcional y estructural del PCI mediante un análisis de sensibilidad de inversiones. Para este caso se determinó que el rango del peso relativo asociado al componente funcional debe de estar entre 0,5 y 0,65. Los resultados de esta investigación demuestran la factibilidad de invertir más recursos para el desarrollo de una investigación a mayor escala.

Ing. Jenny Chaverri Jiménez, MScEng
Escuela de Ingeniería Civil.

Capitulo 1. Aspectos generales

1.1 Justificación

Con el presente proyecto de graduación se busca implementar los índices de condición de pavimentos flexibles para el sistema de carreteras de Costa Rica. Estos índices son la base primordial para los procesos de planificación de inversiones a corto, mediano y largo plazo en materia de mantenimiento y preservación de carreteras, ofreciendo así la posibilidad de realizar intervenciones de manera oportuna y efectiva según las necesidades reales de la red.

Tienen la ventaja de que permiten contar con información precisa a partir de ensayos no destructivos (sin dañar la estructura de pavimento), y además permiten evaluar los pavimentos sin necesidad de trabajos exhaustivos, costosos y poco prácticos, dentro del marco del proceso de programación de inversiones.

1.1.1 Problema Específico

Los índices de condición de las carreteras son fundamentales para implementar un Sistema de Administración de Infraestructura con objetividad. Además, estos índices son indispensables para evaluar el desempeño de una carretera, generar curvas de deterioro necesarias para programación de inversiones, rendición de cuentas y fiscalización, entre otras aplicaciones adicionales.

En Costa Rica el estado de la Red Vial se encuentra en una condición de deterioro significativo según estudios realizados por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la UCR (en adelante LanammeUCR).

Estudios[1] revelan que entre el 2004 y el 2006 la Red Vial Nacional se ha deteriorado más en su condición estructural y funcional a pesar de las inversiones hechas por el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) en la conservación vial.

Esta situación se debe a que no existe un plan de inversiones a largo plazo, y más bien, las decisiones que se realizan para mantener la red vial se fundamentan en subjetivismo y no existe una visión o estrategia clave para recuperar la Red Vial Nacional. Como resultado, la Red Vial se sigue deteriorando y en consecuencia, el patrimonio nacional va disminuyendo año con año.

El LanammeUCR es el ente encargado actualmente de realizar una evaluación cada dos años del estado de la Red Vial Nacional pavimentada, esto según lo establece la ley No. 8114 sobre la Simplificación y Eficiencia Tributaria en su artículo 5. Hasta la fecha de la realización del informe se han realizado únicamente tres informes de evaluación de la Red Nacional pavimentada, el primero en el 2004, el segundo en el 2006 y el último y más reciente el presentado en el 2008. La información generada en este proyecto es un insumo indispensable para elaborar un plan de inversiones.

El LanammeUCR cuenta con el equipo necesario para poder determinar la calidad de los pavimentos adecuadamente, posee un deflectómetro de impacto, el cual mide las deflexiones al someter el pavimento a una fuerza que simula cargas de tránsito. También cuenta con un perfilómetro láser el cuál mide las irregularidades obtenidas en un tramo de una carretera. El problema recae en la metodología utilizada por el MOPT una vez que se tienen los datos ya que no se le esta sacando provecho a los datos de campo obtenidos, solo a una pequeña escala. Esto debido a que no se cuenta con un método eficiente para evaluar la condición de las estructuras a partir de la información de deflexiones y regularidad.

[1] Referencias 8 y 9.

Los índices de condición en estructuras de pavimentos se obtienen a partir de ensayos no destructivos. Como por ejemplo el deflectómetro de impacto (FWD por sus siglas en ingles de “Falling Weight Deflectometer”) y el perfilómetro láser. Con estos índices, se puede determinar de forma muy rápida y efectiva la condición de la estructura del pavimento y hasta se puede determinar la capa estructural que se encuentra más débil. Estos índices permiten generar curvas de deterioro del pavimento que predicen el patrón de deterioro de la estructura. Con esta información es posible determinar el tipo de tratamiento de mantenimiento de rehabilitación que la estructura necesita, así como planes de inversiones, y por lo tanto, será posible administrar la infraestructura bajo los principios de eficiencia y eficacia. De ahí radica la importancia de desarrollar este tema de investigación.

El otro aspecto que se deja de lado a la hora de evaluar las carreteras es que aunque en Costa Rica se cuenta con la información de deflectometría y regularidad superficial (medida mediante el Índice de Rugosidad Internacional, IRI), como ya se expuso anteriormente, a la hora de hacer el análisis no se cuenta con una metodología adecuada, puesto que existen diferentes índices de condición de pavimentos que generarían un mejor criterio sobre el estado de las carreteras y que no se están empleando.

Actualmente solo se utilizan únicamente dos índices para calificar el estado de los pavimentos:

El índice IRI (por sus siglas en inglés “Internacional Roughness Index”) relacionado internacionalmente con el confort de una carretera, está en función de las irregularidades que tenga la misma por kilómetro. Para este índice se manejan 3 rangos según la AASHTO[2] (por sus siglas en inglés American Association of

[2] Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la UCR. **Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada**, Costa Rica, 2006.

State Highway and Transportation Officials) para los cuales se tiene calificaciones de regularidad buena, moderada o pobre.

Y el índice SAI, que es función de los datos de deflectometría de la estructura de pavimento. Las deflexiones en el pavimento son generadas por un deflectómetro de impacto (FWD por sus siglas en ingles de “Falling Weight Deflectometer”). Para esto se tienen 4 rangos de calificación fundamentados por 4 parámetros técnicos dados por el LanammeUCR. De esta calificación se tiene una deflexión baja a los pavimentos buenos y de muy alta a pavimentos malos. Sin embargo, los rangos de calificación y que se reportan en los informes de evaluación de la Red Vial Nacional no hacen ningún tipo de distinción por tipo de carretera, por lo que surge la necesidad de subsanar este aspecto.

1.1.2 Importancia

Debido a los avances tecnológicos que se tienen día a día en materia de transportes hoy se puede analizar la calidad de los pavimentos de una manera más precisa y eficaz sin la necesidad de hacer ensayos destructivos en la carpeta asfáltica dañando así el pavimento, generando congestión en las vías y esperando mucho tiempo en análisis de laboratorio.

Es por esto que nace la necesidad e idea por medio del LanammeUCR de implementar un método de análisis que mejore los métodos de evaluación de pavimentos y ahorre todas las dificultades anteriores. También es fundamental generar metodologías para determinar las curvas de deterioro de pavimentos, las cuales son fundamentales para planificar inversiones.

De ahí recae la importancia de establecer índices que califiquen el estado de las carreteras según el estado de sus pavimentos, el cuál sea además un método de análisis que brinde soluciones a la hora de tomar decisiones, como por ejemplo, en cuanto al mantenimiento que se le deba brindar a las vías pensando en corto y

largo plazo economizando así dinero a los usuarios de las vías y al país en general a la hora de hacer sobrecapas u otros tipos de mantenimiento.

Al usar estos índices también se logra obtener el desempeño estructural de cada capa, lo cual ahorra hacer análisis más exhaustivos y específicos los cuales demandan más tiempo para conocer la capacidad estructural de cada capa. De ahí la importancia de evaluar su implementación ya que no solo nos dicen el estado de la capa asfáltica, sino de toda la estructura.

La red vial nacional cuenta con 4509 kilómetros aproximadamente, los cuales necesitan mantenimiento; este debe ser periódico y acorde con las necesidades de la ruta. En general en el momento preciso para que el gasto económico sea el adecuado. Con esto se evitan reconstrucciones totales que sean de muy alto costo generando pérdidas muy altas, las cuales causen que no se invierta en otras carreteras y formando así un ciclo.

Con los índices de condición de las carreteras se puede tener criterio para poder dar mantenimiento preventivo a todas las vías, ahorrándole al país mucho dinero. Además en lo que respecta a proyectos nuevos, reconstrucciones en ciertos tramos o recarpeteos se puede llegar a dar un diagnóstico del estado en que fueron entregados y así poder fiscalizar.

1.2. Antecedentes Teóricos y Prácticos del Problema

En lo que respecta al análisis de la condición de pavimentos, actualmente el LanammeUCR realiza informes cada dos años del estado de la red vial nacional. Hasta la fecha se han realizado tres informes (2004, 2006 y 2008, este último no estuvo disponible para el desarrollo de la investigación) en los cuales se muestra el estado de las carreteras según las deflexiones y las irregularidades que estas tengan.

Según las deflexiones que se tengan, el informe de evaluación del 2006 clasifica las carreteras que presentan volúmenes de tránsito entre moderados y altos[3] en 4 diferentes rangos, siendo las que tienen deflexiones de 0.25mm o menos como las que presentan mejores capacidades estructurales ya que se consideran las deflexiones como bajas y las de 0.70mm o más las de peores condiciones estructurales ya que se toman las deflexiones como muy altas. Para el rango entre 0.25mm y 0.45mm se califican las deflexiones como moderadas y entre 0.45mm a 0.70mm como deflexiones altas.

La metodología utilizada por el LanammeUCR se fundamenta en 4 criterios técnicos, estos son:

1. Período de vida útil: 12 años
2. Repeticiones admisibles de carga: mayor a 900.000 ejes equivalente de 8.200 kg
3. Modelo de fatiga para la capa asfáltica: Instituto del Asfalto
4. Desviación estándar promedio de las deflexiones en tramos cortos de 200 metros: 13×10^{-2} mm

Los resultados obtenidos en el 2006 por el LanammeUCR en cuanto a la clasificación de la Red Vial Nacional por medio de las deflexiones presentadas se muestran a continuación en el Gráfico 1, en este gráfico se aprecia además la que existía hasta entonces un 1.5% de la red que no pudo ser evaluado por no cumplir condiciones mínimas de seguridad en la vía; así como un 1.2% correspondientes evaluadas en el informe anterior que mostraban deterioros muy avanzados que no permitieron la medición.

[3] Referencia 9.

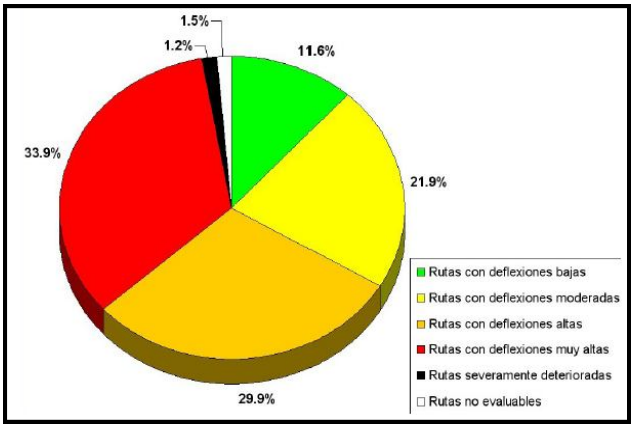


Gráfico 1. [4] Estado de la Red Vial según las deflexiones. (LanammeUCR, 2006)

El otro método de evaluar las carreteras es por medio de índice de regularidad (IRI) expuesto anteriormente. Para este se tienen 3 rangos de clasificación[5] siendo un IRI < 3.0m/km como regularidad buena e IRI > 5.0m/km como regularidad pobre. Para el rango entre 3.0m/km y 5.0m/km se tiene una clasificación de regularidad moderada. Los resultados obtenidos por el informe se muestran a continuación el Gráfico 2, donde se aprecia además que un porcentaje de la red (2.5%) no pudo ser evaluado debido al avanzado estado de deterioro.

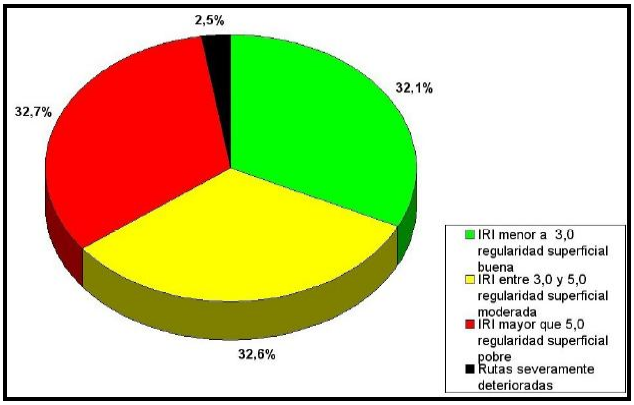


Gráfico 2. [6] Estado de la Red Vial según el IRI. (LanammeUCR, 2006)

[4] Referencia 9.
[5] Rango utilizado por la **AASHTO** (American Association of State Highway and Transportation Officials)
[6] Referencia 9.

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) realizaron en conjunto para abril del 2006 una metodología simplificada para la determinación de índices de priorización. Este es un informe el cual lleva el nombre de "Determinación del Índice de Priorización" realizado por los Ingenieros Tomas Figueroa y Carlos Villalta.

La idea del informe es priorizar las rutas por medio de un índice llamado: ***Índice de Priorización***[7] y según se deban intervenir de acuerdo a su deterioro. Para obtener el índice de priorización se dan variables que definen la condición del pavimento en función de condiciones generales, funcionales, estructurales y estratégicas, este último pensando en índices turísticos o de producción. Una limitación que se tiene es que no se cuenta muchas veces con todos los factores que afectan el índice de priorización por lo que no se obtiene resultados del todo reales, perdiendo así credibilidad; y tampoco le da importancia a las necesidades reales del pavimento.

En el país y propiamente en la UCR existen algunos proyectos de graduación en el área que aportan información de importancia. Estos se enfocan en lo que respecta a la infraestructura vial, el desempeño de los pavimentos y otros elementos que son de importancia.

En el trabajo "Zonificación climática de Costa Rica para la gestión vial" de Orozco (mayo 2007) se presenta un mapa del país en el que se dividen las regiones según el clima. Este trabajo es de importancia ya que parte del análisis que se piensa hacer es dividir las carreteras en grupos homogéneos según elementos como el clima.

En el informe "Determinación del Coeficiente de Rozamiento y la Textura del Pavimento y su correlación con la incidencia de accidentes" de Víquez (1998) se

[7] Ver referencia 12.

hace el estudio de los coeficientes de fricción que se pueden encontrar en las diferentes carreteras del país.

A nivel internacional se tiene el Proyecto de Doctorado NCHRP 10 – 48 hecho por el Sistema de Cambridge en colaboración de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), EEUU. El Proyecto de Doctorado NCHRP 10 – 48 genera una relación entre índices de condición y las deflexiones del FWD para la mayoría de índices de condición de diferentes estructuras de pavimento. Estos en función obviamente de las condiciones que se tiene propiamente en los EEUU. Esto hace que sea de gran importancia para el proyecto de graduación ya que se pretende utilizar una metodología similar que llegue a generar índices de condición de las carreteras que se familiaricen con las condiciones de Costa Rica.

1.3. Marco Teórico del Análisis del Problema

El método de evaluación de un pavimento utilizado normalmente suele tener componentes que dificultan su análisis. Esto en gran medida a que se deben realizar pruebas que dañen el pavimento, se debe contar con equipo especializado, se generan problemas o atrasos a los usuarios, entre otras dificultades. Los índices de condición de las carreteras son una manera fácil de medir el estado del pavimento o las capas que lo componen sin tener estos problemas.

Por otro lado los índices de condición de las carreteras pueden predecir el estado futuro de una vía mediante modelos de deterioro. Esto es de gran ayuda a la hora de tomar decisiones, no está de más decir que un adecuado mantenimiento a una vía puede ahorrar mucho al ente encargado de estas y a los mismos usuarios. También por medio de los índices de condición se puede fiscalizar un proyecto

recién finalizado, evaluando así a los involucrados de la construcción con un respaldo teórico del estado del pavimento entregado.

A la hora de evaluar una carretera se debe primero clasificar según la zona en que se encuentra, los elementos que la componen, el tránsito que la transita, entre otros factores de importancia. No se puede evaluar todas las rutas con el mismo sistema, por esto es que se busca implantar metodologías específicas según estas presenten homogeneidades o similitudes, y poder así dar ciertos rangos de calificación.

Adicionalmente, es necesario obtener rutas homogéneas que reúnan características similares con el fin de generar modelos de deterioro y así poder conocer su comportamiento a futuro; con esta información será factible predecir a largo plazo las intervenciones que se deban realizar.

Para la realización de la investigación se realizaron las siguientes etapas:

1.3.1 Primera Etapa

En esta etapa se hará una recopilación de toda la información que se tenga sobre el tema, al ser un tema bastante nuevo para Costa Rica, se hará revisión bibliográfica para tener un buen fundamento técnico para realizar esta investigación de forma satisfactoria La revisión bibliográfica que se realizara será en las diferentes bibliotecas de la Universidad de Costa Rica (en adelante UCR), así como en literatura internacional.

1.3.2. Segunda Etapa

Se recopilarán en una base de datos todas las mediciones hechas por el LanammeUCR sobre los 32 tramos en estudio, extraídos del proyecto BCEOM,

1996. Además otros tramos de los cuales se tenga información que cumplan con los requerimientos en cuanto a la generación de información necesaria para obtener resultados representativos. De esta manera se piensa tener todos los datos en conjunto para la realización del proyecto. Adicionalmente se seleccionarán otros tramos de estudio. Para lo cual, se pensará en las rutas de la Red Vial Nacional. La decisión de selección se basará en el TPD; tipo de estructura y zona climática. Al final de este paso se espera obtener la mayor cantidad de tramos de la Red Vial Nacional, con el fin de que se tengan la mayoría de condiciones posibles que pueda haber en las carreteras nacionales.

La información a recopilar en esta etapa para los 32 tramos y otros tramos de estudios adicionales son las deformaciones obtenidas por el deflectómetro de impacto, el índice IRI obtenido mediante el perfilómetro láser, el espesor y los materiales de las diferentes capas que compongan la carretera. También se recopilarán otros datos como la ubicación climática.

Se hará retro-cálculo de módulos para los diferentes puntos que se tengan en análisis. Con el retro-cálculo se logra obtener los diferentes módulos de elasticidad que componen los diferentes materiales en las capas del pavimento. Estos se obtendrán por medio del uso del programa ELSYM5. Para estos nuevos tramos se solicitara ensayos de deflectometría, IRI, y cono de penetración dinámica.

Los módulos de elasticidad son de gran importancia ya que dan el criterio para saber que tan rígida o que tan deformable es la capa que se está estudiando. Además a partir de los módulos de elasticidad se obtiene el número estructural del pavimento SN (por sus siglas en inglés “Structural Number”).

El número estructural “SN” es de gran importancia en este proyecto de graduación ya que con este se espera comparar los diferentes índices de condición de las carreteras con el fin de comparar resultados y definir si existe alguna correlación.

La metodología AASHTO 93 (American Association of State Highway and Transportation Officials) presenta tres métodos diferentes para obtener el número estructural, únicamente una se va a utilizar en el análisis, aunque se podrían utilizar otros métodos ya que todos dan el SN en función del espesor del pavimento y del módulo de elasticidad que tienen los materiales que lo componen. La metodología de diseño AASHTO 93 especifica 6 diferentes rangos para calificar el pavimento, siendo un SN de 6 como excelente pavimento y un SN de 1 como el peor de los casos.

1.3.3. Tercera Etapa

Una vez que se obtenga toda la información se pasará a la etapa de procesar los datos. Esta fase tiene la mayor importancia en el proyecto de graduación, ya que en esta se llega a evaluar la aplicabilidad de los índices de condición.

Los índices de condición de las carreteras se van a trabajar en dos grupos. Se tienen los índices de condición estructural y de condición funcional. Los índices estructurales van a ser analizados por medio de las mediciones en campo de deflexiones, ya que están relacionados entre sí. Además otras mediciones como la humedad a la hora de tomar las mediciones y el clima que afecta al punto, entre otros factores que ya se expusieron anteriormente.

Índices de Condición Estructural:

Los índices de condición estructural a analizar serán comparados con el número estructural SN, parte de esta etapa es no solo obtener los índices sino también poder compararlos entre ellos.

Es posible que puedan analizarse otros índices que aporten al proyecto y sean de importancia. Como ya se dijo anteriormente su estudio a fondo será realizado en la primera etapa del proyecto con el fin de lograr su aplicabilidad en este proceso.

Índices de Condición Funcional:

Los índices de condición funcional se encuentran relacionados por medio del Índice de Regularidad Internacional, IRI, antes mencionado. Para este caso se tiene el índice de rugosidad de pavimentos PRI (Por sus siglas en inglés "Pavement Roughness Index".

Índices combinados

El PCI (por sus siglas en inglés "Pavement Condition Index") es un índice de condición del pavimento y es el elemento más importante en el momento de planificar y evaluar proyectos. Este índice está en función del SAI y PRI antes mencionados; un índice de deterioro visual en el pavimento generado a partir de auscultaciones visuales podría incluirse dentro de la formulación pero, en el presente proyecto de graduación no se manejó esta posibilidad. Este índice lleva las siglas de SDI (por sus siglas en inglés "Surface Distress Index"). Finalmente, la ecuación que relaciona el PCI está dada por:

$$PCI = k_1 SAI + k_2 PRI \qquad \textbf{Ecuación 1}$$

Donde k_i son constantes que definen el peso relativo o porcentual de cada índice sobre el valor del PCI.

1.3.4. Cuarta etapa

En esta parte del proceso del proyecto de graduación se hará la clasificación de los tramos de carretera según:

1. Vías con alto TPD (Tránsito Promedio Diario) que tengan en la estructura de pavimento Base Estabilizada.
2. Vías con alto TPD que tengan en la estructura de pavimento Base Granular.

3. Vías con TPD moderado a bajo que tengan en la estructura de pavimento Base Estabilizada.
4. Vías con TPD moderado a bajo que tengan en la estructura de pavimento Base Granular.
5. Vías con TPD moderado a bajo que tengan en la estructura de pavimento Base Granular y tratamiento superficial.
6. Vías con TPD moderado a bajo que tengan en la estructura de pavimento Base Estabilizada y tratamiento superficial.

Al tener la clasificación de las carreteras se pasará a realizar un Modelo de Deterioro para las diferentes vías que se tengan. Con este se puede predecir las condiciones futuras de una carretera, comparar su estado con las otras carreteras para un mismo periodo entre muchas otras aplicaciones. Por otro lado, con la información existente, es posible obtener la vida remanente de las vías y con esto se pueden llegar a realizar mejores análisis, por lo que se tomarán en cuenta estos y otros aspectos.

En este proceso se va a usar proyectos de graduación u otras fuentes de información que colaboren con el estudio de las regiones en que se tengan las carreteras. Es esta etapa en la que se pretende encontrar patrones similares para todas las carreteras, buscando que se puedan clasificar todas, aunque se tiene la limitante de que pueda no llegarse a encontrar homogeneidades para todas las carreteras.

1.3.5. Quinta etapa

Esta consiste en la elaboración del informe final. Se realizará el análisis e interpretación de los resultados obtenidos, para esto se compararan los diferentes índices de condición de las carreteras esperando obtener informaciones similares y congruentes.

En este informe final se piensa llegar a conclusiones sobre el uso de los índices de condición de las carreteras en nuestro país, ya sean estructurales o funcionales. También sobre la clasificación de las carreteras en cuanto a sus similitudes con el fin de tener diferentes rangos de clasificación y sobre la implementación de Modelos de Deterioro de los pavimentos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Evaluar la aplicabilidad de los índices de condición de los pavimentos flexibles, generados y utilizados en países desarrollados, a las condiciones presentes en Costa Rica, así como valorar la procedencia de ejecutar una investigación a mayor escala que contemple una caracterización de materiales exhaustiva para las diferentes estructuras, tránsito y clima existentes en nuestro país. Se pretende recomendar una formulación matemática para el cálculo del Índice de Condición de los Pavimentos (PCI por sus siglas en inglés *"Pavement Condition Index"*), formado por una componente estructural y una funcional; lo que se busca es definir las constantes en la expresión matemática que definen porcentaje o peso relativo del valor del PCI que es producto de cada componente.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Seleccionar y clasificar las rutas homogéneas según su Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA), tipo de estructura, tipo de subrasante, zona climática, y otros elementos de importancia en la clasificación.
2. Procesar toda la información de la base de datos elaborada por el LanammeUCR y la consultora francesa BCEOM. Inicialmente se cuenta

con una base de datos con 32 puntos experimentales la cual puede ampliarse en caso de requerirse.

3. Obtener índices de acuerdo a la condición estructural y funcional que presenten los diferentes pavimentos. Tales como:
    i. Estructurales: SAI, AREA, AREA 3, AI1, AI4, SCI, BDI, BCI.
    ii. Funcionales: PRI.
4. Estimar del módulo elástico de las diferentes capas, estado de esfuerzos y deformaciones ante la carga y número estructural, para las estructuras en estudio.
5. Realizar análisis estadísticos para correlacionar los parámetros estructurales con los índices de condición estructural, y medir su grado de correlación.
6. Ejecutar un análisis de sensibilidad para definir los pesos relativos de los índices que conforman el Índice de Condición de Pavimentos.

1.5. Alcances y Limitaciones

El proyecto de graduación propuesto se ve limitado a que solo se cuenta con un muestreo de 32 puntos. Además se tiene como limitante principalmente que al desconocer los espesores del pavimento se vuelve más difícil seleccionar las rutas adicionales al estudio. Tampoco se cuenta con una base de datos histórica de deflexiones, IRI, y de las intervenciones que el CONAVI ha realizado.

Una limitante con la que se cuenta es con las mediciones de Tránsito Promedio Diario (TPD). Se trabajara con los TPD medidos por del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y el problema surge debido a que desde 1995 las mediciones de TPD no son mediciones periódicas por lo que en muchas de las rutas lo que se tiene son estimaciones o proyecciones de las mediciones realizadas históricamente.

Los índices de condición de las carreteras que se desarrollaron y se implementaron se estudiaron únicamente para pavimentos flexibles. Se trabajaron los índices de condición de la capa asfáltica, la base granular, la sub base granular y la subrasante. El proyecto de graduación está limitado al estado de los pavimentos y no entra en discusión sobre temas como la seguridad de la vía, pintura que esta lleva, el paisaje, ni demás elementos que conforman las carreteras.

La teoría a utilizar para la realización del proyecto no se encuentra limitada, esto debido a que se pueden encontrar fuentes que generen mayor información de importancia. Pero se trabajara en su mayoría con el proyecto NCHRP 10 – 48, métodos de análisis utilizados por la AASHTO en la guía para el diseño de pavimentos del 93, así como las diferentes fuentes bibliográficas.

Una de las limitaciones importantes es el empleo de técnicas de retrocálculo de módulos basadas en análisis elástico- lineal del comportamiento de los pavimentos. Se pueden presentar discrepancias considerables entre los valores obtenidos a partir de datos de FWD y los que realmente presenta la estructura, o los que se podrían obtener de mediciones directas sobre muestras en el laboratorio, para tal caso sería recomendable el uso de análisis de elemento finito. A pesar de esto el uso de análisis elástico-lineales como el empleado por el Software ELSYM5 (empleado en este estudio), está muy expandido y los resultados obtenidos son aceptados para la mayoría de las aplicaciones de los módulos (evaluación de condición, revisión de fatiga, etc.).

Otra limitante, siempre dentro del tema de retrocálculo de módulos, es que no se contaba con los datos de temperatura requeridos para realizar la adecuada corrección por temperatura de las deflexiones bajo el plato de carga (D_0). La metodología AASHTO pide que se use el valor de la temperatura medida a la mitad de la capa de asfalto u ofrece también la posibilidad de aproximar esta temperatura mediante un procedimiento que requiere de las temperaturas

promedio del ambiente de los 5 días anteriores y los 5 posteriores a la realización del ensayo, pero dentro de la bases de datos con la que se trabajó no se tenía ni el dato de temperatura medida a la mitad de la capa de asfalto ni el dato del día de realización de la prueba. De manera práctica se procedió a realizar la corrección empleando la temperatura de la capa de asfalto medida sobre la superficie de ruedo.

Por último, una limitante importante se tiene en que al ser 32 tramos, más lo que se puedan obtener al inicio de la recopilación de datos, no se sabe ciertamente si se logre obtener toda la representatividad esperada. Costa Rica es un país que presenta condiciones de clima muy diferentes para cada zona o región en las que se localizan las carreteras, esto genera una importante limitación ya que se reduce la posibilidad de lograr muestras representativas para la diversidad de grupos con patrones similares de clima que se puedan generar. Esto podría obligar en cierto momento a dejar de lado el criterio de clasificación por tipo de clima.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Conceptos Generales y Definiciones

A continuación se presenta una serie de definiciones y conceptos teóricos que representan el fundamento del trabajo realizado en la presente investigación, cada una de las consideraciones y supuestos realizados están basados en la teoría que se presentará en seguida.

Como se mencionó con anterioridad, la finalidad de los resultados que se esperan obtener es facilitar una herramienta práctica a los sistemas de administración de carreteras del país para la programación óptima del tiempo de intervención y presupuesto. Resulta conveniente entonces dar una definición clara de lo que es

un sistema de administración de carreteras (de ahora en adelante SAC). Puede considerarse la siguiente definición:

> *"La administración de activos es un proceso sistemático de mantenimiento, aumento y análisis del costo de oportunidad sobre las intervenciones a realizar en los activos físicos. Esta combina principios de ingeniería con estrategias de negocios y teorías económicas, y provee herramientas para facilitar una aproximación lógica y mejor organizada para la toma de decisiones. Así, la administración de activos provee un marco para el manejo de la planificación tanto en el corto como en el largo plazo"* (U.S. Department of Transportation, 1999)

En la anterior definición es clara la amplitud del concepto de sistema de administración de carreteras o de activos (en inglés se habla de administración de activos o *"Asset Management"*), todos los elementos físicos que componen la complejidad del sistema de transporte se pueden considerar como un subsistema de administración, la siguiente figura aclara este concepto.

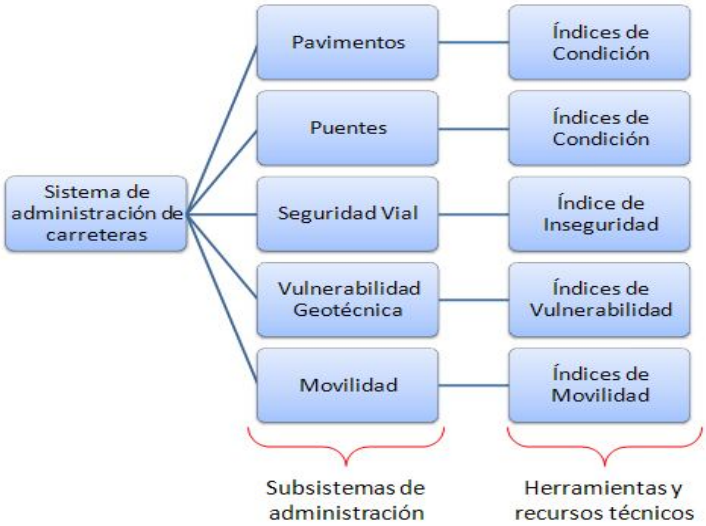


Figura 1[8]**.** Diagrama de un sistema de administración de carreteras.

[8] Elaborado por autor.

Como puede verse, el tema que atiende la presente investigación corresponde a una pequeña parte de ese gran concepto de sistemas de administración. Debe tenerse claro que las Herramientas y Recursos Técnicos engloban todo el proceso de recopilación, manipulación e interpretación de datos, y lo que se indica en la figura son tan solo ejemplos de valores que podrían ser empleados para la toma de decisiones.

Otra definición, un poco más antigua (de inicio de los 90's), entiende un sistema de administración de pavimentos como,

> *"…el conjunto de operaciones que tienen como objetivo conservar por un periodo de tiempo las condiciones de seguridad, comodidad y capacidad estructural adecuadas para la circulación, soportando las condiciones climáticas y de entorno de la zona en que se ubica la vía en cuestión. Todo lo anterior minimizando los costos monetario, social y ecológico."* (De Solminiac, 1998:p.13).

Este conjunto de operaciones se puede resumir de forma clara en el siguiente diagrama.

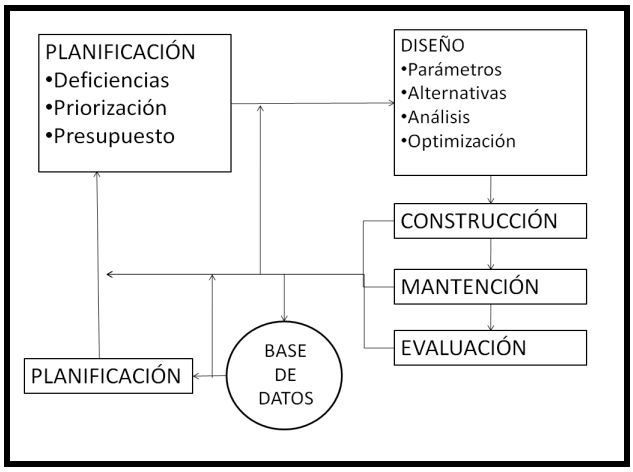


Figura 2[9]. Actividades principales de un sistema de gestión de pavimentos.

[9] Tomado de De Solminiac, 1998. Modificado por autor.

Siguiendo con la idea es importante definir las dos principales instituciones que tienen a su cargo la administración del sistema de transportes de Costa Rica, el gobierno por intermedio tanto del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) como del CONAVI y los gobiernos locales o municipalidades; esto son los encargados de implementar un sistema de administración tal y como se ha definido.

Para lograr cumplir esta tarea de manera efectiva, se requiere contar con una extensa base de datos que incluya la información de rutas, TPDA, características de las carreteras como: número de carriles, tipo de estructura de pavimentos, tipo de clima, tipo de subrasante, así como mediciones de indicadores funcionales (por ejemplo el IRI) y estructurales (FWD por ejemplo) y levantamientos de deterioros superficiales, todo esto referenciado y ubicado espacial y temporalmente.

Para agilizar el manejo de toda esta información es necesario hacer uso de los llamados Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten mostrar los datos en un computador de manera muy práctica, agilizando la localización y el manejo de datos de la red. El Software ArcView (ESRI ArGis) es uno de los programas que se emplea para el uso y la georeferenciación de información; en la Figura 3 y Figura 4 se puede observar las facilidades que ofrece este programa al presentar de forma visual la información.

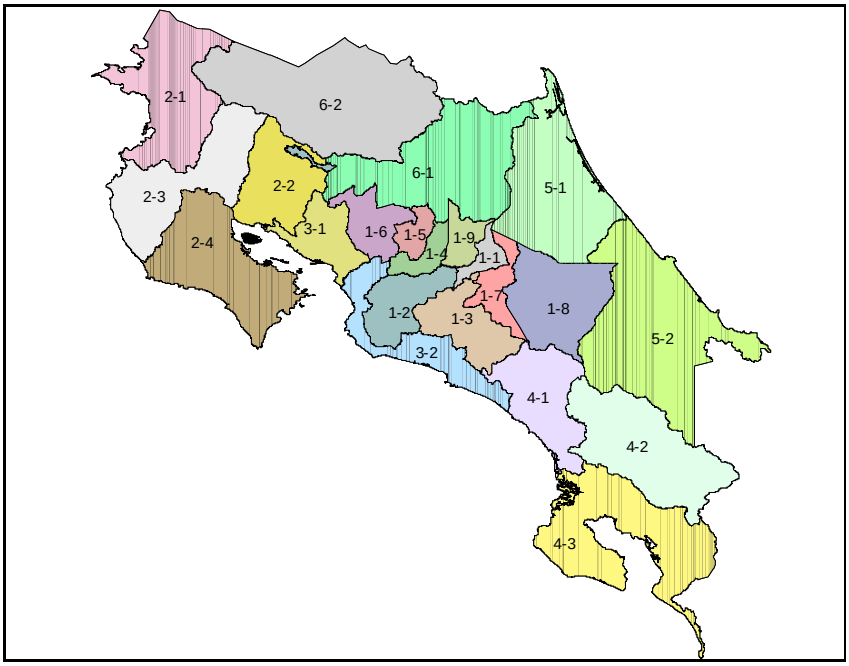


Figura 3[10]**.** Impresión de ArcView, Zonificación de la red vial según contratos de conservación vial, CONAVI.

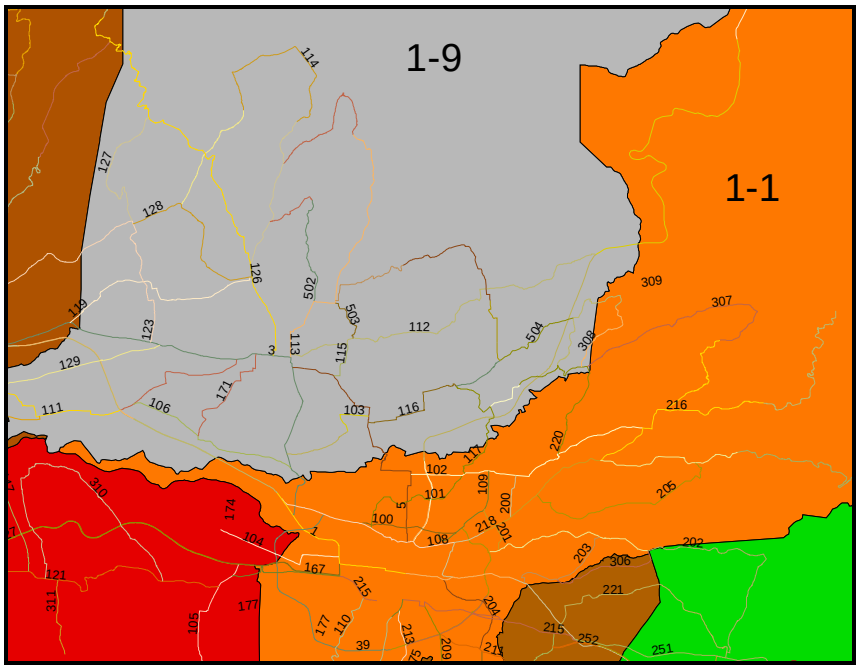


Figura 4[11]**.** Impresión de ArcView, tramificación de la red vial, tramos homogéneos del LanammeUCR.

[10] Elaborado por el autor.
[11] Elaborador por el autor.

Por otro lado los sistemas de administración funcionan en dos niveles. El nivel de red que incluye las observaciones y estudios de toda la red de caminos, a este nivel se busca planear a largo plazo (20 años o más) y el nivel de proyecto, que se centra más en proyectos específicos, la planeación para este nivel se hace para el corto plazo (5 años).

Hasta el momento se ha hablado de las ventajas de los sistemas de administración como herramienta primordial para optimizar las labores de mantenimiento de las estructuras de pavimento, pero no se ha dado una definición formal de lo que es un pavimento. Debe entenderse este como la estructura encargada de transmitir las cargas aplicadas por el tránsito, desde la capa superficial o capa de ruedo hasta la capa inferior, suelo o subrasante. Generalmente está conformada por varias capas de diferentes materiales, ver Figura 5, la Capa 1 puede ser una capa de mezcla asfáltica, una losa de concreto rígida o una capa delgada de mezcla asfáltica con características diferentes a la anterior, llamada tratamiento superficial, el cual no cumple ninguna función estructural dentro del paquete, sino que es más bien una superficie impermeabilizante; la segunda capa, Capa 2, puede ser de material granular o bien una base estabilizada ya sea con asfalto o con cemento, la tercera capa, Capa 3, es llamada subbase y generalmente consiste de material granular, la última capa, la Capa 4, es el suelo de subrasante y es el que finalmente deberá soportar la carga. En una estructura típica de un pavimento pueden presentarse todas las capas anteriores o bien algunas de ellas dependiendo de los materiales y las condiciones de tránsito y clima existentes.

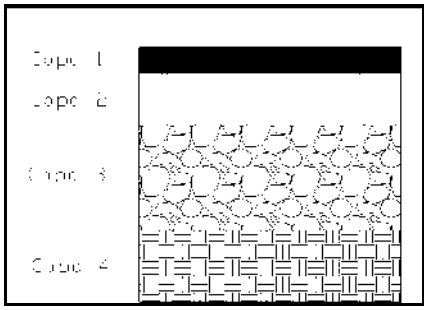


Figura 5[12]**.** Estructura de pavimento típica

Como todo elemento estructural, el pavimento requiere de una metodología de diseño formal. El objetivo de tal diseño es definir los espesores de las diferentes capas suficientes para soportar las cargas de tránsito futuras dentro del periodo de diseño, con las propiedades físicas y mecánicas de los materiales a utilizar en cada capa, las características de drenaje de estos materiales, las condiciones climáticas a las que se verá sometida la estructura y las propiedades físicas y mecánicas del suelo de subrasante. Existen diversas metodologías para el diseño de pavimentos, pero la más utilizada es la guía de diseño de la AASHTO 93 y uno de los parámetros de diseño más importantes que emplea este método es el Número Estructural (SN por sus siglas en inglés *"Structural Number"*). El SN es un valor que busca representar el estado de la estructura basándose en los valores de módulo elástico, espesor y condiciones de drenaje de cada una de las capas que conforman el pavimento, la fórmula a emplear para determinar el número estructural se muestra más adelante, en la ecuación 3, y básicamente define el número estructural como función de tres parámetros: espesores, coeficientes estructurales y coeficientes de drenaje.

Los valores de coeficiente estructural (a_i) se definen como "*… una medida de la habilidad relativa de un espesor unitario de un material dado para funcionar como un componente estructural del pavimento." (Huang, 1993: p.576),* y para su determinación se emplea ya sean los gráficos o las ecuaciones que ofrece la guía de diseño AASHTO 93, ver Figura 6 y Figura 7. Como se puede ver estos

[12] Elaborado por autor.

coeficientes son función de los valores de módulo elástico de cada capa y se pueden correlacionar con resultados de otras pruebas como CBR.

Por otro lado los coeficientes de drenaje (m_i) son función de las condiciones climáticas de la zona donde se ubica el pavimento y de la capacidad drenante de los materiales empleados en la construcción de la capa (de aquí la importancia de la zonificación climática y de la clasificación de vías realizada). Para la elección de los valores de coeficiente de drenaje más apropiados se emplean las tablas de la guía de diseño, ver Tabla 1.

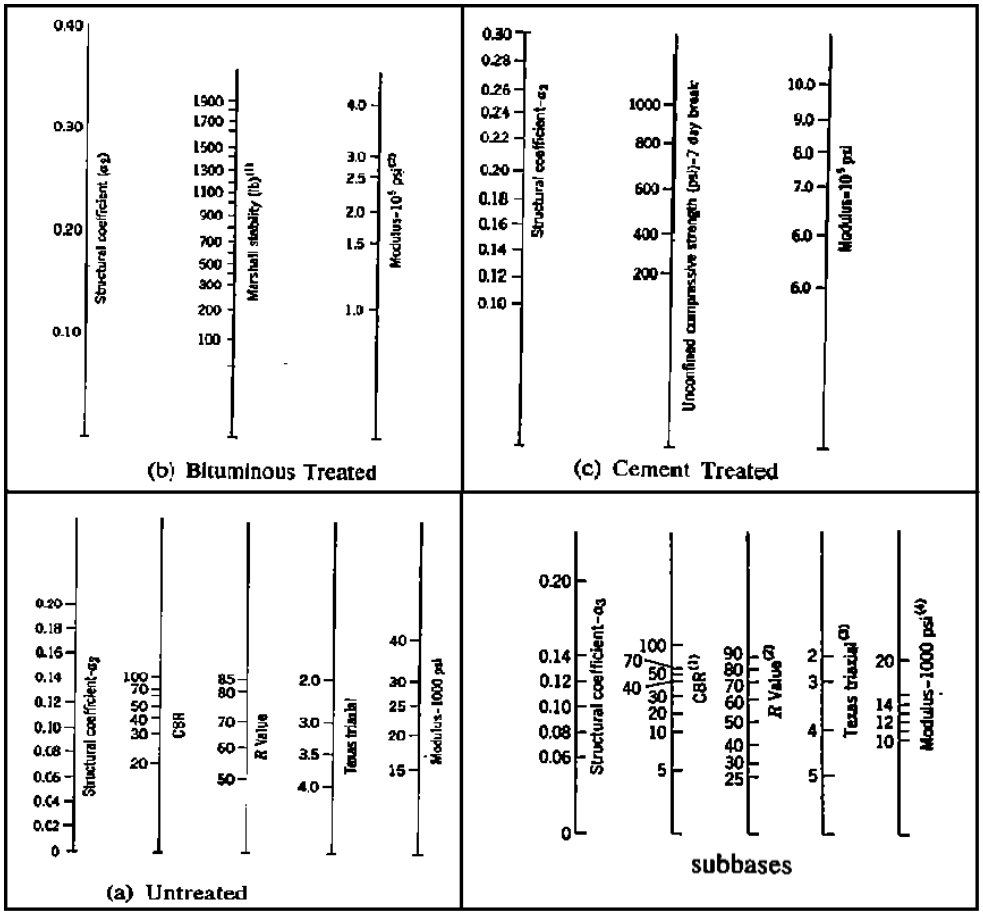


Figura 6[13]**.** Gráficos para la determinación de los coeficientes estructurales de bases. (Huang, 1993)

[13] Ver referencia 7.

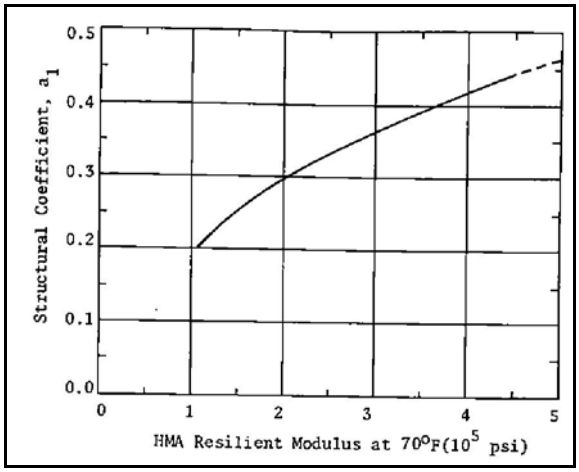


Figura 7[14]**.** Gráficos para la determinación de los coeficientes estructurales de carpetas asfálticas. (Huang, 1993)

Tabla 1[15]**.** Metodología de AASHTO 93 para la determinación del coeficiente de drenaje.

Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo al cual está expuesta la Estructura de Pavimento a niveles de Humedad próxima a la Saturación			
	Menor del 1%	1-5%	5-25%	Mayor del 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy Pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

El rango de valores dentro de los que se puede encontrar el Número Estructural, según se estable en AASTHO 93, se da en una escala de 1 a 6, siendo uno el valor correspondiente a una estructura muy deteriorada y seis el SN de un pavimento en excelentes condiciones.

Como parte del proceso de diseño se deben tomar consideraciones respecto al desempeño que se espera de la estructura y los factores que influyen en el comportamiento de los pavimentos y por consiguiente en su grado de deterioro, tales como: la temperatura (tanto la temperatura ambiente como la temperatura de

[14] Ver referencia 7.
[15] Modificado de Guía de diseño AASHTO 93.

la carpeta asfáltica), la humedad, el grado de compactación de las capas granulares, el tipo de ligante asfáltico empleado, las granulometrías empleadas en las distintas capas, las propiedades de los materiales empleados, los módulos de las distintas capas, la capacidad de soporte del suelo de subrasante, las condiciones de drenaje de las capas granulares y de la obra vial en general, el tipo y número de cargas de tránsito, así como aspectos propios del proceso constructivo. En este último punto, debe tenerse presente que estos aspectos por lo general no son controlados y por tanto es común al realizar análisis de desempeño de pavimentos o cualquier estudio que involucre estructuras ya existentes trabajar bajo la suposición de que la construcción se realizó respetando todas las especificaciones establecidas y bajo criterios adecuados.

De estos factores los únicos que se consideran de manera directa en esta investigación son la temperatura (considerada en el empleo de las deflexiones para el retrocálculo de módulos) y la humedad importante en la determinación del número estructural.

Finalmente uno de los objetivos importantes en las labores de los SAC consiste en la clasificación de la red vial de la cual se encargan. La razón de esta clasificación es poder trabajar con tramos de carretera que posean características similares, para que la aplicación de las medidas de mantenimiento correctivo tenga el impacto esperado. Con este fin se emplea los llamados “Tramos Homogéneos” que se definen como secciones longitudinales de pavimento con características homogéneas: espesores, materiales, subrasante, rigidez del paquete estructural, humedad y clima[16].

El trabajo de determinar estos tramos comienza con la decisión de qué criterio emplear para realizar la clasificación y luego de que manera manejar este criterio para realizar la clasificación. Se pueden encontrar entonces metodologías de auscultación visual, otras que emplean los valores de IRI o las que se basan en la

[16] Tomado de referencia 5.

homogeneidad del paquete estructural. De estos el sistema más utilizado consiste en el uso de las deflexiones como criterio de clasificación.

En Costa Rica, específicamente en el LanammeUCR, se emplea el conocido Método Español, este emplea técnicas estadísticas para definir los tramos, en el fondo lo que se pide a un tramo de carretera para considerarse homogéneo es cumplir con unas relaciones entre promedio de datos (m) y desviación estándar de la muestra (s); así un valor de s/m menor a 0,2 corresponde a tramos muy uniformes, entre 0,2 y 0,3 se considera una homogeneidad "normal", si está entre 0,3 y 0,4 se habla de poca homogeneidad y ya valores superiores a 0,4 no se consideran tramos homogéneos[17]. En el LanammeUCR se emplea el software SPEC para la determinación de los tramos homogéneos.

Otras consideraciones que se deben tener al realizar la tramificación son: 1) La longitud mínima de un tramo debe ser de 100m y la máxima ronda el valor de 1000m, y 2) Los datos de deflexión central empleados deben estar debidamente corregidos por temperatura y por carga (de esto se hablará más adelante).

2.1.1. Respuesta estructural del pavimento

El comportamiento de una estructura de pavimento dada se ve caracterizado por los parámetros de resistencia de las diferentes capas que la conforman así como por las solicitaciones a las que se vea sometido: factores ambientales y cargas de tránsito. De los parámetros de resistencia de las capas, el de principal interés es el módulo elástico o módulo de Young.

Los módulos de rigidez (módulo elástico) de las distintas capas definen la relación entre esfuerzos (asociados a las cargas) y las deformaciones (asociados a la respuesta o desempeño) de las distintas capas, ver figura 8.

[17] Tomado de referencia 9. Y corresponde a recomendaciones de la Dirección General de Carreteras de España.

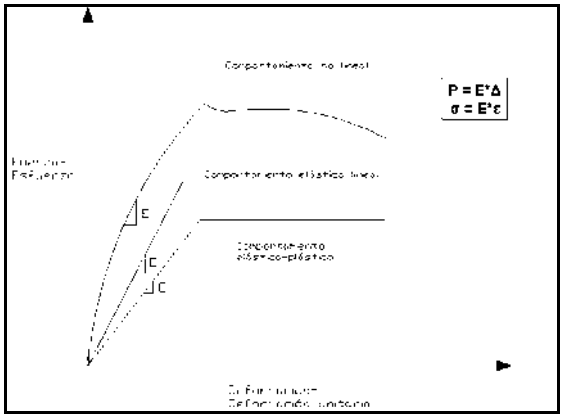


Figura 8[18]**.** Módulo de elasticidad.

Para efectos prácticos se pueden considerar los siguientes rangos típicos de módulos para capas de pavimentos,

Tabla 2[19]**.** Rangos de módulos de elasticidad para distintas capas.

Material	Módulo de Poisson	Módulo Elástico en MPa (en psi)		
		Bajo	Alto	Típico
Carpeta Asfáltica	0.35-0.40	482.8 (70000)	13793.1 (2000000)	2758.6 (400000)
BE asfalto	0.40	344.8 (50000)	3448.3 (500000)	1379.3 (200000)
BE cemento	0.15-0.20	1379.3 (200000)	13793.1 (2000000)	3448.3 (500000)
Base Granular	0.35	68.9 (10000)	1034.5 (150000)	344.8 (50000)
Subbase Granular	0.35	34.5 (5000)	206.9 (30000)	103.4 (15000)
Suelo Estabilizado	0.40	68.9 (10000)	1379.3 (200000)	344.8 (50000)
Suelo Cohesivo	0.45	13.8 (2000)	172.4 (25000)	48.3 (7000)

Estos módulos sirven para determinar la distribución de las cargas en el modelo simplificado de la teoría de Bussinesq que explica el comportamiento de los

[18] Elaborado por autor.
[19] Fuente: Notas del curso de Pavimentos de la UCR, modificado por autor.

pavimentos; esta teoría surge de un estudio cuyos resultados se pueden resumir en una serie de ecuaciones para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en un espacio semi-infinito, homogéneo, isotrópico y elástico lineal, bajo una carga puntual; estudios posteriores amplían los trabajos de Bussinesq a sistemas de cargas distribuidas y sistemas multicapas, (Ullidtz, 1987).

Para la determinación directa de los módulos de las diferentes capas se emplean estrategias diferentes según los materiales usados; para la superficie de ruedo se utilizan ensayos dinámicos de cargas repetidas, para los materiales granulares el método más efectivo es el uso de ensayos triaxiales y para las bases estabilizadas se usan pruebas de carga. Cuando se trata de una estructura existente se emplea la técnica del "Retro-cálculo de Módulos", que utiliza las deflexiones generadas en la estructura como respuesta ante la aplicación de una carga y los conceptos de la teoría de multicapa elástica adicionados dentro de un paquete computacional (el ELSYM5 en el caso de la presente investigación).

En el párrafo anterior se habla de un nuevo concepto, el de deflexión. De Solminiac (1998) indica que *"La deflexión es la medida de deformación elástica que experimenta un pavimento al paso de una carga,…".* La medición de cada una de las deflexiones que se produce a diferentes puntos de distancia del sitio de aplicación de la carga genera lo que se conoce como cuenco de deflexiones. Todo este conjunto de deflexiones permite además del retrocálculo definir los llamados índices de condición.

Debido a la importancia de conocer las deformaciones de los pavimentos (en este caso las deflexiones) se debe contar con un sistema de obtención de datos confiable. De Solminiac (1998) aclara que los procedimientos de medición de deflexiones se ven afectados por una considerable cantidad de factores, como son el tipo de carga aplicada (principalmente si es estática o dinámica), el tipo de sensores de medición y el lugar donde se realizan las mediciones. Considerando

estos factores se puede hablar de tres equipos típicos para la medición de deflexiones: la Viga Benkelman (carga estática, un solo punto de medición y uso de deformímetro), Dynatest (carga dinámica vibratoria, varios puntos de medición y uso de geófonos) y el Deflectómetro de Impacto, FWD por sus siglas en inglés, (carga dinámica de impacto, hasta 9 posiciones de medición y medición mediante geófonos), la experiencia demuestra que este último es el sistema que aproxima de la mejor manera el comportamiento real del pavimento, especialmente en lo que a velocidad de aplicación de la carga se refiere.

La Figura 9 muestra un esquema de la metodología utilizada a la hora de realizar pruebas de deformación hechas con el deflectómetro de impacto. En este se puede observar el bulbo de deformación generado por la deformación D_0 y el impacto en el resto de los puntos.

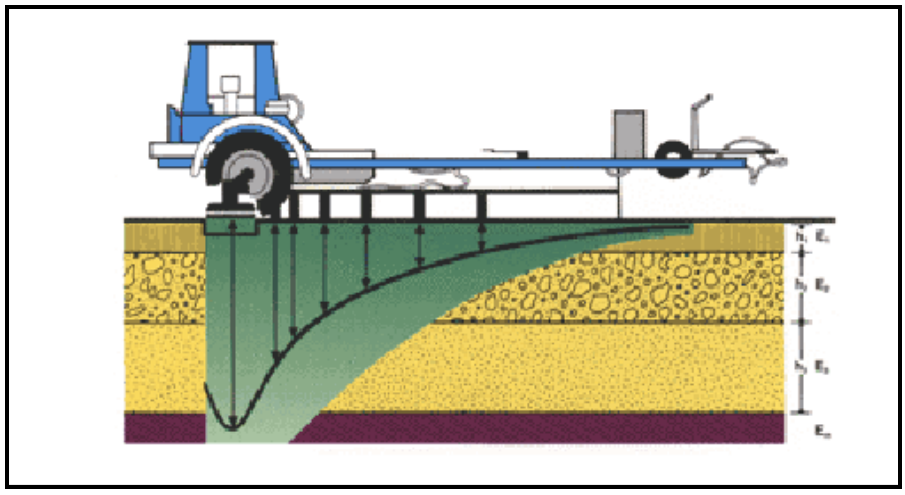


Figura 9.[20] Respuesta de estructura a carga suministrada

Pero en el análisis de esta información se debe cuidar además dos factores, uno es la carga que realmente se aplica y la otra la temperatura de la capa de pavimento. Ambos factores influyen sobre el valor de la deformación medida justo

[20] Fuente: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la UCR. **Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada**, Figura B1, Costa Rica, 2004.

bajo el plato de carga, que es la medida que refleja el comportamiento de toda la estructura.

Para ambos casos existen metodologías de corrección. Para la corrección por carga se usa la siguiente fórmula,

$$Fc = \left(\frac{P_{aplicada}}{P_{normalizada}} \right)$$ **Ecuación 2**

Donde:

Fc: Factor de corrección de la deflexión central.

$P_{aplicada}$: Carga aplicada

$P_{normalizada}$: Carga normalizada, se emplea 40kN.

Para la corrección por temperatura existen muchos trabajos al respecto, sin embargo, el método más empleado es el presentado en la guía de diseño AASHTO 93, donde los factores de corrección se obtienen a partir de unos gráficos (Anexo F). Los datos de entrada a estos gráficos son el tipo de base, el espesor de la capa de ruedo y la temperatura a la mitad de la capa de asfalto.

Finalmente, estos dos factores se multiplican por el valor dado de D_0 para obtener la deformación corregida que viene a ser el valor a usar en el proceso de retrocálculo de módulos. La aplicación de los factores de corrección puede provocar ya sea un aumento en el valor de deflexión, cuando la temperatura de la carpeta asfáltica es menor a la temperatura estándar o de referencia (68º Farenheit o 20º Centígrados) o cuando la carga aplicada es superior a la normalizada; o se puede percibir una disminución en la deflexión medida si se presentan condiciones antagónicas a las mencionadas antes.

La razón final de tomar todos estos cuidados en la determinación de los módulos elásticos, es que la función primordial de estos en la presente investigación es servir de insumo para determinar el Número Estructural, SN por sus siglas en

inglés, que como se mencionó antes es un indicador directo del estado de la estructura de pavimento. La fórmula para obtener el “SN” se da a continuación:

$$SN = a_1 h_1 + a_2 h_2 m_2 + a_3 h_3 m_3$$ **Ecuación 3**

En donde se tiene:

a_1: Coeficiente estructural para la capa de asfalto

h_1: Espesor de la capa asfáltica

a_2: Coeficiente estructural para la base

h_2: Espesor de la capa para la base

m_2: Coeficiente de drenaje para la base

a_3: Coeficiente estructural para la sub base

h_3: Espesor de la sub base

m_3: Coeficiente de drenaje para la sub base

Para finalizar el apartado, retomando los otros factores que afectan la respuesta estructural de los pavimentos mencionados antes, las solicitaciones, se debe decir:

- *Las cargas:* una de las peculiaridades que diferencian a los pavimentos de otros sistemas estructurales es el tipo de carga a la que se ve sometido el elemento a lo largo de su vida útil. Las cargas de tránsito son difíciles de determinar por la gran variedad de tipos de vehículos así como por el proceso de crecimiento vehicular que presenta la sociedad. Este tema resulta objeto de graves problemas de diseño y por tanto se han dirigido muchos estudios en busca de afinar una metodología aceptable para la determinación de las cargas de tránsito, dentro de los hallazgos que se puede encontrar en la literatura internacional, la metodología más utilizada es la de la guía de diseño de AASHTO 93. Para más información consultar la propia guía de diseño.

- *Las solicitaciones ambientales:* además de los efectos de la temperatura que afecta la capa asfáltica por el comportamiento visco-elástico del asfalto, debe prestarse interés a la humedad, que afecta tanto la resistencia de los materiales granulares, debido a incrementos en la presión de poros, como a los materiales o suelos cohesivos, en cuyo caso hay una interacción a nivel microscópico que se refleja en una disminución del valor de cohesión que es el parámetro que define la capacidad a cortante de los suelos y por tanto su capacidad de soportar cargas (la falla de los suelos es una falla a cortante, en cualquier libro de mecánica de suelos se puede profundizar más el tema de capacidad de soporte, superficies y modos de falla de suelos).

2.1.2. Respuesta funcional del pavimento

La importancia de considerar la respuesta funcional en esta investigación radica en el hecho de que la regularidad superficial induce vibraciones a los automóviles provocando así incomodidad e inseguridad en los usuarios, y desgaste en el vehículo; y todo esto tiene gran impacto en la economía de los usuarios (costos de operación) y del país en general.

El principal parámetro de medición de la respuesta funcional de los pavimentos es la rugosidad de la superficie de ruedo, y la metodología utilizada en Costa Rica para la evaluación de la rugosidad es la que resultó del experimento IRRE (por sus siglas en inglés *"International Road Roughness Experiment*"), la cual emplea el índice conocido como IRI (por sus siglas en inglés "*International Roughness Index"*). El cual se define como,

> *"… un indicador estadístico de la irregularidad superficial del pavimento, al igual que otros indicadores representa la diferencia entre el perfil longitudinal teórico (recta o parábola*

continua perfecta, IRI = 0) y el perfil longitudinal real existente en el instante de la medida." (De Solminiac, 1998:p.94).

Lo que hace el IRI es asignar un valor numérico que resume las diferencias entre el perfil longitudinal real y el teórico de la superficie sobre una huella (se llama huella a la zona por donde pasa la llanta de un vehículo). Para su cálculo se utiliza la simulación del cuarto de carro, que se puede resumir en el siguiente diagrama, ver Figura 10.

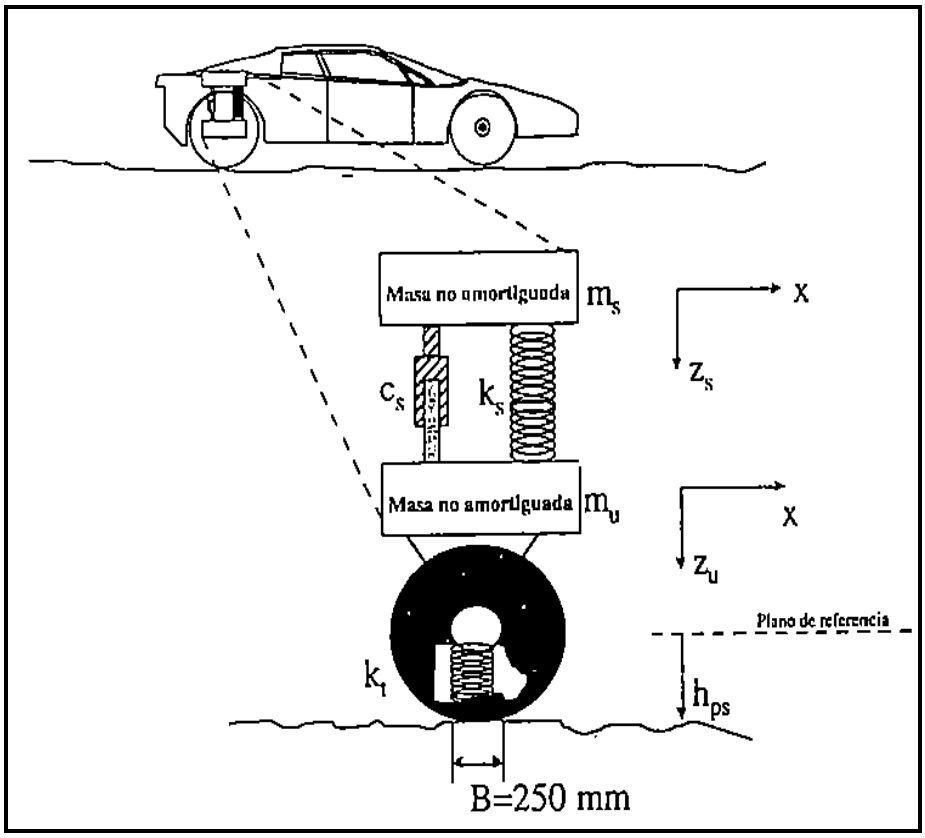


Figura 10[21]**.** Modelo de cuarto de carro.

Para más información acerca de la metodología para calcular el IRI se puede consultar el informe de la ASTM norma ASTM E1170.

[21] Tomado de De Solminiac, 1998. Para saber más acerca del IRI y el modelo de cuarto de carro puede consultarse la norma del ensayo, ASTM E1170

En Costa Rica el equipo utilizado para la determinación del IRI es el perfilómetro láser, ver Figura 11. Este equipo realiza mediciones empleando un sistema de referencia inercial que se consigue con los acelerómetros láser ubicados en la parte delantera del vehículo. El equipo mostrado en la figura puede considerarse una estación total ya que dentro de la camioneta se encuentra un computador que procesa al instante la información generado por los sensores láser, calculando y georeferenciando las mediciones de IRI.

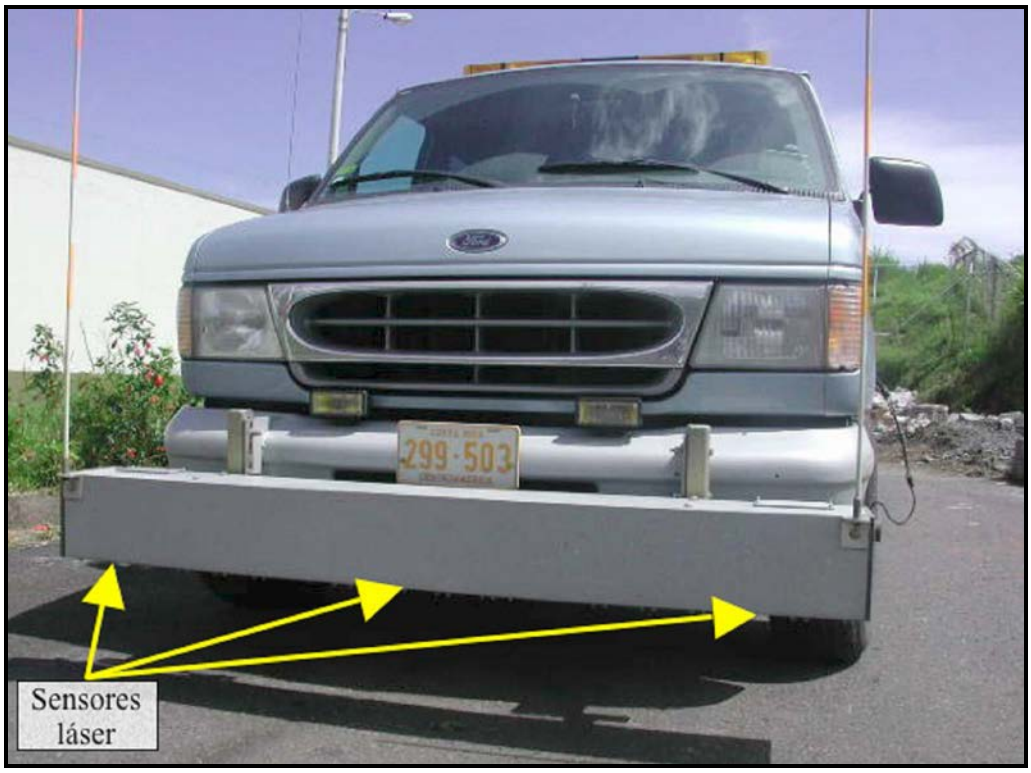


Figura 11[22]**.** Perfilómetro laser del LanammeUCR.
(LanammeUCR, 2006)

El IRI se considera para esta investigación uno de los mejores indicadores para la caracterización de la condición funcional, por las características que posee. Estas son[23]:

[22] Ver referencia 9.
[23] Fuente: De Solminiac, 1998.

-Estable en el tiempo.
-Transportable, es decir compatible con diversas metodologías, y con esto se refiere a metodologías de medición.
-Representativo, de las condiciones de interés para el usuario.
-Válido para todo tipo de superficies, pavimentos flexibles o rígidos.

Finalmente, se discute un poco acerca de los rangos de IRI que se emplean para calificar una vía como buena, regular o mala, tanto los considerados en otros países como algunos que se utilizan en Costa Rica. Primero considérense los criterios empleados en los procesos de auditoría de nuevos proyectos en otros países, los valores máximos de aceptación son,

Tabla 3[24]. Límites internacionales para aceptación de proyectos.

País	Criterio	Límite (m/km)
Chile	Promedio de 5 tramos	≤ 2
	Promedio individual	≤ 2,8
España	50% de tramos	< 1,5
	80% de tramos	< 2
	100% de tramos	< 2,5
Canadá	70% de los datos	< 1,2
	100% de los datos	< 1,4

(Ventura y Alvarenga, 2005)

En el caso de Costa Rica, en el CR-2002 se presenta una tabla que define las multas en función del valor de IRI medido en tramos de 200m, ver Tabla 4. Previo a utilizar esta tabla se debe cumplir con dos condiciones: IRI <2m/km en el promedio de 5 tramos consecutivos de 200m y menor a 3m/km en el 100% de las mediciones.

[24] Tomado de Ventura y Alvarenga, 2005:p. 20.

Tabla 4[25]**.** Tabla de pago en función del IRI.

IRI (m/km) ASTM E-1170	MULTAS CON RESPECTO AL VALOR DE LA CAPA DE SUPERFICIE EN EL ÁREA AFECTADA
2 > IRI	0%
2 < IRI ≤ 2,2	5%
2,2 < IRI ≤ 2,5	10%
2,5 < IRI ≤ 3,0	20%
3,0 < IRI	40% o se repara

Por otra parte, en el LanammeUCR se diseñaron unos rangos para el IRI como parte del proyecto de evaluación de la red vial pavimentada del país, estos se muestran en la siguiente tabla,

Tabla 5[26]**.** Rangos de IRI para la red vial nacional (LanammeUCR)

Rango de Regularidad m / km	Clasificación
menor a 1,0	Regularidad superficial muy buena
entre 1,0 y 1,9	Regularidad superficial buena
entre 1,9 y 3,6	Regularidad superficial regular
entre 3,6 y 6,4	Regularidad superficial deficiente
mayor a 6,4	Regularidad superficial muy deficiente

(LanammeUCR, 2006)

Y por último, se tienen los rangos dados por el Banco Mundial en función de las velocidades de circulación de las diferentes vías, ver Figura 12. Debe tomarse en consideración que esta clasificación es muy general y cada país debe establecer cuáles son los valores máximos y mínimos aceptables para los diferentes tipos de vías y velocidades esperadas.

[25] Fuente CR-2002
[26] Ver referencia 9.

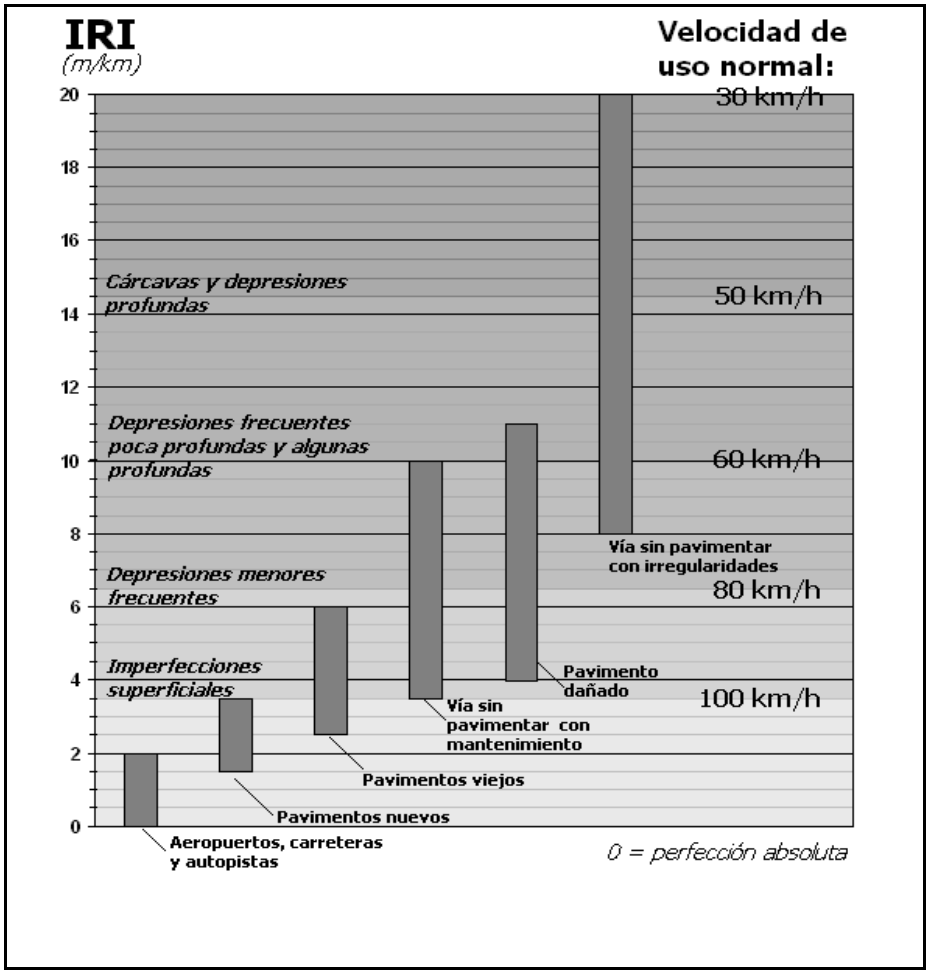


Figura 12[27]**.** Rango de IRI del Banco Mundial.
(Banco Mundial, 2008)

2.1.3. Índices de condición

La mayor parte de la información existente respecto al tema de índices de condición se generó a partir del proyecto de doctorado Guía para la Administración de Activos de Transporte proyecto NCHRP 10-48, preparado por la NCHRP (por sus siglas en inglés National Cooperative Highway Research Program) en 2002, en este trabajo el grupo de investigadores a cargo buscó evaluar la exactitud y la eficiencia de la aplicación de algunos índices en la

[27] Fuente: Banco Mundial, 2008

descripción de la condición de las diferentes estructuras de pavimento con las que cuentan en ese país, bajo las condiciones de clima, tránsito y control de calidad presentes en el país norteamericano.

A groso modo, el proyecto consistió en emplear la información de la base de datos sintética generada por los propios investigadores para desarrollar expresiones matemáticas de la relación existente entre los índices y los parámetros que definen la condición de la estructura de pavimento, los llamados modelos de deterioro. Posteriormente se comparaban las estimaciones de estos modelos con la información de la base de datos de campo. Esto servía para validar la capacidad de los índices para caracterizar la condición de las estructuras. Pero el proyecto no se limitó a esto, se realizó además un análisis de sensibilidad que permitió establecer que índice reflejaba mejor la condición de una capa específica.

El grupo de investigadores desarrolló además una serie de modelos para predecir el potencial de las estructuras de sufrir deterioros como ahuellamiento, fisuramiento por fatiga, entre otros. Establecieron los criterios para decidir acerca de la condición de las capas.

Dos aportes más se pueden resaltar de esta investigación:

1. La generación de nuevos índices de condición (AREA 2, AREA 3 y los índices de área), y,
2. La incorporación de todos los resultados obtenidos en un software que facilita la aplicación de estos hallazgos por parte de las autoridades encargadas de los sistemas de administración de pavimentos.

La cantidad índices de condición estudiados en el NCHRP 10-48 fue bastante amplia, sin embargo para efectos de la presente investigación no se requiere detallar todos. Solo unos pocos fueron evaluados, empezando por los índices AREA, los cuales están dados por las siguientes ecuaciones:

$$AREA = \frac{6(D_0 + 2D_{12} + 2D_{24} + D_{36})}{D_0}$$ **Ecuación 4**

$$AREA_2 = \frac{6(D_{12} + 2D_{18} + D_{24})}{D_0}$$ **Ecuación 5**

$$AREA_3 = \frac{6(D_{24} + 2D_{36} + D_{48})}{D_0}$$ **Ecuación 6**

En donde se tiene que para el AREA dada en la ecuación 4 y 5 se obtiene la condición completa del pavimento y para el $AREA_3$, ecuación 6, se obtiene la condición de las capas base y la sub base. Los índices D son las deformaciones obtenidas para cada punto siendo el subíndice el valor en pulgadas de la distancia de la ubicación del punto en cuestión respecto al punto de aplicación de la carga.

Quizá el principal de estos índices sea el llamado AREA (Ecuación 4), el cual sirve para saber si la estructura es fuerte o débil. Este índice permite describir la condición de la estructura de pavimento mejor de lo que lo hace el valor de la deflexión central ya que en su concepción se considera no solo la magnitud de las deflexiones sino también la forma del cuenco y por tanto refleja la manera en que la estructura disipa los esfuerzos que inducen las cargas de tránsito, Figura 13.

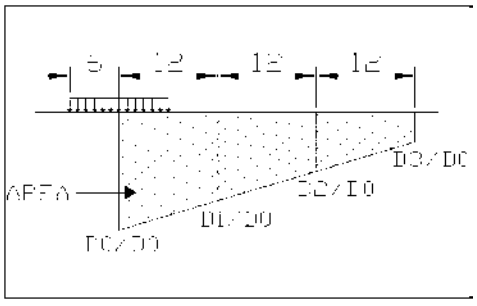


Figura 13[28]**.** Definición del índice AREA.
(Shahin, 2005)

[28] Modificado de referencia 21.

Para explicar esto se puede estudiar el caso de dos estructuras en distinto estado de deterioro, cuyo cuenco de deflexiones se muestra en la Figura 14. En esta figura se observan dos pavimentos, A y B; en ambos casos el valor de la deflexión central es el mismo, lo que conduciría a concluir erróneamente que ambas estructuras tienen la misma condición estructural; sin embargo, el valor del índice AREA para el pavimento A será mayor que para el pavimento B, de lo que concluye que el pavimento A posee una mejor condición estructural, lo cual es correcto y se puede corroborar con los valores de módulo de las diferentes capas.

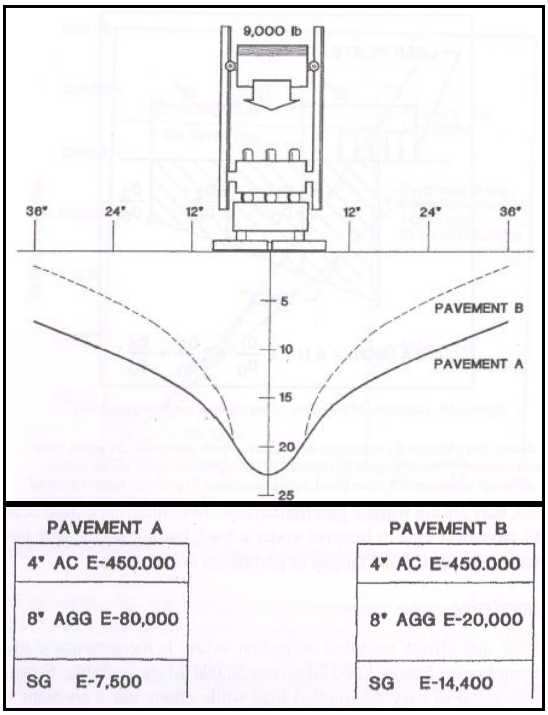


Figura 14[29]**.** Comparación del índice AREA para dos estructuras con diferente estado de deterioro. (Shahin, 2005)

Para manejar una idea de los valores típicos que puede asumir el índice AREA , se presenta a continuación el rango de valores desarrollado en Colombia,

[29]Ver referencia 21.

Tabla 6[30]. Rangos de AREA según estructuras de pavimento de Colombia

Estructura	AREA	
	Pulgadas	Mm
Pavimento con capas asfálticas gruesas (100 mm o más)	21-30	530-760
Pavimento con capas asfálticas delgadas (menos de 100 mm)	16-21	410-530
Pavimento con tratamiento superficial	15-17	380-430
Pavimento débil con tratamiento superficial	12-15	300-380

(Ministerio de Transportes República de Colombia, 2002)

Otros índices de área que se pueden encontrar en el proyecto NCHRP 10-48 y que tienen la misma metodología a los anteriores debido a que dependen de las deformaciones en diferentes puntos son:

$$AI_1 = \frac{D_0 + D_{12}}{2D_0} \qquad \textbf{Ecuación 7}$$

$$AI_2 = \frac{D_{12} + D_{24}}{2D_0} \qquad \textbf{Ecuación 8}$$

$$AI_3 = \frac{D_{24} + D_{36}}{2D_0} \qquad \textbf{Ecuación 9}$$

$$AI_4 = \frac{D_{36} + D_{48}}{D_0} \qquad \textbf{Ecuación 10}$$

Donde, los D son las deflexiones y el subíndice indica la distancia a la que se mide la deformación referida desde el punto donde se aplica la carga.

La primera ecuación de área AI_1, ecuación 7, para esta serie de ecuaciones, representa el índice de condición para la primera capa o capa asfáltica. Las ecuaciones de área AI_2 y AI_3 (8) y (9) representan las capas del medio o capas de base, mientras que la ecuación de área AI_4 (10) representa la condición de la capa subrasante. Es importante observar que entre más largo se encuentra el punto de ubicación de la deformación se ve afectada una capa más lejana a la superficie, esto se observa con los índices utilizados para las diferentes ecuaciones.

[30] Referencia 10.

El último índice de área es la predicción potencial de agrietamiento. Este es provocado por los esfuerzos que se generan en la fibra inferior de la capa asfáltica. La siguiente ecuación representa esta predicción:

$$AUPP = \frac{5D_0 - 2D_{12} - 2D_{24} - D_{36}}{2} \qquad \textbf{Ecuación 11}$$

Otros índices a implementar tienen que ver con la base, de ahí el subíndice. Estos están dados por las siguientes ecuaciones:

$$BCI = D_{60} - D_{48} \qquad \textbf{Ecuación 12}$$

$$BCI = D_{24} - D_{36} \qquad \textbf{Ecuación 13}$$

Ambas ecuaciones 12 y 13 miden el BCI, el cual significa índice de curvatura base (por sus siglas en inglés “Base Curvature Index”), el cual es el índice de daño que se tiene en la sub rasante. Un BCI alto indica que se tiene una pobre o en muy malas condiciones sub rasante. Al tener diferentes coeficientes en las dos ecuaciones se puede comparar los resultados.

Otro índice relacionado con la base es el BDI, el cual es el índice de daño en la base (por sus siglas en inglés “Base Damage Index”). Este indica la condición de la base y sub base. Si se tiene un alto BDI se tiene una pobre base y sub base. La ecuación para obtener el BDI es la siguiente:

$$BDI = D_{12} - D_{24} \qquad \textbf{Ecuación 14}$$

Un índice de gran utilidad es el que indica la condición de la capa asfáltica, este es el SCI (por sus siglas en inglés “Surface Curvature Index). Está dado por la siguiente ecuación:

$$SCI = D_0 - D_{12}$$ **Ecuación 15**

Se tienen índices de deflexión, este es el caso de índice radio de deflexión dado por la siguiente ecuación:

$$DR = \frac{D_r}{D_0}$$ **Ecuación 16**

Por último se tiene el índice estructural SAI (por sus siglas en inglés “Structural Adequacy Index”) el cual está dado por la siguiente ecuación y depende del área máxima y mínima obtenida así como la medida en campo:

$$SAIj = 100x\left(\frac{AREAj - AREA\min}{AREA\max - AREA\min}\right)$$ **Ecuación 17**

Además se conideró una versión adicional del índice de adecuación estructural (SAI por sus siglas en inglés) propuesta por el Dr. Donath Mrawira en su trabajo titulado *“Aplicando un SIG en Transportes para Desarrollar un Modelo de Desempeño de Infraestructura Vial y un Sistema de Planificación a Largo Plazo para una Red de Carreteras”* (Mrawira *et al*, 2007). La fórmula para el cálculo del índice de Mrawira es la siguiente,

$$SAIj = 70\,x\left(\frac{AREAj - AREA\ \min}{AREA\ \max - AREA\ \min}\right) + 30\,x\left(\frac{D_{0\max} - D_0}{D_{0\max} - D_{0\min}}\right)$$ **Ecuación 18**

El índice definido por esta ecuación, que en adelante se llamará SAI 2, presenta la mejora de que incluye el valor de D_0 de manera directa en el índice, incorporando así el aporte de la condición de la subrasante.

La siguiente tabla es un resumen de los diferentes índices y los parámetros mecánicos con los que se les puede relacionar.

Tabla 7[31]**.** Índices de condición estructural: parámetro propuesto para el establecimiento de las diferentes relaciones.

Índice / Parámetro o capa	$AREA_1$	$AREA_2$	$AREA_3$	SAI_1	SAI_2	AI_1	AI_2	AI_3	AI_4	BCI_1	BCI_2	BDI	SCI
Módulo Elástico de la Carpeta Asfáltica (M_{CA})						X							X
Módulo Elástico de la Base (M_B)			X				X	X					
Módulo Elástico de la Subbase (M_{SB})			X				X	X				X	
Módulo Elástico de la Subrasante (Mr)									X	X	X		
Número Estructural (SN)	X	X		X	X								
Deformación Unitaria a Tensión (ε_t)				X	X								
Deformación Unitaria a Compresión (ε_c)										X	X		

Además de estos, existen índices que caracterizan la condición funcional e índices combinados. El índice de rugosidad de pavimentos PRI (Por sus siglas en inglés *"Pavement Roughness Index"*), representa la condición funcional y está dado por la siguiente ecuación,

$$PRIj = 100x\left(1 - \frac{IRIj - IR\,\mathrm{Im}\,in}{IR\,\mathrm{Im}\,ax - IR\,\mathrm{Im}\,in}\right) \qquad \textbf{Ecuación 19}$$

Este, como se puede observar, depende propiamente de las mediciones hechas en campo del IRI en las que se toma la máxima y mínima medición de toda la sección de datos que se tengan para un periodo el cual puede ser hasta de años. Y el IRI_j es el IRI que fue obtenido por el ensayo en el momento y lugar en que se quiera obtener el PRI.

[31] Elaborado por autor.

2.1.4. Conceptos básicos de estadística

Es importante dar, a manera informativa, algunas definiciones de los conceptos de estadística empleados por los sistemas de administración de carreteras en la manipulación de las bases de datos con que cuentan.

2.1.4.1 Media aritmética

Representa el promedio aritmético de una muestra de datos, su forma general es, para el total de las observaciones,

$$\mu = \frac{\Sigma x}{N} \qquad \textbf{Ecuación 20}$$

Y para la muestra,

$$\overline{X} = \frac{\Sigma x}{n} \qquad \textbf{Ecuación 21}$$

Donde,

μ: media de la población.

$\overline{X}$: Media de la muestra.

x: dato o valor observado.

N: total de datos de la población

n: total de datos de la muestra

Algunas de las desventajas que se tienen son:

1. Puede ser afectada por valores extremos no representativos del resto de datos.
2. No se puede calcular para conjuntos de datos con clases abiertas (intervalos abiertos).

2.1.4.2 Medidas de dispersión

Se refiere al esparcimiento de los datos. Las descripciones más completas de la dispersión son aquellas que se refieren a la desviación promedio respecto a alguna medida de tendencia control; dos de estas son la variancia y la desviación estándar.

La variancia es la medida del cuadrado de la distancia promedio entre la media y cada elemento de la población, matemáticamente:

$$\sigma^2 = \frac{(x-\mu)^2}{N} \qquad \textbf{Ecuación 22}$$

Donde,

σ^2: Varianza de la población.

μ: media de la población.

x: dato o valor observado.

N: total de datos de la población

Por otra parte, desviación estándar no es más que la raíz cuadrada de la variancia.

La desviación estándar posee la gran ventaja, respecto a la varianza, de que se da en las mismas unidades que los datos originales, lo que hace más fácil su interpretación.

Otra medida de dispersión útil es el coeficiente de variación el cual da una idea general de la magnitud de la desviación estándar en relación con la magnitud de la media, permite comparar dos distribuciones,

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} * 100$$ **Ecuación 23**

Donde,

CV: Coeficiente de varianza

σ: Desviación estándar de la muestra

μ: Media de la muestra

2.1.4.3 Regresión

Técnica para investigar y modelar relación entre variables, existen varios tipos: lineal, lineal múltiple, polinómica, logarítmica, etc.

Para evaluar los resultados de las estimaciones hechas empleando técnicas de regresión existen dos herramientas:

1) El error estándar de la estimación: que generalmente se emplea como dato de entrada en modelos de prueba de hipótesis. Tiene la forma,

$$S_e = \sqrt{\frac{\Sigma(y - \hat{y})^2}{n - 2}}$$ **Ecuación 24**

Donde,

S_e: Error estándar de la estimación.

y: Valor observado de la variable dependiente.

ŷ: Valor estimado, obtenidos de la ecuación de regresión.

n: Número de datos de la muestra.

2) Porcentaje de varianza explicada: que mide el grado de correlación existente entre las variables dependiente e independiente (generalmente llamadas *y* y *x*), nos dice que porcentaje del cambio en la variable dependiente (“*y”)* es explicado por cambios en la variable independiente (“*x”)*. Su forma es,

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(y - \hat{y})^2}{\Sigma(y - \bar{y})^2}$$ **Ecuación 25**

Donde,

R^2: Porcentaje de varianza explicada.

$\bar{y}$: Promedio de valores observados de la variable dependiente.

y: Valor observado de la variable dependiente.

ŷ: Valor estimado, obtenidos de la ecuación de regresión.

El porcentaje de varianza explicada puede asumir valores entre 0 y 1, donde cuanto más se acerque al valor de 1 mejor es la correlación (es un porcentaje expresado en forma fraccional, i.e. un R^2 de 0,6 quiere decir que un 60% de la variación es explicada por el valor de x).

Para la interpretación de este porcentaje de varianza explicada se seguirá el siguiente criterio,

Tabla 8[32]. Interpretación del porcentaje de varianza explicada.

Valor de R	Calidad de la correlación
0,0 - 0,2	Muy débil, despreciable
0,2 - 0,4	Débil, baja
0,4 - 0,7	Moderada
0,7 - 0,9	Fuerte, alto, importante
0,9 - 1,0	Muy fuerte, muy alta

La definición de estos rangos depende del nivel de la investigación que se realiza y de las consecuencias de un posible error en la estimación, por tanto es una definición que establece el propio investigador en base a lo que trabaja.

[32] Elaborado por autor, según consideraciones de la entrevista con la Msc. María Isabel Lutz, otras fuentes referencia 3.

2.1.4.4 Distribución normal

La distribución normal es un modelo de probabilidades, cuya gráfica tiene una forma acampanada, ver Figura 15, razón por la cual se le conoce como Campana de Gauss y algunas veces se habla de Distribución normal de Gauss.

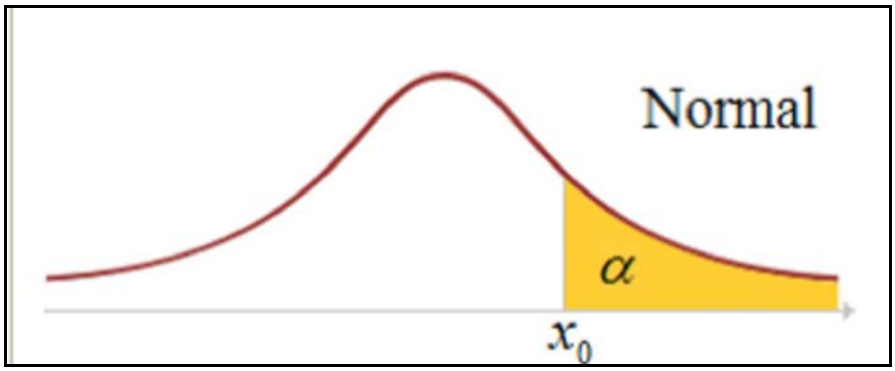


Figura 15[33]**.** Distribución normal.

Su expresión matemática es:

$$\alpha = p(x \geq x_0) = \int_{x_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \qquad \textbf{Ecuación 26}$$

Donde,

α: probabilidad de que el valor x sea mayor o igual a un valor dado x_0.

x: valor cualquiera.

x_0: valor o límite establecido.

σ: Desviación estándar de la población.

μ: media de la población.

La llamada distribución de Gauss es empleada en muchos de los procedimientos estadísticos existentes, pues presenta la peculiaridad de que el comportamiento de las probabilidades de muchas situaciones de la realidad que son modeladas probabilísticamente siguen una distribución que coincide con la descrita por el

[33] Tomado de www.vaxasoftware.com/indexes.html.

modelo de la normal, o en su defecto, se pueden ajustar mediante una transformación matemática.

Dentro de las aplicaciones que utilizan este modelo de distribución normal se encuentra la teoría de límites de confianza, que permiten establecer rangos que incluyan una cantidad "x" de datos dentro de la muestra que posean una representatividad definida a priori mediante la definición del nivel de confianza que se desee, esto es una probabilidad mínima o máxima de que los datos se encuentren dentro del rango esperado. Este concepto se aclara en la siguiente figura,

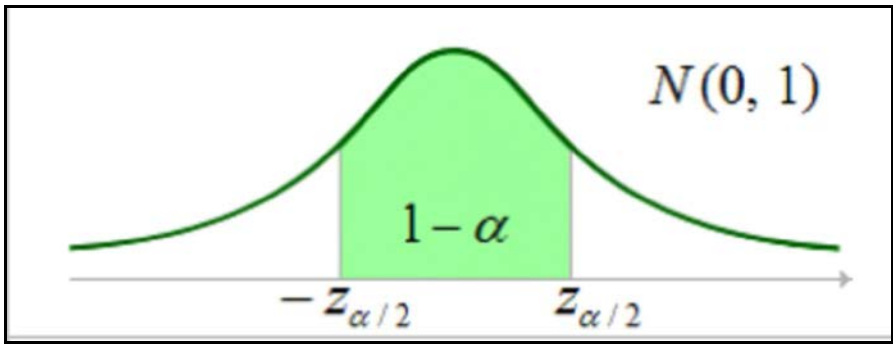


Figura 16[34]**.** Límites de confianza.

La expresión matemática utilizada para el cálculo de estos límites es:

$$\mu \in \left(\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \ , \ \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \qquad \textbf{Ecuación 27}$$

Donde,

μ: media poblacional.

$\bar{x}$: media muestral.

σ: desviación típica poblacional.

α: nivel de significancia.

[34] Tomado de www.vaxasoftware.com/indexes.html.

$z_{\alpha/2}$: Punto porcentual de la distribución normal de Gauss con probabilidad superior α/2.

n: tamaño de la muestra.

La principal aplicación de esta metodología se da en la determinación de los valores máximos y mínimos de AREA, deflexión central e IRI necesarios para el cálculo de los índices SAI y del PRI.

2.1.5. Optimización lineal

La optimización lineal es una metodología de modelaje de la realidad que busca servir de herramienta para la toma de decisiones en todos los niveles de la administración.

Uno de los métodos más utilizados en la solución de problemas de optimización es el conocido método SIMPLEX; este al igual que otros emplea una función objetivo y una serie de restricciones en forma de ecuaciones matemáticas que representan (de la manera más cercana posible) las limitaciones que se enfrentan en la realidad al tratar de resolver algún problema o ejecutar algún proyecto.

La solución matemática de los problemas de optimización no representa mayor problema, incluso si se cuentan con gran cantidad de restricciones y variables; lo que realmente se debe cuidar con detalle es la formulación del problema central y de las restricciones, hacer ese paso de la realidad al papel, generalmente no resulta sencillo.

Para la solución del problema de optimización, en este proyecto se empleará el compilador Woodstock de *Remsoft Inc.* en conjunto con la herramienta *MOSEK* que se encarga de efectuar la solución del problema de optimización lineal, y específicamente el código fuente desarrollado para estudiar los diferentes escenarios de inversión propuestos para la zona de mantenimiento del CONAVI 1-

9 (Madrigal, 2008). Para el *Remsoft,* cuando se busca realizar una planificación estratégica el código fuente se compone básicamente de 7 secciones principales:

1. Un archivo de capas (.lan): en el que se define la manera en que se tratará la información de la base de datos, sirve para ordenar esta información.
2. Un archivo de AREA (.are): que representa la base de datos empleada, se genera a partir de un archivo de extensión ".dbf" que puede venir de un *shape* salido de algún programa de georeferenciación tipo SIG (Arcview por ejemplo). En este archivo se ordena la información según las capas definidas previamente.
3. Un archivo de campos (.yld): que sirve para definir los costos de las intervenciones y las curvas de deterioro.
4. Un archivo de acciones (.act): que define las acciones de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción. Establece en cuales casos se debe aplicar una determinada intervención.
5. Un archivo de transiciones (.trn): cuya función es definir los resultados de las acciones, es decir en el caso en estudio determina en que condición queda la carretera luego de aplicar la intervención.
6. Un archivo de optimización (.opt): en el que se define la función objetivo y las restricciones. En caso de la planificación estratégica se busca minimizar las carreteras en mal estado, con las restricciones: a) Las carreteras en buen estado no disminuirán, b) Se eliminarán las carreteras en mal estado; y una de las más importantes, c) El presupuesto anual será tal que no existirá una diferencia entre un año y otro mayor al 10%, se busca evitar con esto que el programa asigne el primer año una cantidad irreal de dinero y se repare todo en ese año.
7. Un archivo de salidas (.out): en este se indica al programa que valores de los generados durante los cálculos son de interés para el programador.

Estos son los principales, sin embargo, existen herramientas extras que tienen funciones más específicas, como por ejemplo, generar gráficos, generar una

programación temporal (itinerario de las acciones), generar escenarios; con estos últimos se busca comparar situaciones en las que cambia una o dos de las condiciones iniciales.

En fin, es una herramienta poderosa que permite realizar un análisis de sensibilidad de inversiones rápida y eficientemente.

Capítulo 3. Metodología

3.1. Recopilación y Clasificación de la Base de Datos

Como punto de partida para esta investigación se debe contar con una tramificación de cada kilómetro de la red vial nacional. La base de datos empleada (del LanammeUCR) presenta dos clasificaciones, una es la clasificación por "Sección de control" elaborada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) con fines de asignación de los trabajos de conservación vial. La otra es una clasificación por "Tramos homogéneos" realizada a partir de mediciones de deflectometría por el LanammeUCR. La definición por tramos homogéneos es la que rige en la presente investigación, esta decisión se justifica en el hecho de que, además de que es una definición más mucho más reciente que la de las secciones de control, tiene una base científica de fondo que la respalda.

Posteriormente, se realizó la clasificación de los diferentes tramos de carretera en los seis tipos de estructuras definidos en esta investigación. Para ello primero se separaron los tramos considerando las características del tránsito. El dato de interés es el tránsito promedio diario anual (o TPDA), y el criterio de decisión se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9[35]**.** Criterio de clasificación por nivel de tránsito.

Clasificación por nivel de tránsito	TPDA (vehículos / día)
Medio a bajo	≤20000
Alto	>20000

El origen de los datos empleados para esta clasificación es la base de datos del Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Esta información puede estar desactualizada y posee mucha incertidumbre.

A continuación, siguiendo la definición de tipos de estructuras establecida en la sección 1.3.4, se procedió a definir los seis tipos de estructuras típicas. Tanto la Tabla 10 como la Figura 17 hacen referencia a la clasificación final establecida.

Tabla 10[36]**.** Tipos de estructura bajo estudio.

Definición	Clasificación por nivel de tránsito	Característica de la estructura
Tipo 1	Alto TPDA	Carpeta asfáltica + Base Estabilizada.
Tipo 2	Alto TPDA	Carpeta asfáltica + Base Granular.
Tipo 3	TPDA moderado a bajo	Carpeta asfáltica + Base Estabilizada.
Tipo 4	TPDA moderado a bajo	Carpeta asfáltica + Base Granular.
Tipo 5	TPDA moderado a bajo	Tratamiento superficial + Base Granular.
Tipo 6	TPDA moderado a bajo	Tratamiento superficial + Base Estabilizada.

[35] Elaborado por autor. Criterio: definición de investigador.
[36] Elaborado por autor.

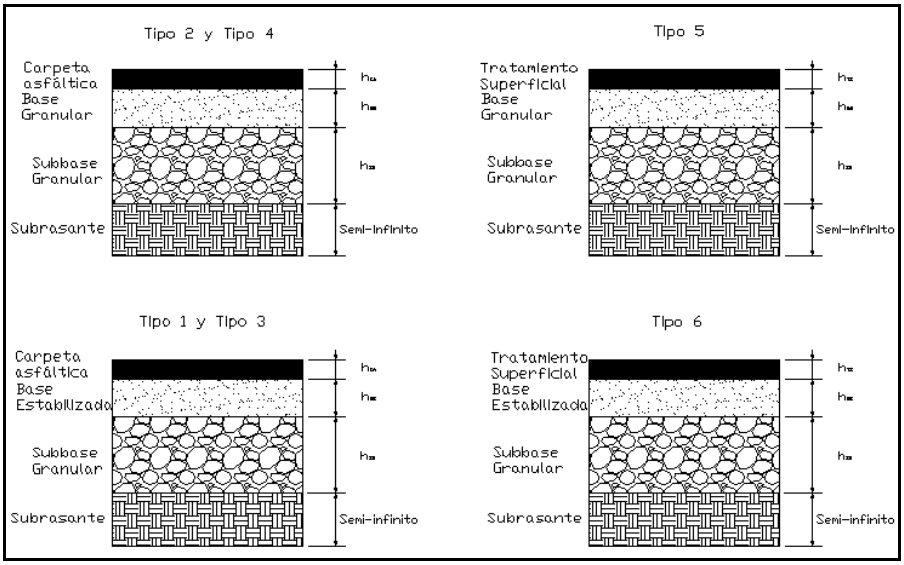


Figura 17[37]. Tipos de estructura estudiadas.

3.2. Índices Estructurales

En el presente proyecto se consideraron los índices estructurales desarrollados en los Estados Unidos como parte del proyecto NCHRP 10-48. Los índices de interés son los que se definen en la sección 2.1.3, y los que resultan de principal interés para la investigación son el SAI, el PRI y el BCI. En resumen se tiene,

[37] Elaborado por autor.

Tabla 11. Índices estudiados

Índice	Fórmula	Fuente
AREA	$AREA = \frac{6(D_0 + 2D_{12} + 2D_{24} + D_{36})}{D_0}$	Proyecto de doctorado NCHRP 10-48
SAI 1	$SAIj = 100x\left(\frac{AREAj - AREA\ \min}{AREA\ \max - AREA\ \min}\right)$	NBDOT, 2002
SAI 2	$SAIj = 70x\left(\frac{AREAj - AREA\ \min}{AREA\ \max - AREA\ \min}\right) + 30x\left(\frac{D_{0\max} - D_0}{D_{0\max} - D_{0\min}}\right)$	Mrawira et al, 2007
BCI 1	$BCI = D_{60} - D_{48}$	Proyecto de doctorado NCHRP 10-48
AREA3	$AREA_3 = \frac{6(D_{24} + 2D_{36} + D_{48})}{D_0}$	Proyecto de doctorado NCHRP 10-48
AI1	$AI_1 = \frac{D_0 + D_{12}}{2D_0}$	Proyecto de doctorado NCHRP 10-48
AI4	$AI_4 = \frac{D_{36} + D_{48}}{D_0}$	Proyecto de doctorado NCHRP 10-48
BDI	$BDI = D_{12} - D_{24}$	Proyecto de doctorado NCHRP 10-48
SCI	$SCI = D_0 - D_{12}$	Proyecto de doctorado NCHRP 10-48

Los datos de entrada para el cálculo de estos índices son mediciones de deflectometría, sin embargo, la determinación de los índices de adecuación estructural requiere del establecimiento de los valores máximos y mínimos de AREA y deflexión central (D_0) de toda la red.

Un estudio estadístico es empleado para tal efecto. Utilizando la teoría de límites de confianza y suponiendo una distribución normal de los datos, la cual es aceptable para este tipo de datos, se procedió a definir los máximos y mínimos de la red.

Se trabajaron dos tipos de teorías, la teoría de una cola y la de dos colas. Estas se diferencian por la manera en que se define el área de probabilidades dentro del gráfico de distribución normal. Además se debe resaltar que los cálculos que se describirán incluyen todos los datos de la red vial nacional. La Figura 18 aclara esta definición.

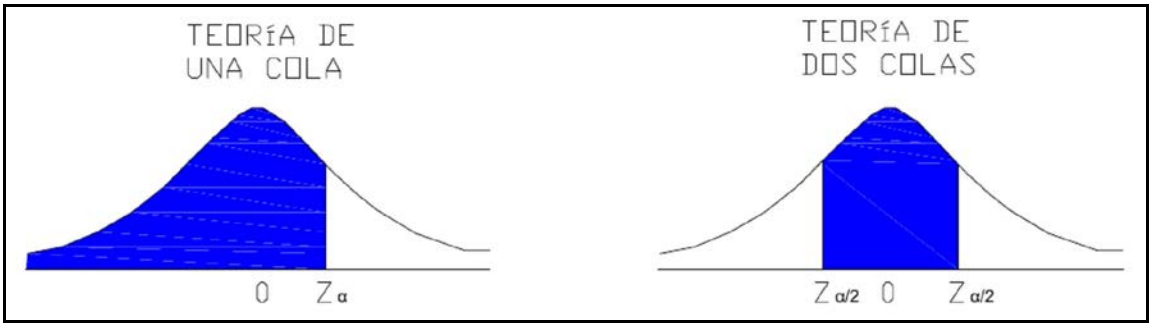


Figura 18[38]**.** Teoría de probabilidades para estimación de máximos y mínimos de la muestra.

Según el concepto anterior se definen los niveles de confianza como Z_{α} y $Z_{\alpha/2}$ que representan un área dentro del gráfico que corresponde a la probabilidad deseada. Esta teoría se aplica luego en la determinación de los valores máximos y mínimos de la deflexión central, Tabla 12 resume los resultados y supuestos empleados en la determinación de estos valores.

Tabla 12[39]**.** Estimación de los valores máximos y mínimos para la deflexión central.

Memoria de cálculo			
Teoría de una cola	Información de la muestra	**Promedio**	64,986
		Desviación Estándar	55,698
	Supuestos de análisis	**Nivel de confianza**	98%
		Zα	2,054
	Resultados	**Límite de Confianza**	**179,39**
Teoría de dos colas	Información de la muestra	**Promedio**	64,986
		Desviación Estándar	55,698
	Supuestos de análisis	**Nivel de confianza**	98%
		$Z_{\alpha/2}$	2,33
	Resultados	**Límite Superior**	**194,54**
		Límite Inferior	**-64,57**

[38] Elaborado por autor.
[39] Elaborado por autor.

Para el caso el valor de nivel de significancia (α) empleado es del 2% (lo que implica un nivel de confianza (1-α) de los datos de 98%), que es el valor aceptado para datos de carreteras nacionales; los valores de Z_{α} corresponden a la teoría de una cola y los $Z_{\alpha/2}$ a la teoría de dos colas, estos datos se extraen de tablas estadísticas. El valor usado en este proyecto es el correspondiente a la teoría de una cola, pues con la otra teoría se obtiene como valor mínimo un valor de deflexión negativo, el cual no tiene sentido físico y arrojaría resultados de SAI engañosos.

Los cálculos del AREA son un poco diferentes, se aplica la misma teoría pero no a los datos de AREA, sino al $\log_{10}$ de ellos como una estrategia matemática para manejar menos cifras significativas, además se emplea un nivel de confianza de 95%, es importante aclarar que estos datos fueron proporcionados por el personal del LanammeUCR y no se determinaron propiamente en esta investigación. Los resultados se citan en la Tabla 13.

.

Tabla 13[40]. Estimación de los valores máximos y mínimos para el índice AREA.

Memoria de cálculo			
Teoría de dos colas	Información de la muestra	**Promedio**	2,640
		Desviación Estándar	0,099
	Supuestos de análisis	**Nivel de confianza**	95%
		Z_{α}	1,97
	Límites	**Límite Superior**	**2,83**
		Límite Inferior	**2,45**
	Resultados	**AREA MAX**	**682,066**
		AREA MIN	**279,077**

Se cumple hasta entonces con la mitad de la información necesaria para lograr el objetivo de evaluar la aplicabilidad de los índices de condición. La estrategia

[40] Elaborado por autor.

propuesta en este caso consiste en realizar modelos de regresión, que relacionen los índices de condición con parámetros físicos y mecánicos que describan de manera directa la condición estructural de los pavimentos. Los parámetros que se emplean son:

1. El número estructural (SN): como elemento para describir la condición de toda la estructura de pavimento. Es función de los módulos, los espesores y la capacidad de drenaje de las capas que conforman la estructura de pavimento.
2. El módulo elástico: como descriptor de la condición individual de cada una de las capas que conforman la estructura.
3. Deformación unitaria a tensión: como criterio para definir la condición de la estructura como un todo. Se mide la deformación horizontal de la fibra extrema inferior de la carpeta asfáltica o de la fibra extrema inferior de la base estabilizada.
4. Deformación unitaria a compresión de la fibra extrema superior de la subrasante: como criterio para definir la condición del suelo de subrasante. Medida en dirección vertical.

Para establecer cada uno de estos parámetros se requiere determinar el módulo elástico de todas las capas que componen la estructura. Existen diversas metodologías para determinar los módulos, las más exactas son la determinación directa mediante ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas. En el presente proyecto se emplea el retrocálculo de módulos, pero, en este caso se utiliza modelos matemáticos de teoría multicapa, que suponen comportamiento elástico lineal de los materiales y medio semi-infinito, los cuales a diferencia del elemento finito no se asemejan mucho a la realidad. Específicamente se hace uso del software ELSYM 5, este programa condensa toda la teoría mencionada y permite determinar además de los módulos elásticos, las deformaciones y deflexiones que sufre la estructura de pavimento bajo los patrones de carga aplicados. La siguiente figura describe el proceso de retrocálculo,

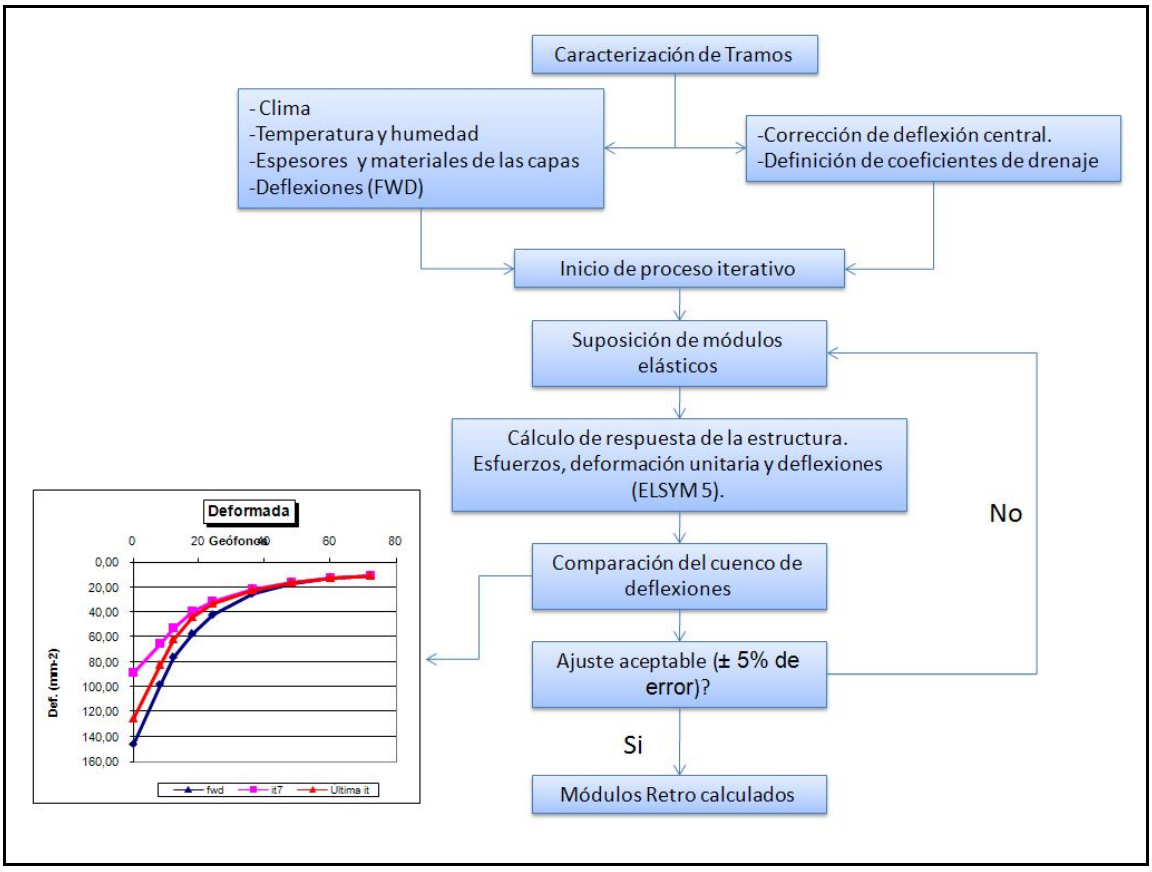


Figura 19. Proceso de retrocálculo de módulos empleando el Sofware ELSYM5.

Si bien el estudio está dirigido a evaluar 13 índices estructurales, se hará especial énfasis en los índices AREA, SAI y BCI (por sus siglas en inglés *"Base Condition Index"*). El AREA y el SAI por su habilidad de representar la condición de la estructura como un todo, y el BCI como principal indicador de la condición del suelo de subrasante. Esta última afirmación se extrae de los resultados del proyecto NCHRP 10-48, en donde el análisis de sensibilidad ejecutado arrojó como resultado que el BCI es el indicador más sensible a cambios en la condición de la subrasante.

Finalmente se realiza el estudio estadístico correspondiente para decidir acerca de la aplicabilidad de los índices. Dos son las herramientas que se deciden utilizar:

1. El porcentaje de varianza explicado (R^2): obtenido del modelo de regresión empleado para ajustar el comportamiento de los datos (criterio cuantitativo, ecuación 23).
2. La tendencia mostrada en el ploteo de los datos (criterio cualitativo).

Además se considera la posibilidad de realizar un análisis de varianza para trabajar con una muestra más grande de datos. Lo que se busca es ver si las relaciones de los índices muestran mejores niveles de correlación al incluir en el análisis estadístico la interacción inducida por las variables de tipo de estructura y nivel de tránsito, es decir plantear un modelo de regresión múltiple apoyado con un análisis de varianza.

3.3. Índice funcional

Como puede verse en la ecuación 18 (página 57), para calcular este índice se requiere conocer los valores mínimo y máximo del índice de rugosidad internacional, IRI, para toda la red. Un estudio similar al ejecutado para obtener dichos valores para el AREA y el D_0 es realizado, pero con la diferencia de que debido a la gran cantidad de valores "influenciales" que podían observarse en la base de datos (valores de IRI muy altos en este caso), debió realizarse un análisis que sirviera para justificar la decisión de descartar o no estos valores influenciales del estudio. La razón es que los llamados valores influenciales son mediciones que no siguen la tendencia del promedio de la muestra y en algunas ocasiones las razones de esta situación puede ser errores humanos en la determinación, errores de calibración, o algún otro motivo, y en estos casos no se representa la verdadera condición del pavimento, por tanto deben eliminarse del análisis.

El criterio empleado para decidir al respecto fue el límite de confianza, calculado suponiendo una distribución normal de los datos.

Al concluir este trabajo se puede tener cierta confianza en de que los datos de la muestra son valores reales y representativos de las condiciones de la red. Se realiza entonces el cálculo del valor máximo y el valor mínimo de IRI, las suposiciones son las mismas que las hechas para determinar el D_0 máximo y el D_0 mínimo, los resultados se tabulan a continuación,

Tabla 14[41]**.** Determinación de los valores máximo y mínimo del parámetro IRI.

Memoria de cálculo			
Teoría de una cola	Información de la muestra	**Promedio**	4,73
		Desviación Estándar	4,04
	Supuestos de análisis	**Nivel de confianza**	98%
		Zα	2,0540
	Resultados	**Límite de Confianza**	**13,03**
Teoría de una cola	Información de la muestra	**Promedio**	4,73
		Desviación Estándar	4,04
	Supuestos de análisis	**Nivel de confianza**	98%
		Zα/2	2,33
	Resultados	**Límite Superior**	**14,13**
		Límite Inferior	**-4,67**

3.3. Formulación del Índice de Condición de Pavimentos (PCI)

Suponiendo resultados positivos respecto al uso de los índices estructurales se plantea entonces analizar la formulación propuesta para el índice compuesto de condición de los pavimentos, el PCI (por sus siglas en inglés *"Pavement Condition Index"*). Recordando, la expresión matemática es

$$PCI = k_1 SAI + k_2 PRI$$

Ecuación 1

[41] Elaborado por autor.

La idea es definir los valores de las constantes (k_i) que representan cuanto del valor del PCI es producto del valor del índice funcional (PRI) y cuanto se debe al valor del índice estructural (SAI), en porcentaje.

En general, la definición de las constantes resulta ser una decisión de los sistemas de administración, son ellos los que deciden que orientación tomar, una hacia la recuperación estructural de la red ($k_{PRI} < k_{SAI}$) u otra hacia la búsqueda de la satisfacción de los usuarios ($k_{PRI} > k_{SAI}$). Una posible herramienta útil para la toma de tal decisión es realizar un análisis económico; con fines de investigación se estudian los resultados del Proyecto de graduación “Plan de Inversiones a Nivel Estratégico para la Zona 1-9 de Conservación Vial de CONAVI” (Madrigal, 2008).

El procedimiento a seguir es variar los valores de k_i empleados en la determinación de los PCI’s y con esto calcular la edad del pavimento a partir de la curva de deterioro con la que se cuenta, se hace aquí un paréntesis importante para hacer notaria la limitación que introduce el uso de esta curva, ya que es un desarrollo específico para un tipo de estructura y por tanto no es totalmente representativo de todos los tramos homogéneos empleados. Conociendo esto, se procedió a ejecutar el plan de inversiones, haciendo uso del programa Woodstock de Remsoft Inc., que a grandes rasgos busca la optimización lineal de un modelo de la red que se rige por los siguientes supuestos:

Tabla 15. Escenario de programación de inversiones para Woodstock de Remsoft Inc.

Escenario de inversión estudiado		
Función Objetivo	**Restricción 1**	**Restricción 2**
Minimizar el costo de inversión	Eliminar los pavimentos en mal estado en 15 años.	1. TPDA mayor a 9000 no pueden disminuir su PCI. 2. Costos anuales de inversión no deben variar más de un 10%.

La importancia de esta última restricción es que evita que el programa genere una solución en la que se asigne el primer año el presupuesto necesario para cubrir la reconstrucción de toda la red cumpliendo así con el objetivo de eliminar carreteras en mal estado, el problema con esto es que ese presupuesto tendría que ser una cantidad de dinero muy elevada, con la que obviamente no cuentan los departamentos de administración de pavimentos de las agencias de administración de carreteras, no es una solución real.

El trabajo a realizar consiste entonces en crear una matriz que contenga los valores de PCI's calculados con los diferentes combinaciones de pesos, en este caso las propuestas se tabulan en la Tabla 16. Con estos valores de PCI y las curvas de deterioro usadas, se obtiene la edad de las distintas secciones de carreteras, este último es el dato que se varía en la base de datos de entrada del programa para observar los cambios en los resultados.

Tabla 16[42]. Propuestas de pesos para las variables del índice PCI.

Propuesta	k_{SAI}	k_{PRI}
1	0,3	0,7
2	0,35	0,65
3	0,4	0,6
4	0,45	0,55
5	0,5	0,5
6	0,55	0,45
7	0,6	0,4
8	0,65	0,35
9	0,7	0,3

El análisis propuesto se centró entonces en ver temas como el tiempo hasta la recuperación total, el costo de la inversión inicial, el costo total, el comportamiento de la condición de la red valorada mediante el PCI total.

[42] Elaborado por autor.

Capítulo 4. Estructuras de Pavimento en Estudio

El origen de los datos empleados es el informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada del año 2006. La base de datos disponible para la presente investigación se compone de los datos de deflectometría obtenidos a partir ensayos realizados con el deflectómetro de impacto (FWD por sus siglas en inglés *"Falling Weight Deflectometer"*), datos de rugosidad superficial (IRI por sus siglas en inglés *"International Roughness Index"*) producto de mediciones ejecutadas con el perfilómetro láser, información de espesores producto de ensayos de extracción de núcleos, clasificación de la red en tramos homogéneos; todo esto facilitado por el LanammeUCR. Además se contó con información de volúmenes de tránsito medidos por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

En el anexo C se grafican los valores de IRI y de deflexión central para los tramos en estudio y se tabula la información de espesores y caracterización de las distintas capas de cada estructura. La Tabla 17 y la Tabla 18 resumen información de ubicación, nomenclatura y tránsito de los tramos.

Tabla 17. Información de los tramos de estudio de las zonas 1-7 y 3-1.

Zona de Conservación (MOPT-CONAVI)	Tramo Homogéneo	Sección de Control	TPDA (Vehículos por Día)
1-7	**29c**	**30110**	52026
1-7	**29d**	**30600**	38017
1-7	**60**	**30600**	38017
1-7	**29ª**	**30101**	35332
1-7	**59ª**	**30101**	35332
1-7	**29b**	**30730**	52026
1-7	**59b**	**30750**	52026
1-7	**348,349**	**40270**	1565
1-7	**30**	**30090**	3758
1-7	**366**	**30230**	2145
1-7	**374**	**30052**	6955
1-7	**405**	**30120**	10600
1-7	**443**	**30171**	1430
1-7	**346ª**	**30240**	10070
1-7	**368**	**30290**	7457
1-7	**347**	**30250**	640
1-7	**346b**	**30491**	6335
1-7	**346c**	**30492**	2580
1-7	**365**	**30551**	475
3-1	**12**	**60200**	7218
3-1	**137**	**60180**	4345
3-1	**239**	**60560**	885
3-1	**135ª**	**60610**	8666
3-1	**105**	**60622**	4868
3-1	**241**	**60730**	510

Tabla 18. Información de los tramos de estudio de las zonas 1-9 y 4-2.

Zona de Conservación (MOPT-CONAVI)	Tramo Homogéneo	Sección de Control	TPDA (Vehículos por Día)
1-9	**61**	**40000**	41239
1-9	**274**	**21330**	26635
1-9	**61**	**40750**	17574
1-9	**205**	**40151**	2360
1-9	**211-212**	**40170**	1220
1-9	**205a**	**40152**	5590
1-9	**205b**	**40160**	1850
1-9	**206**	**40190**	2895
1-9	**220ª**	**40350**	2310
1-9	**220b**	**40630**	3185
1-9	**85**	**40730**	16235
1-9	**197**	**40032**	13835
1-9	**204**	**40140**	11595
1-9	**206**	**40200**	340
1-9	**215**	**40251**	4420
1-9	**231ª**	**40070**	16230
1-9	**231b**	**40080**	4130
4-2	**41**	**60060a**	1740
4-2	**44b**	**60052**	1378
4-2	**460**	**60300**	2080
4-2	**379ª**	**60340a**	1080
4-2	**379b**	**60340b**	1080
4-2	**377**	**60981**	1257
4-2	**375**	**60982ª**	570
4-2	**376**	**60982b**	570
4-2	**458**	**60331**	785
4-2	**459**	**60332**	495

4.1. Ubicación espacial de las estructuras

Durante el proceso de definición del proyecto se agruparon los pavimentos con características comunes de estructura y tránsito. Posteriormente se realizó una caracterización de las condiciones de clima para cada tramo.

La Figura 20 muestra el mapa Costa Rica (sin escala) con la ubicación de las Zonas de Conservación Vial del CONAVI (MOPT), Las zonas etiquetadas corresponden a las regiones a las cuales pertenecen los tramos de carretera estudiados.

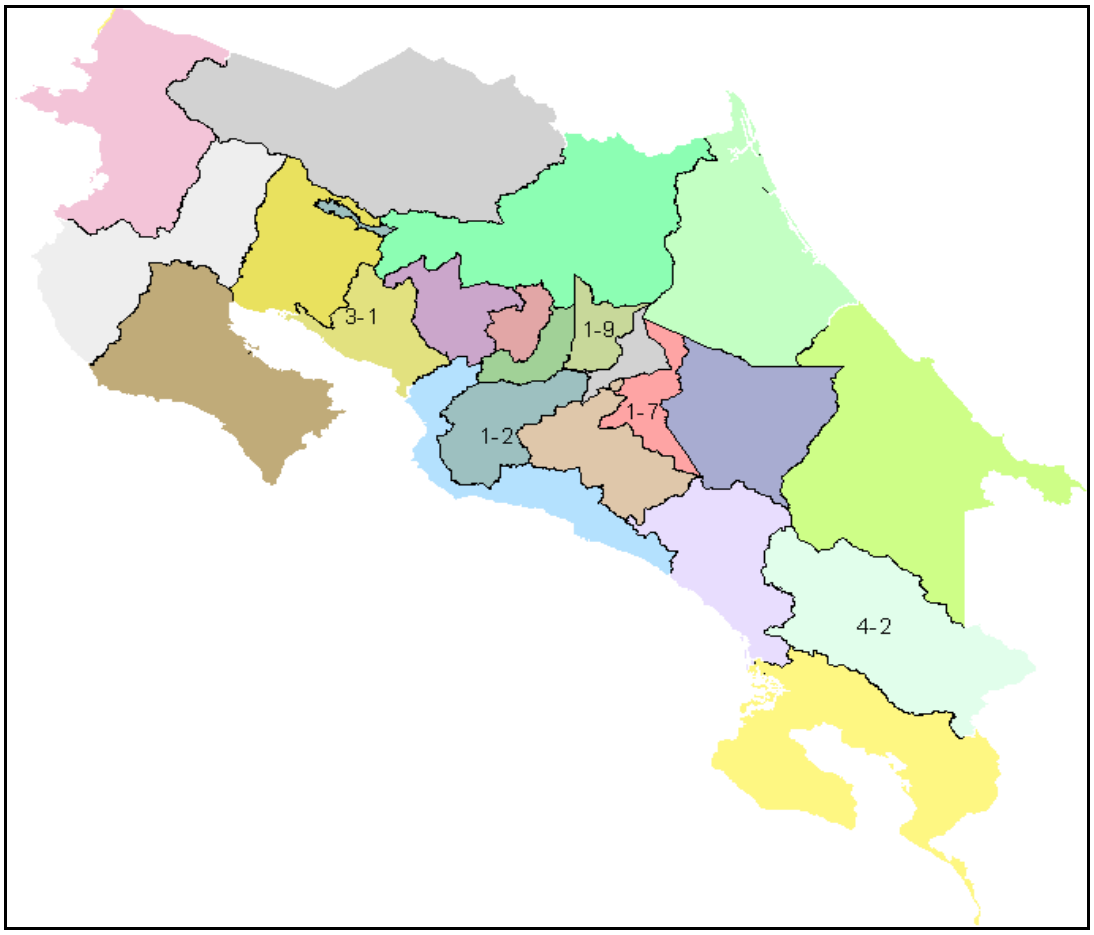


Figura 20. Ubicación de las zonas de estudio.

Además en el anexo A se muestran mapas con la localización exacta de las perforaciones, o puntos de extracción de núcleos para caracterización de espesores de capas.

Para realizar la caracterización climática de los diferentes tramos homogéneos de carretera se hizo uso de los resultados del proyecto de graduación del ingeniero Erick Orozco Orozco "Zonificación climática de Costa Rica para la gestión de Infraestructura Vial" (Orozco, 2007). Empleando el mapa de zonificación 5-16 y la tabla 5-3 que se presentan en el proyecto de Orozco, se procedió a realizar la siguiente caracterización de las zonas de estudio:

Tabla 19[43]**.** Caracterización climática de las zonas de estudio.

Zona de Conservación	Localización	Regiones(1)	Características de Temperatura	Características de Humedad
1-7	Oeste de la provincia de Cartago	-VCP -VC -CA	Temperatura fresca (18-24ºC)	Región bastante húmeda. La humedad es mayor en las zonas montañosas.
1-9	Sur de la provincia de Heredia	-VCP -VC -CA	Temperatura fresca (18-24ºC)	Región bastante húmeda. La humedad es mayor en las zonas montañosas.
3-1	Región norte de la provincia de Puntarenas	-CGT -GNG	Altas temperaturas promedio (≈26ºC)	Condiciones secas, mas de 4 meses secos. Pocos días en promedio con precipitación, precipitaciones de gran intensidad.
4-2	Región sur de la provincia de Puntarenas	-VG	Altas temperaturas	Elevada humedad

(1) **-VCP:** Volcánica Central Pacífico, **-VC:** Valle Central, **- CA:** Caribe Alta, **-CGT:** Cordillera de Guanacaste y Tilarán, **-GNG:** Golfo de Nicoya y Llanura Guanacasteca, **-VG:** Valle del General

Se presenta además la siguiente tabla, en la cual se resume la información requerida para sustentar la discusión que busca justificar la elección de los

[43] Elaborado por autor.

valores de coeficiente de drenaje, m, utilizados en el cálculo del número estructural.

Tabla 20[44]. Características de las regiones climáticas.

Región	Precipitación promedio anual (mm)	Número de meses secos	Días de lluvia en el año	Temperatura promedio (°C)
CA	3768	1 o menos	211	18
CGT	2660	4	172	21
GNG	1911	más de 5	108	26
VC	2223	más de 4	140	20
VG	3186	más de 3	187	24
VCP	2632	más de 3	168	16

Como se observa en la Tabla 20, nuestro país muestra una época húmeda bastante extensa y con precipitaciones de fuerte intensidad, por ello se considera válido suponer para el porcentaje de tiempo en que la estructura estará expuesta a niveles de humedad cercana a la saturación un valor de más del 25% para las zonas 1-7, 1-9 y 4-2, mientras que para los datos de la zona 3-1 es probable considerar este porcentaje un poco menor, entre 5 y 25%. Con esta información se ingresa a la Tabla 1 para determinar los valores de coeficiente de drenaje para las diferentes zonas, los resultados se tabulan a continuación,

Tabla 21[45]. Coeficiente de drenaje para las estructuras en estudio.

Zona de conservación	Coeficiente de drenaje, m
1-7	0,8
1-9	0,8
3-1	0,9
4-2	0,8

Se supone para todas las estructuras una condición de drenaje de calidad regular.

[44] Modificado de "Zonificación Climática de Costa Rica para la Gestión de Infraestructura Vial", Orozco 2007
[45] Elaborado por autor.

4.2. Caracterización de los tramos en estudio

Los tramos de carretera a analizar se componen de caminos con diferentes configuraciones estructurales, y en estados de condición igualmente variados que van desde tramos en excelente estado hasta secciones de camino que presentan un alto grado de deterioro. Existen vías con pavimentos de concreto, otras con bases estabilizadas con asfalto y otras con ausencia de alguna de las capas intermedias (base o subbase) que no se incluirán en la investigación.

A continuación se presentan una serie de tablas que muestran los tramos en estudio, clasificados según los tipos de estructura definidos para la investigación. En la Tabla 22 se muestra los tramos del total de la base de datos de la investigación. Mientras que la Tabla 23 muestra los tramos de carretera que finalmente conforman la muestra con la que se trabajó. Lo que representa esta tabla es resultado de un proceso de selección realizado con el fin de eliminar algunos de los tramos homogéneos por varias razones como: 1) presentar valores influenciales, que se salen de la tendencia mostrada por la media de los datos y considerados no representativos de las condiciones reales del pavimento, 2) poseer una estructura que no se adecua a ninguna de las especificadas en la propuesta, y 3) haber obtenido, como resultado del retrocálculo, módulos de subrasante superiores a 155,5MPa (22500 psi).

Este límite que se impone al Módulo de Subrasante, fue definido por los especialistas del LanammeUCR basados en su experiencia y en los registros con que cuentan, según se mencionó, este valor se considera alto para los suelos típicos de Costa Rica.

Tabla 22[46]**.** Clasificación de los tramos muestreados.

Tipo	Características	Tramos homogéneos
1	**Alto TPDA, CA + BE**	61, 29c, 29d, 60.
2	**Alto TPDA, CA + BG**	274, 29a, 59a, 29d, 59b.
3	**Moderado a Bajo TPDA, CA + BE**	61, 194, 205, 211-212, 10, 11, 12, 13, 44b, 44c.
4	**Moderado a Bajo TPDA, CA + BG**	85, 206, 231b, 405, 368, 104, 43, 197, 215, 236, 443, 315a, 239, 44, 204, 231a, 374, 346a, 315b, 135a, 34, 46, 41, 42, 135b, 241, 105, 30a.
5	**Moderado a Bajo TPDA, TS + BG**	205a, 220a, 348-349, 342, 438, 460, 377, 205b, 220b, 30, 344, 268, 378, 375, 206, 232-233, 342, 366, 0, 379, 376.
6	**Moderado a Bajo TPDA, TS + BE**	143, 0, 347, 346a, 346b, 364, 365, 458, 459.

Tabla 23[47]**.** Tramos seleccionados para análisis.

Tipo	Características	Tramos homogéneos
1	**Alto TPDA, CA + BE**	61, 29c, 29d, 60.
2	**Alto TPDA, CA + BG**	274, 29a, 59a, 29d, 59b.
3	**Moderado a Bajo TPDA, CA + BE**	61, 205, 211-212, 12, 44b.
4	**Moderado a Bajo TPDA, CA + BG**	85, 206, 231b, 405, 368, 197, 215, 443, 239, 204, 231a, 374, 346a, 135a, 41, 241, 105.
5	**Moderado a Bajo TPDA, TS + BG**	205a, 220a, 348-349, 460, 377, 205b, 220b, 30, 375, 206, 366, 376, 379a, 379b.
6	**Moderado a Bajo TPDA, TS + BE**	347, 346b, 346c, 365, 458, 459.

[46] [46] Elaborado por autor.

Una nota importante respecto a estas tablas es aclarar la nomenclatura para tramos homogéneos empleada. La nomenclatura aquí utilizada es una modificación de la nomenclatura oficial (generada por el LanammeUCR). En estas tablas se pueden leer etiquetas de tramos homogéneos como 29c y 29d ó 232-233, que reflejan condiciones como diferencias en la estructura de pavimento (en general diferencias en el material de base), diferencias que no son consideras por la metodología de generación de tramos homogéneos basada en datos de deflectometría.

Finalmente en el anexo A se muestran, para las zonas de estudio, los datos de las mediciones de Regularidad Superficial (IRI) y Deflexión central (D_0) clasificados en diferentes rangos según el valor. (**Nota:** mapas elaborados por el autor).

Capitulo 5. Aplicación de los Índices de las Carreteras

Antes de mostrar los resultados obtenidos del cálculo de los diferentes índices, conviene aclarar las razones que motivaron que este procesamiento de los datos se realizara con la división en seis diferentes grupos.

Revisando primero los dos parámetros que definen la clasificación. Primero se tiene el nivel de tránsito, la importancia de este factor es que con el nivel de tránsito generalmente se define el grado de importancia del tramo de carretera y, pensando en que se debe ser más exigente y restrictivo al evaluar la condición de pavimentos cuyo estado podría afectar un gran número de usuarios y cuya destrucción total resultaría en serias pérdidas para el país, debería pedirse a los índices mejores niveles de correlación para las condiciones de alto tránsito.

El otro aspecto es la composición de la estructura de pavimento. El número y las propiedades de cada capa son las responsables de la respuesta del paquete estructural ante las solicitaciones de carga. Por tanto es de esperarse que el

comportamiento de los diferentes índices varíe de un paquete estructural a otro. Esta suposición puede convertirse en afirmación al considerar el proyecto NCHRP 10-48, en este se trabajaron diferentes estructuras (no las mismas de la presente investigación) y se observaron claras y marcadas diferencias en los resultados obtenidos, las cuales son observables en las diferencias en los modelos de deterioro generados, en las metodologías de corrección planteadas y en los rangos de valores propuestos para los diferentes estados de condición.

En resumen, se hace necesario establecer una clasificación bien fundamentada, pues de ello depende que se logre la homogeneidad deseada con el uso de índices.

Debe recordarse la importancia de tener un buen nivel de correlación. El uso final que se dará a estos índices es servir de criterio de decisión en la etapa de planificación de las acciones de intervención (mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción); proceso fundamental dentro de las labores de un sistema de administración de pavimentos. De ahí que si la precisión y la exactitud con que el índice predice la condición de los pavimentos no son buenas, no se logrará cumplir con la máxima de los sistemas de administración de activos que es *"… aplicar el tratamiento adecuado en el momento justo."* (Madrigal, 2008) y por tanto la planificación realizada no servirá de mucho.

5.1. Índices de Condición Estructurales de las Carreteras

A continuación se tabulan los valores obtenidos para los principales índices estudiados. Los que se presentan a continuación son una selección realizada en busca de tener un grupo de índices que permitan decidir respecto a las diferentes capas de la estructura, como un todo y por separado (considérese la Tabla 24, pág. 90, y la Tabla 7, pág. 58). Los valores calculados para la totalidad de los índices se pueden observar en el anexo A.

Recordemos un poco acerca de los índices, la siguiente tabla hace referencia a la definición del índice y a la ecuación empleada para su cálculo.

Tabla 24[48]**.** Información de los índices analizados.

INDICE	FUNCIÓN	CÁLCULO
AREA	Indicador de toda la estructura	ecuación 4
AREA3	Indicador de las capas de base	ecuación 6
SAI	Indicador estructural, función del AREA	ecuación 17
SAI2	Indicador estructural función del AREA y la deflexión central	ecuación 26
AI1	Indicador de la carpeta asfáltica	ecuación 7
AI4	Indicador de la subrasante	ecuación 10
BCI1	Indicador de la subrasante	ecuación 12
BDI	Indicador de las capas de base	ecuación 14
SCI	Indicador de la carpeta asfáltica	ecuación 15

Los resultados se tabulan de manera independiente para los tipos de estructura, y el valor presentado corresponde al promedio del tramo homogéneo. Para el índice llamado BCI1 se obtienen resultados negativos, esto es producto de que la expresión matemática propone la resta de dos mediciones de deflexión que por definición siempre es negativa. A continuación los resultados,

Tabla 25. Índices de condición, clase de estudio Tipo 1 (TPDA alto, base estabilizada).

Tramo Homogéneo	Sección de control	AREA	AREA3	SAI	SAI 2	AI1	AI4	BCI1	BDI	SCI
61	**40000**	557,03	204,61	68,97	68,68	0,86	0,28	-2,91	14,88	18,20
29c	**30110**	600,24	259,11	79,70	82,40	0,86	0,37	-1,3	2,61	8,03
29d	**30600**	571,00	223,70	72,44	76,47	0,86	0,31	-1,66	5,30	7,54
60	**30600**	545,40	212,22	66,09	72,51	0,84	0,30	-1,38	4,51	7,52

[48] Elaborado por autor.

Tabla 26. Índices de condición, clase de estudio Tipo 2 (TPDA alto, base granular).

Tramo Homogéneo	Sección de control	AREA	AREA3	SAI	SAI 2	AI1	AI4	BCI1	BDI	SCI
274	**21330**	569,80	229,94	72,14	75,38	0,85	0,33	-1,42	7,46	10,08
29a	**30101**	617,35	218,51	83,94	83,40	0,93	0,29	-1,63	10,01	7,49
59a	**30101**	513,49	179,36	58,17	64,65	0,82	0,25	-1,42	9,11	14,26
29b	**30730**	550,88	219,10	67,45	71,32	0,83	0,31	-1,98	6,24	14,59
59b	**30750**	488,00	168,67	51,84	61,00	0,80	0,23	-1,20	6,71	13,84

Tabla 27. Índices de condición, clase de estudio Tipo 3 (TPDA moderado-bajo, base estabilizada).

Tramo Homogéneo	Sección de control	AREA	AREA3	SAI	SAI 2	AI1	AI4	BCI1	BDI	SCI
61	**40750**	526,40	180,50	61,37	65,16	0,84	0,24	-2,48	11,53	14,74
6	*	437,13	124,95	39,22	51,03	0,78	0,17	-0,82	11,40	17,34
8	*	622,75	259,67	85,28	86,06	0,89	0,37	-1,61	4,60	4,59
12	**60200**	520,79	160,13	59,98	68,48	0,86	0,21	-0,80	6,72	6,40
44b	**60052**	858,61	368,55	143,81	128,86	1,11	0,51	-1,07	4,14	-2,27

*Información extraída del proyecto de graduación del Ing. Juan Diego Porras, referencia 19.

Tabla 28. Índices de condición, clase de estudio Tipo 4 (TPDA moderado-bajo, base granular).

Tramo Homogéneo	Sección de control	AREA	AREA3	SAI	SAI 2	AI1	AI4	BCI1	BDI	SCI
85	**40730**	530,80	174,66	62,46	66,37	0,85	0,23	-2,03	11,43	13,84
197	**40032**	528,91	174,95	61,99	64,22	0,84	0,23	-2,80	14,08	17,86
206	**40200**	422,16	89,76	35,51	37,96	0,79	0,10	-2,67	30,72	42,20
215	**40251**	529,41	158,98	62,12	63,47	0,86	0,20	-2,81	18,53	15,82
231a	**40070**	568,87	198,62	71,91	72,53	0,88	0,27	-2,21	14,47	11,78
231b	**40080**	533,84	173,22	63,22	63,79	0,86	0,23	-2,78	18,36	18,67
374	**30052**	456,02	123,64	43,91	50,17	0,81	0,16	-2,06	19,35	24,00
405	**30120**	781,38	289,42	100,00	113,05	1,09	0,39	-1,91	12,16	-4,10
443	**30171**	597,14	171,49	78,93	76,77	0,95	0,21	-2,28	22,32	6,02
346a	**30240**	568,07	179,56	71,71	73,80	0,90	0,23	-1,46	13,56	9,18
135a	**60610**	390,76	89,08	27,71	41,01	0,75	0,12	-0,81	14,09	24,73
105	**60622**	546,38	164,21	66,33	67,16	0,88	0,21	-2,41	18,51	13,20
241	**60730**	419,09	93,07	34,74	46,33	0,79	0,12	-1,17	16,96	19,28
41	**60060a**	720,76	329,89	100,00	100,00	0,96	0,48	-1,04	2,80	1,02

Tabla 29. Índices de condición, clase de estudio Tipo 5 (Tratamiento superficial, base granular).

Tramo Homogéneo	Sección de control	AREA	AREA3	SAI	SAI 2	AI1	AI4	BCI1	BDI	SCI
205a	**40152**	413,94	97,08	33,46	40,23	0,77	0,12	-1,65	22,66	36,13
205b	**40160**	438,11	110,91	39,46	45,29	0,79	0,14	-1,91	21,11	31,67
206	**40190**	478,60	131,64	49,51	51,62	0,82	0,16	-2,18	23,32	28,90
220b	**40630**	432,94	109,22	38,18	41,36	0,79	0,14	-1,80	27,29	40,19
348-349	**40270**	454,98	112,40	43,65	38,92	0,81	0,13	-3,60	39,91	49,81
30	**30090**	452,66	126,04	43,07	50,8	0,80	0,16	-1,51	16,08	24,36
366	**30230**	450,70	132,49	42,59	45,38	0,79	0,18	-2,97	23,90	34,58
137	**60180**	378,27	63,61	24,61	31,82	0,75	0,06	-1,12	27,51	45,82
460	**60300**	480,89	153,54	50,08	52,75	0,81	0,21	-2,50	20,89	29,20
379a	**60340a**	393,21	86,50	28,32	36,52	0,76	0,11	-1,44	23,94	38,95
379b	**60340b**	429,97	115,31	37,44	43,19	0,78	0,15	-1,91	21,75	36,44
377	**60981**	368,36	69,77	22,15	31,37	0,74	0,09	-1,41	24,39	43,77
375	**60982a**	359,85	80,90	20,04	34,67	0,72	0,11	-1,07	13,26	31,76
376	**60982b**	356,11	69,17	19,12	30,57	0,73	0,09	-1,15	20,71	42,81

Tabla 30. Índices de condición, clase de estudio Tipo 6 (Tratamiento superficial, base estabilizada).

Tramo Homogéneo	Sección de control	AREA	AREA3	SAI	SAI 2	AI1	AI4	BCI1	BDI	SCI
346b	**30491**	556,03	200,79	68,73	70,71	0,86	0,27	-1,72	11,93	14,59
346c	**30492**	604,45	245,09	80,74	78,49	0,88	0,35	-2,81	11,21	12,18
365	**30551**	462,56	125,31	45,53	48,86	0,81	0,16	-2,40	23,56	30,64
458	**60331**	539,66	186,56	64,66	65,63	0,85	0,25	-2,32	15,50	18,73
459	**60332**	544,42	194,16	65,84	63,51	0,86	0,27	-4,45	21,70	24,01

La manera de relacionar el valor del índice con la condición del pavimento se define de manera distinta para cada índice, por ejemplo, para los SAI se tiene que a cuanto más alto sea el valor del índice mejor será el estado del pavimento, en el caso del BCI, en cuanto menor sea el valor absoluto del índice mejor será la condición de la subrasante. En el caso del Índice AREA se puede considerar como referencia la Tabla 6. En general, para los demás índices, de los gráficos generados se puede deducir el criterio para definir la condición.

5.2. Índices de Condición Funcionales de las Carreteras

Las siguientes tablas resumen los resultados del trabajo realizado con el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el Índice de Rugosidad del Pavimento (PRI). La intensión es mostrar el rango de valores hallado y la dispersión observada.

Tabla 31. Resumen de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el Índice de Rugosidad del Pavimento (PRI) para la zona 1-7.

Tramo Homogéneo	Sección de control	IRI	Desviación estándar (σ_{IRI})	Coeficiente de varianza, CV	PRI	Desviación estándar (σ_{PRI})
29	**30101/30110/30600/300730**	3,20	1,02	31,88	75,44	7,84
30	**30090**	5,60	1,84	32,86	57,02	14,13
31	**30690**	5,00	2,03	40,60	61,63	15,58
32	**30690**	5,19	1,45	27,94	60,17	11,14
33	**30690**	4,69	1,82	38,81	64,01	13,99
34	**30690**	3,13	0,81	25,88	75,98	6,19
59	**30101/30750**	3,91	1,73	44,25	69,99	13,30
60	**30600**	2,56	0,61	23,83	80,35	4,69
97	**30021/30040/30062**	4,05	1,20	29,63	68,92	9,19
98	**30061/30062**	4,22	1,25	29,62	67,61	9,61
99	**30062**	4,13	0,94	22,76	68,30	7,21
315	**30031/30032/30033**	4,44	0,96	21,62	65,92	7,34
342	**300270**	11,24	16,08	143,06	13,74	24,07
343	**30270/30280**	5,00	3,50	70,00	61,63	14,49
344	**30280**	10,04	13,17	131,18	22,95	26,07
346	**30491/30492**	4,15	2,25	54,22	68,15	12,62
347	**30500/30250**	5,24	6,74	128,63	59,79	11,92
348	**30510/30500**	3,61	0,84	23,27	72,29	6,46
350	**30340**	7,67	1,72	22,43	41,14	13,22
351	**30080**	9,01	2,12	23,53	30,85	13,89
364	**30552/30551**	9,22	4,64	50,33	29,24	13,70
365	**30551**	7,04	3,24	46,02	45,97	23,42
366	**30230**	7,48	1,38	18,45	42,59	10,58
368	**30290**	5,50	2,21	40,18	57,79	16,98
370	**30260/30610**	6,80	2,20	32,35	47,81	16,91
374	**30052**	7,37	5,97	81,00	43,44	17,58
405	**30120**	4,72	1,61	34,11	63,78	12,38
410	**30560**	9,77	3,61	36,95	25,02	13,80
438	**30521/30522**	12,81	5,53	43,17	1,69	22,03
441	**30630**	10,86	1,61	14,83	16,65	8,58
442	**30570**	7,29	1,97	27,02	44,05	13,17
443	**30171**	6,92	2,48	35,84	46,89	19,02
Promedios		**6,31**	**3,08**	**48,81**	**51,59**	**13,47**

Tabla 32. Resumen de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el Índice de Rugosidad del Pavimento (PRI) para la zona 1-9.

Tramo Homogéneo	Sección de Control	IRI	Desviación estándar (σ_{IRI})	Coeficiente de varianza, CV	PRI	Desviación estándar (σ_{PRI})
2	**40040**	1,90	0,64	33,68	85,42	4,93
27	**40040/40710**	2,14	0,55	25,70	83,58	4,19
61	**40000/40750**	4,08	1,53	37,50	68,69	11,78
85	**40730**	3,87	1,35	34,88	70,30	10,34
143	**40500/40550**	2,75	0,56	20,36	78,89	4,33
144	**40550**	2,55	0,39	15,29	80,43	3,01
193	**40112**	5,47	3,00	54,84	58,02	22,99
197	**40032**	3,02	0,93	30,79	76,82	7,13
203	**40120**	4,19	1,05	25,06	67,84	8,09
204	**40130/40140**	3,51	1,11	31,62	73,06	8,49
205	**40152/40160**	4,84	1,84	38,02	62,85	14,13
206	**40190/40200**	3,75	1,18	31,47	71,22	9,04
207	**40210/40220**	6,35	4,10	64,57	51,27	27,65
208	**40220/40410**	13,39	2,42	18,07	0,00	8,60
209	**40400/40690**	9,61	1,90	19,77	26,25	13,77
210	**40230**	6,73	2,22	32,99	48,35	17,03
211	**40170**	7,79	1,78	22,85	40,21	13,67
212	**40170/40261**	8,99	1,98	22,02	31,01	15,06
213	**40252/40261**	7,55	2,18	28,87	42,06	16,75
214	**40252**	8,72	1,50	17,20	33,08	11,54
215	**40251**	4,11	1,02	24,82	68,46	7,80
216	**40420/40430**	4,02	1,34	33,33	69,15	10,28
220	**40630**	9,38	2,92	31,13	28,01	14,58
225	**40300/40310/40590**	7,12	2,62	36,80	45,36	20,13
230	**40100**	7,83	3,09	39,46	39,91	21,96
231	**40070/40080**	4,14	1,23	29,71	68,23	9,47
232	**40600**	6,86	1,29	18,80	47,35	9,87
233	**40100/40600**	7,81	1,56	19,97	40,06	12,00
234	**40321/40322**	7,71	2,21	28,66	40,83	16,97
235	**40330/40340**	6,57	1,59	24,20	49,58	12,19
236	**40360/40700**	6,30	2,38	37,78	51,65	18,30
307	**40490**	5,54	1,81	32,67	57,48	13,86
348	**40270**	7,93	1,39	17,53	39,14	10,69
349	**40270**	6,76	1,15	17,01	48,12	8,79
413	**40290/40440**	7,42	1,92	25,88	43,05	13,72
414	**40450**	7,50	1,60	21,33	42,44	12,28
449	**40390**	7,33	2,74	37,38	43,75	21,01
450	**40240**	9,89	1,52	15,37	24,10	11,36
451	**40280**	7,62	1,78	23,36	41,52	13,68
274	**21330**	2,85	0,79	27,72	78,13	6,06
Promedios		**6,15**	**1,70**	**27,64**	**52,82**	**12,44**

Tabla 33. Resumen de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el Índice de Rugosidad del Pavimento (PRI) para la zona 3-1.

Tramo Homogéneo	Sección de control	IRI	Desviación estándar (σ_{IRI})	Coeficiente de varianza, CV	PRI	Desviación estándar (σ_{PRI})
10	**60200**	2,76	0,46	16,67	78,82	3,49
11	**60200**	2,89	0,67	23,18	77,82	4,14
12	**60200**	3,17	0,87	27,44	75,67	6,68
13	**60200/60210/60220/60230**	3,40	3,97	116,76	73,91	10,25
14	**60230/60240**	3,06	0,76	24,84	76,52	5,87
15	**60240**	2,48	0,66	26,61	80,97	5,07
16	**60240**	3,43	0,69	20,12	73,68	5,31
104	**60190/60621**	2,93	1,05	35,84	77,51	8,08
105	**60622**	2,86	0,88	30,77	78,05	6,75
106	**60623**	4,66	1,52	32,62	64,24	11,64
135	**60610**	6,07	3,62	59,64	53,42	18,93
137	**60180**	6,21	2,22	35,75	52,34	17,03
239	**60560**	6,11	1,97	32,24	53,11	14,83
241	**60730**	4,60	1,99	43,26	64,70	15,24
242	**60730**	3,78	1,28	33,86	70,99	9,84
268	**60630**	2,41	0,76	31,54	81,50	5,80
453	**60670**	5,66	1,48	26,15	56,56	10,50
454	**60670/60681**	7,08	1,82	25,71	45,66	13,92
455	**60681/60682**	6,08	3,74	61,51	53,34	16,97
463	**60440/60450**	3,54	0,99	27,97	72,83	7,56
Promedios		**4,16**	**1,57**	**37,74**	**68,08**	**9,90**

Tabla 34. Resumen de Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el Índice de Rugosidad del Pavimento (PRI) para la zona 4-2.

Tramo Homogéneo	Sección de Control	IRI	Desviación estándar (σ_{IRI})	Coeficiente de varianza, CV	PRI	Desviación estándar (σ_{PRI})
40	**10001**	1,65	0,28	16,97	87,34	2,17
41	**60060**	2,07	0,54	26,09	84,11	4,18
42	**60060**	2,29	0,39	17,03	82,43	2,99
43	**60060**	2,34	0,39	16,67	82,04	2,99
44	**60052**	2,13	0,61	28,64	83,65	4,65
45	**60051/60052**	1,96	0,39	19,90	84,96	2,96
46	**60040/60051**	2,08	0,55	26,44	84,04	4,19
375	**60982**	6,79	3,31	48,75	47,89	22,60
376	**60982**	6,81	2,50	36,71	47,74	19,21
377	**60981**	6,96	2,33	33,48	46,58	17,91
378	**60340/60981**	7,91	2,96	37,42	39,29	21,66
379	**60340**	7,87	2,53	32,15	39,60	19,37
396	**60320**	3,19	0,60	18,81	75,52	4,60
431	**10891**	3,91	0,77	19,69	69,99	5,88
458	**60331**	7,37	1,79	24,29	43,44	13,77
459	**60332**	6,94	1,90	27,38	46,74	13,48
460	**60300**	6,18	1,70	27,51	52,57	13,08
Promedios		**4,61**	**1,38**	**29,93**	**64,58**	**29,93**

Los valores dados de IRI y PRI corresponden al promedio del tramo homogéneo. Debe prestarse atención especial a los altos valores de coeficiente de variación hallados, estos conllevan a pensar que dentro de la longitud del tramo homogéneo existe un alto grado de variabilidad de condiciones, y esto hace suponer que la definición de tramos homogéneo se puede, y se debe, afinar aún más.

Considérese los rangos de IRI empleados en otros países y las tablas usadas en Costa Rica para la evaluación a nivel de proyecto, ver sección 2.1.2. Respuesta funcional del pavimento. Basándose en estos valores se aprecia el pésimo estado de las estructuras estudiadas, véase por ejemplo la Tabla 33 correspondiente a estructuras de la zona 3-1 (provincia de Puntarenas), puede verse que el promedio de la zona es un IRI de 4.16m/km y que la estructura en mejores condiciones muestra un IRI de 2.41m/km mientras que la que se encuentra en las peores condiciones tiene 7.08m/km. Si se consideran los rangos utilizados por el LanammeUCR (ver Tabla 5) se concluye que la red se encuentra en condiciones de regularidad entre regular y muy deficiente. Esta situación es típica para Costa Rica, donde la red vial muestra un avanzado estado de deterioro.

Además del deterioro general de la red, la condición funcional exalta los problemas debido a que la estrategia de intervención más utilizada en Costa Rica, el bacheo, afecta negativa y considerablemente la rugosidad de los pavimentos.

Capitulo 6. Resultados

A continuación se exponen los resultados obtenidos en la presente investigación. Por conveniencia se realiza una separación en cuatro secciones, una primera que consiste en evaluar la aplicabilidad de los índices estructurales para definir la condición de las estructuras de pavimento presentes en Costa Rica, una segunda que se refiere al estudio de la aplicación del índice funcional a los tramos de la muestra, la tercera es la etapa de definición del índice compuesto PCI (por sus siglas en inglés *"Pavement Condition Index"*) y finalmente se llega a la cuarta etapa donde se realiza el análisis e interpretación de los resultados expuestos en las etapas anteriores.

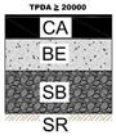
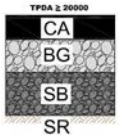
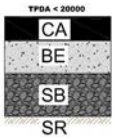
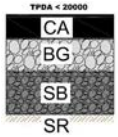
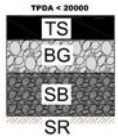
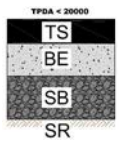
6.1. Índices estructurales

Se inicia con esta sección presentando los valores del porcentaje de varianza explicada (R^2) calculado para las diferentes relaciones estudiadas, Tabla 35. A partir de los modelos de regresión lineal generados se obtuvo, para las diferentes relaciones establecidas entre índices e indicadores directos de condición, el valor de R^2, el cual como ya se había mencionado se convierte en la principal herramienta para establecer el grado de correlación existente entre dos variables. En el análisis, se considera que un alto valor de R^2, cercano a la unidad, corresponde a un excelente nivel de correlación, mientras que si se obtiene un valor cercano a cero se considera que no existe correlación entre las variables. Otra manera de imaginarlo es considerando que valores de R^2 cercanos a cero llevan a concluir que las variaciones en el valor del índice no se ven reflejadas en cambios en la condición de la capa o capas que en teoría representa dado índice, con un cierto grado de confianza estadística.

Debido al carácter de la presente investigación y a las conclusiones a las que se pretende llegar, se consideró definir niveles intermedios de grado de correlación,

es decir, hablar de correlaciones pobres, medias, buenas o excelentes según un rango de valores de porcentaje de varianza explicada predefinido; pensando en esto, en la presente investigación se emplean los rangos la Tabla 8 (pág. 62) para decidir respecto a las correlaciones.

Tabla 35. Valores de R^2 para los índices AREA, SAI (I y II) y BCI1.

CLASIFICACIÓN	Indicador	Porcentaje de varianza explicada (R^2)			
		Número Estructural (SN)	Módulo elástico de la subrasante (M_{SR})	Deformación unitaria a tensión (ε_t)	Deformación unitaria a compresión (ε_c) ***
TIPO 1 	AREA	0,607		0,078*	
	SAI 1	0,607		0,078*	
	SAI 2	0,767		0,480*	
	BCI 1		0,978		0,994
TIPO 2 	AREA	0,028		0,292**	
	SAI 1	0,028		0,292**	
	SAI 2	0,019		0,279**	
	BCI 1		0,545		0,034
TIPO 3 	AREA	0,649		0,139*	
	SAI 1	0,693		0,095*	
	SAI 2	0,705		0,146*	
	BCI 1		0,502		0,429
TIPO 4 	AREA	0,357		0,358**	
	SAI 1	0,296		0,318**	
	SAI 2	0,406		0,434**	
	BCI 1		0,218		0,272
TIPO 5 	AREA	0,101			
	SAI 1	0,101			
	SAI 2	0,004			
	BCI 1		0,416		0,429
TIPO 6 	AREA	0,068		0,651*	
	SAI 1	0,068		0,651*	
	SAI 2	0,028		0,761*	
	BCI 1		0,717		0,919

*Deformación a tensión medida en la fibra extrema inferior de la capa de base estabilizada.
**Deformación a tensión medida en la fibra extrema inferior de la capa de carpeta asfáltica.
***Deformación a compresión medida en la fibra extrema superior de la subrasante.

Se observa una gran variabilidad en los resultados. Para una misma relación se observaran grandes diferencias en la calidad de las correlaciones de un tipo de pavimento a otro, por ejemplo viendo la relación entre el índice AREA y el parámetro Número Estructural, para los tipos 1 y 3 que corresponden a estructuras conformadas por carpeta asfáltica y base estabilizada con cemento para condiciones de volumen vehicular alto (TPDA >20 000) y moderado (≤20 000) respectivamente, se observa un nivel de correlación que se considera moderado tendiendo a una fuerte correlación, mientras que para las estructuras compuestas de carpeta asfáltica y base granular las correlaciones resultan de menor calidad. Observaciones similares pueden hacerse para las relaciones de los índices SAI (tanto la ecuación original o SAI 1, como el propuesto por Mrawira *et al*[49], SAI 2) con el número estructural.

Otra situación de interés ocurre con los tipos de estructura formados por tratamientos superficiales (***Tipo 5*** y ***Tipo 6***), en estos casos se muestra una correlación despreciable en los modelos generados para relacionar el Número Estructural con el Índice de Adecuación Estructural (SAI o SAI1), el Número Estructural con el índice de adecuación estructural que considera de forma directa el valor de la deflexión central, el SAI2, y el modelo que relaciona el Número Estructural con el índice AREA.

Las relaciones con las deformaciones a tensión no muestran buena correlación salvo para el caso de las estructuras ***Tipo 6*** (tratamiento superficial + base estabilizada) donde es posible observar una fuerte correlación entre las variables.

Finalmente, es de resaltar el nivel de correlación mostrado por las relaciones entre el índice de curvatura de la base o BCI y el módulo elástico de la subrasante (M_r). Salvo para el caso de la estructura ***Tipo 4*** (carpeta asfáltica + base granular, con moderado TPDA) los niveles de las correlaciones son considerados aceptables

[49] Mrawira, 2007

(de moderados a altos). Comportamientos similares mostraron los modelos generados para relacionar el Índice de Curvatura de la Base (BCI) con la deformación unitaria a compresión de la subrasante o ε_c.

Estos porcentajes de varianza explicada representan criterio suficiente para decidir acerca de la correlación entre variables en los casos en los que se maneje la información de una base datos extensa y confiable. Sin embargo, a consecuencias de las limitaciones que afectan la presente investigación, se decidió incluir un elemento más de decisión que ayudase a dar mayor validez a las conclusiones del proyecto.

Pensando en ello se propuso acompañar la información de porcentaje de varianza explicada con un ploteo de datos que permitiera establecer si en el comportamiento seguido por los puntos existe alguna tendencia definida. Sea lineal, logarítmica, exponencial, cuadrática, cúbica o cualquier otra; a nivel de esta investigación solo se requería observar un comportamiento lógico, con cierta tendencia, para aceptar la presencia de correlación entre las variables.

De acuerdo con esta idea en el Anexo E, pueden observarse las gráficas de las relaciones modeladas, que son las mismas que generaron los resultados expuestos en la Tabla 35. Estos resultados serán tema de fuerte discusión en el análisis posterior, principalmente por lo observado para el modelo que relaciona el índice de Adecuación Estructural (SAI 2) y el Número Estructural para las estructuras ***Tipo 2***, ***Tipo 5*** y ***Tipo 6*** (la primera estructuras con carpeta asfáltica y base granular para condiciones de alto volumen vehicular, y las otras dos para estructuras con tratamientos superficiales). En un principio resulta evidente el problema, la tendencia está invertida, es decir, según el comportamiento observado, valores altos de SAI corresponden a valores bajos de número estructural o lo que es lo mismo a estados de condición deteriorada, lo cual no concuerda con la definición establecida desde el principio.

Varias situaciones que forman parte de las limitaciones de la investigación son consideradas responsables de lo observado, situaciones como el inadecuado tamaño de la muestra y la pobre calidad de la información con que se trabaja influyen fuertemente en el comportamiento mostrado por los índices.

De estas, quizá la limitación de más peso es el restringido número de datos de muestra con los que contaba la base de datos que se empleó en el trabajo. Dentro de cada uno de los seis grupos de estudio se contó con menos de treinta datos (valor generalmente aceptado para considerar una muestra como representativa, se acepta este dato a falta de un cálculo formal del tamaño de muestra requerido) e incluso algunos estaban compuestos únicamente por 5 datos. Esta situación condiciona fuertemente las conclusiones que se puedan derivar del estudio estadístico, y especialmente de modelos de regresión.

A causa de lo anterior, se consideró emplear una serie de gráficos que muestren las mismas relaciones de la Tabla 35, pero considerando la totalidad de la muestra, es decir sin diferenciar entre estructuras de pavimento o niveles de tránsito. Los gráficos del 3 al 8 muestran estos resultados.

Gráfico 3. Relación SAI 1 vs. Número estructural

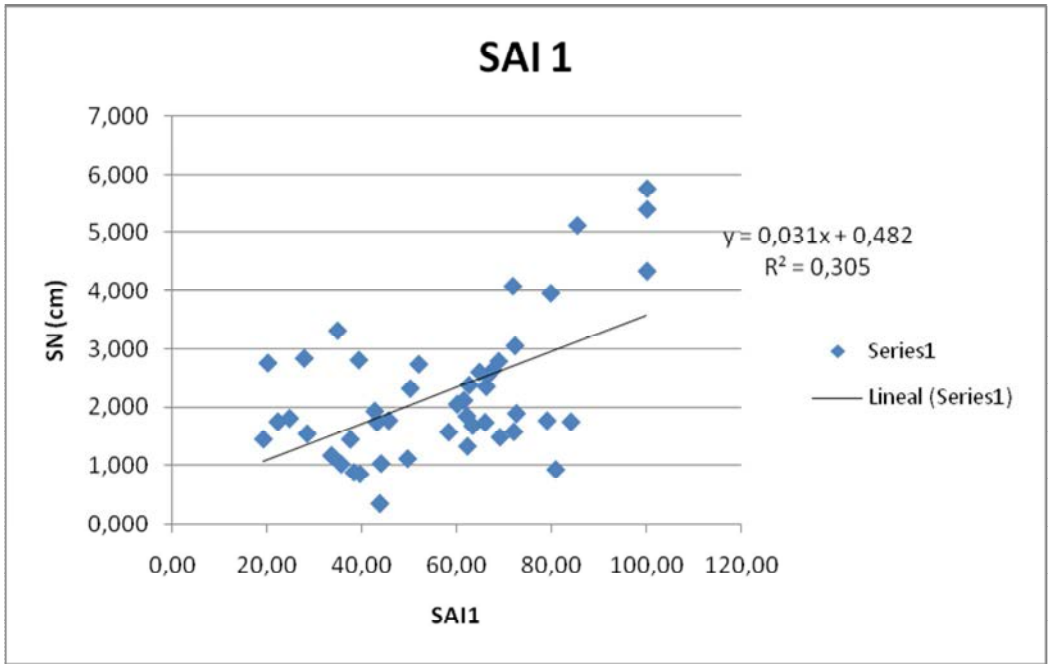


Gráfico 4. Relación SAI 2 vs. Número estructural

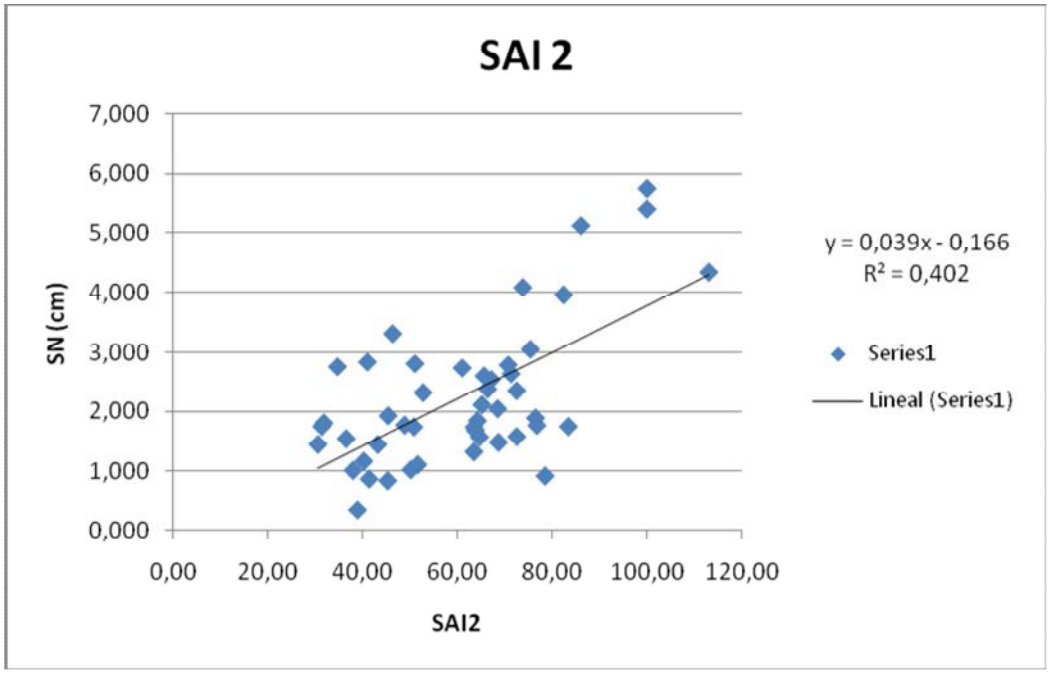


Gráfico 5. Relación SAI 1 vs. Deformación a tensión de la fibra extrema inferior de la capa de rodadura o base estabilizada, ε_t (criterio de fatiga).

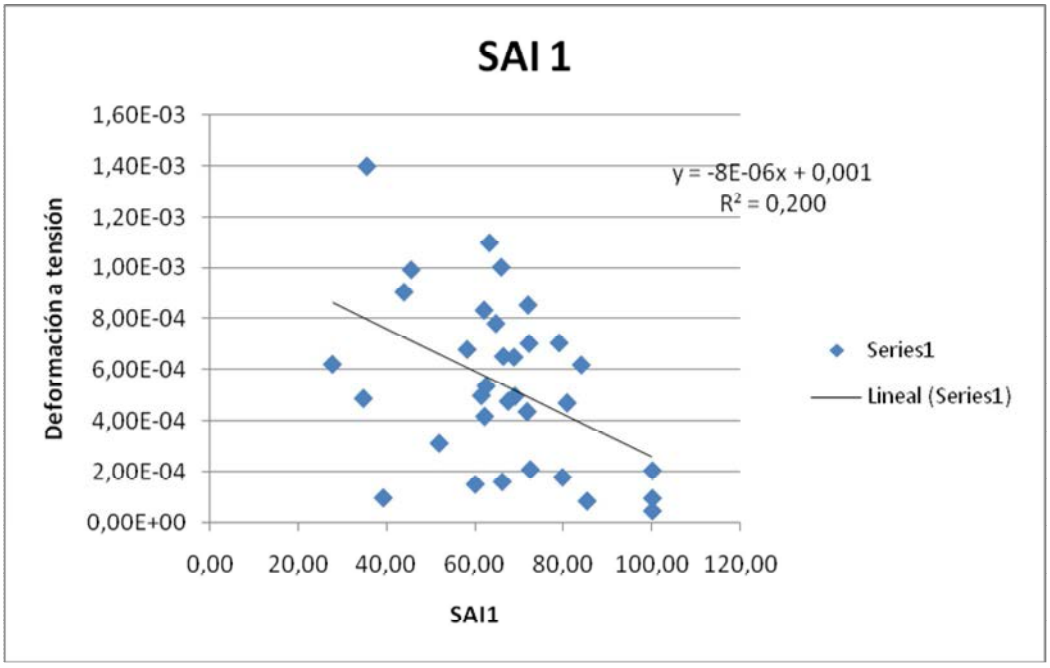


Gráfico 6. Relación SAI 2 vs. Deformación a tensión de la fibra extrema inferior de la capa de rodadura o base estabilizada, ε_t (criterio de fatiga).

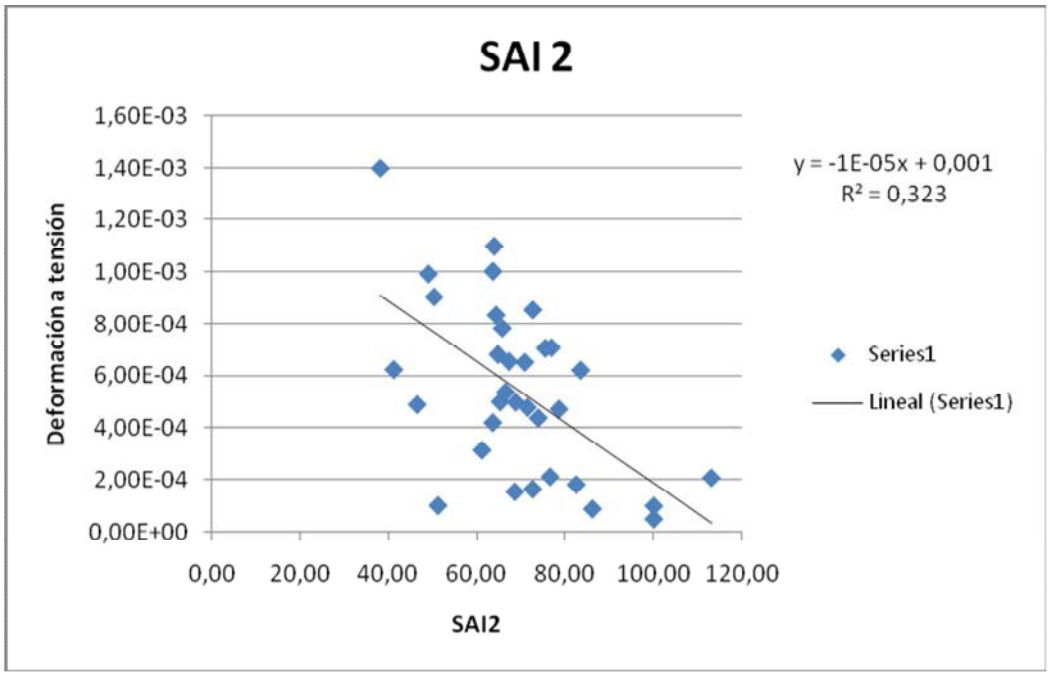


Gráfico 7. Relación BCI vs. Módulo de subrasante (psi)

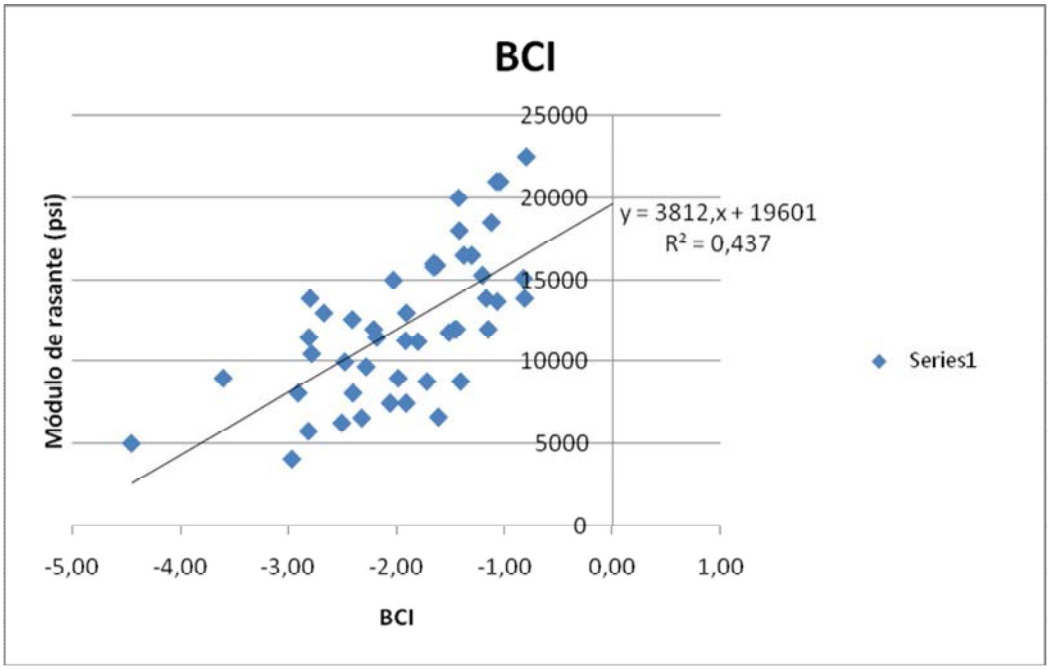
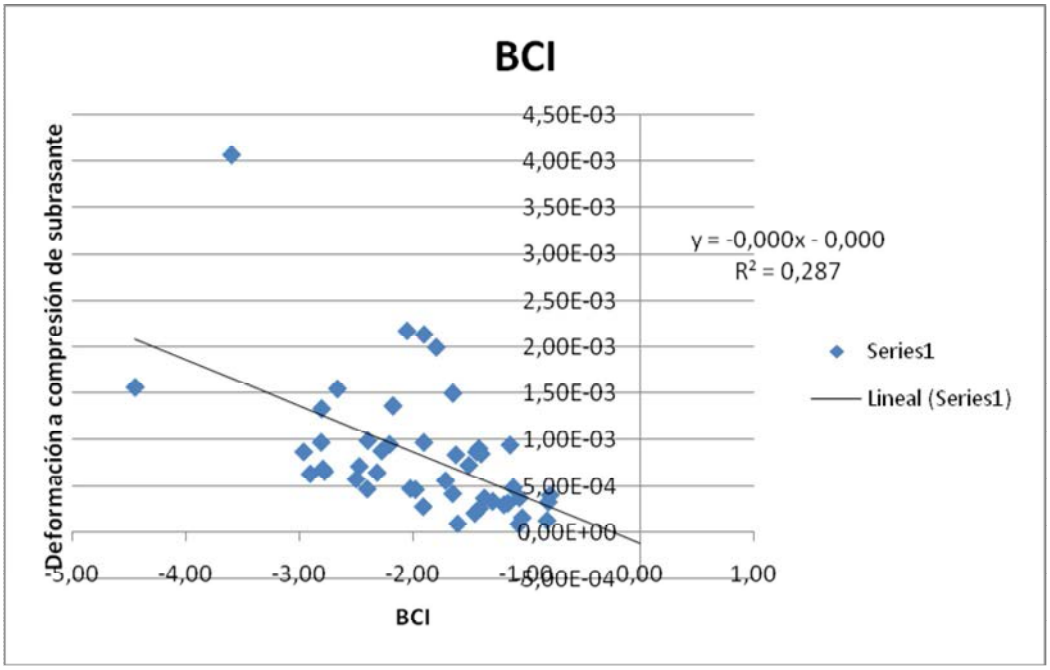


Gráfico 8. Relación BCI vs. Deformación a compresión de la fibra superior de la subrasante, ε_c (criterio de fatiga).



Pueden observarse en los gráficos anteriores que el comportamiento de los datos muestra lo que podría ser algún tipo de tendencia lógica. Sin embargo los porcentajes de varianza explicada siguen siendo bajos, llevando a la conclusión de que se tienen niveles de correlación de moderado a bajos.

Ante esta situación, un aspecto que retomó importancia al manejar la totalidad de la muestra de la base de datos, fue la posibilidad de probar diferentes tipos de ajuste para la tendencia de los datos, es decir diferentes modelos de regresión, con el fin de buscar porcentajes de varianza expliacada más altos. Los gráficos del 9 al 12 son resultado del esfuerzo realizado.

Gráfico 9. Relación SAI 1 vs. Número estructural. Ajuste polinómico.

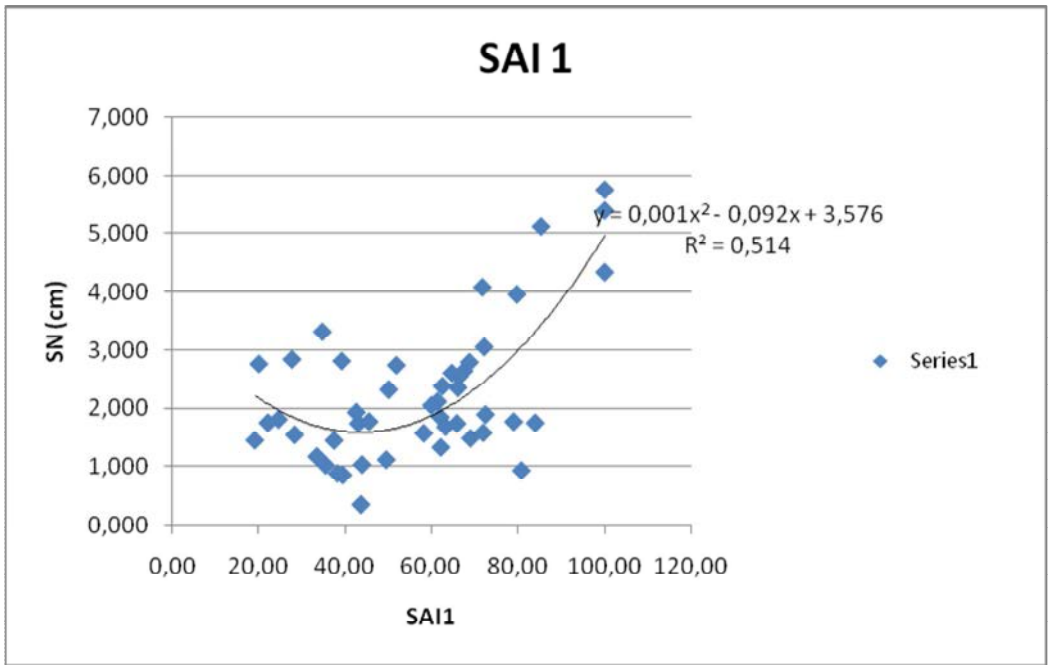


Gráfico 10. Relación SAI 2 vs. Número estructural. Ajuste polinómico.

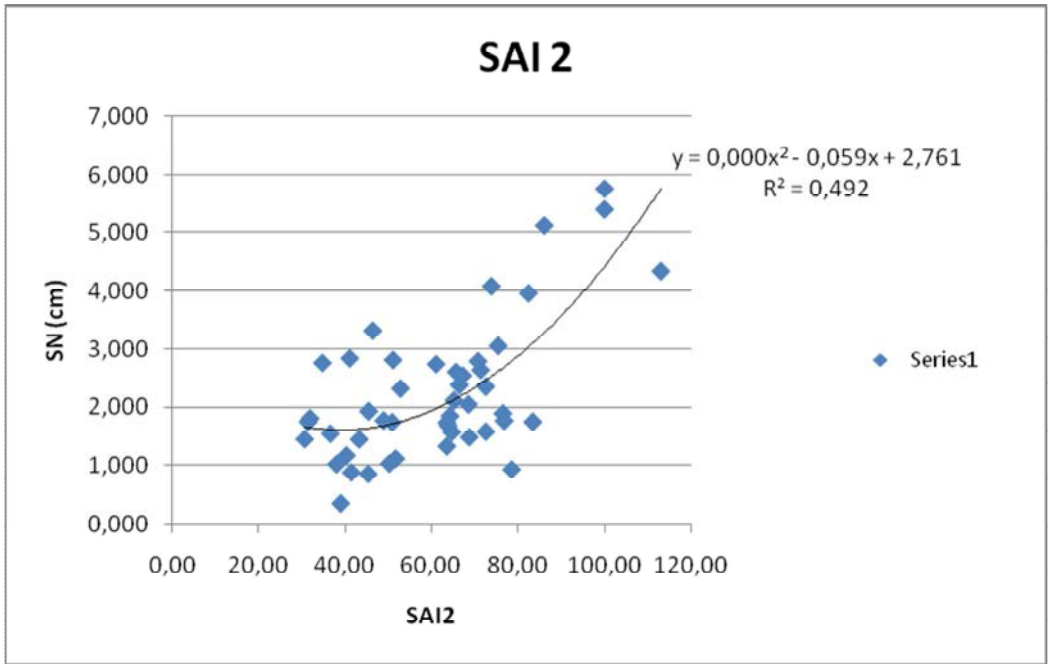


Gráfico 11. Relación SAI 1 vs. E_t (criterio de fatiga). Ajuste polinómico.

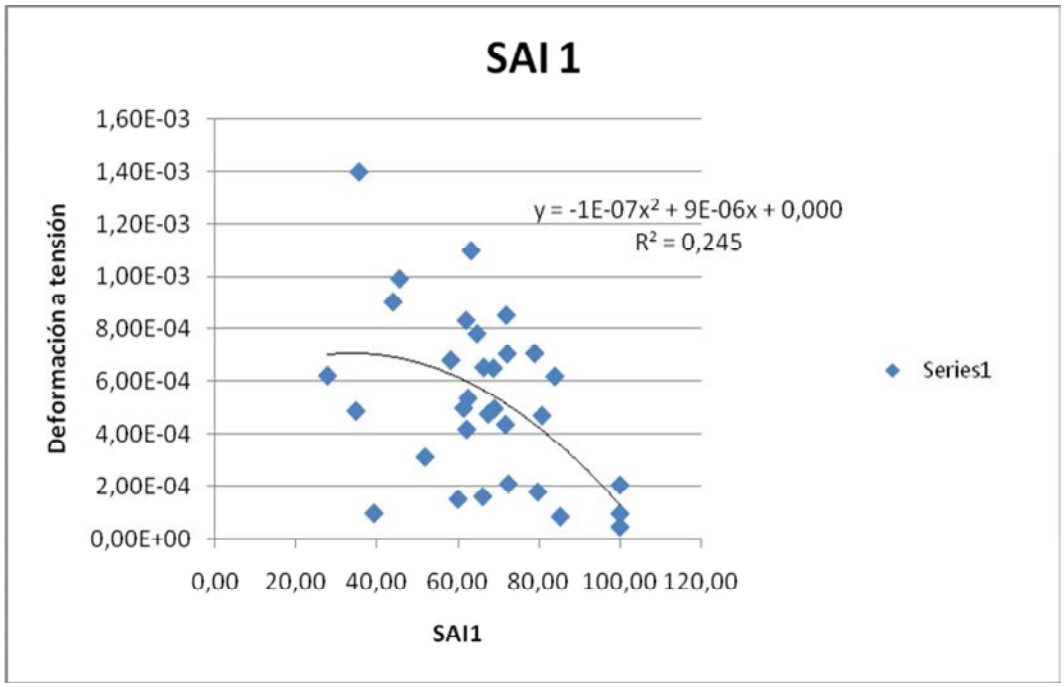
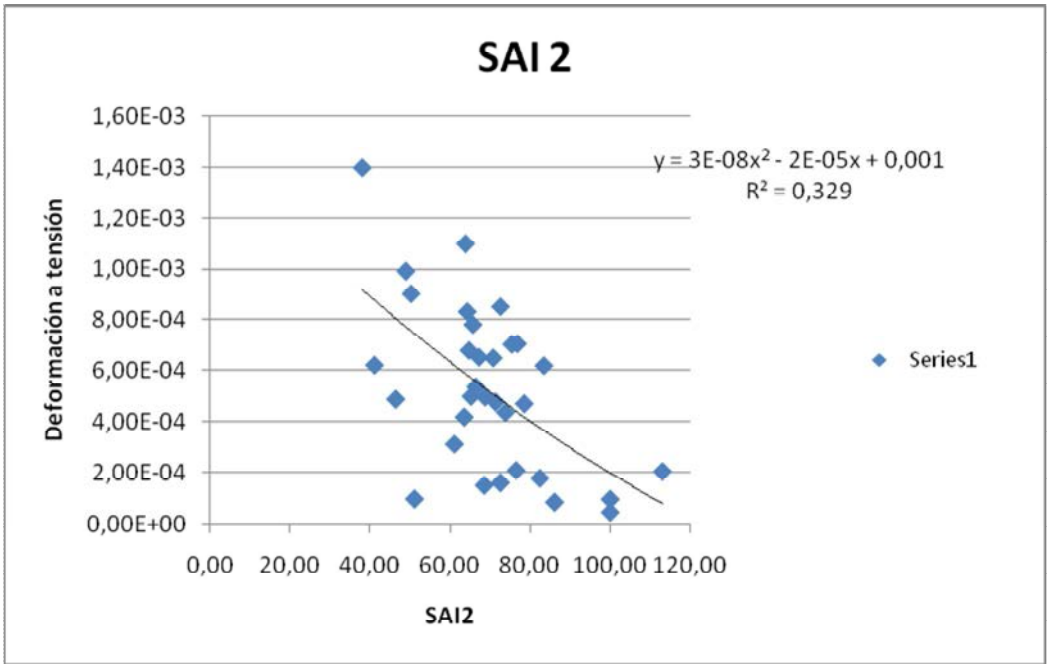


Gráfico 12. Relación SAI 2 vs. E_t (criterio de fatiga). Ajuste polinómico.



Como resultado de este trabajo no se obtuvieron mejoras significativas, y es que la muestra sigue siendo muy pequeña y la definición de la ecuación de regresión definitiva requiere de un análisis mas profundo, con mayor cantidad de información y de mejor calidad.

Además, existe un factor que no ha sido considerado dentro de los modelos hasta ahora propuestos; la subdivisión de los tramos en estudio por tipo de estructura se consideró una posible fuente directa de variación de la condición de los pavimentos, es decir, una variable más dentro del modelo que debería ser considerada.

Ante este supuesto se decide emplear una metodología para determinar el nivel de las correlaciones eliminando la variabilidad inducida por el tipo de estructura de pavimento. Lo que se buscó fue generar dos análisis: 1) Parámetros de regresión de los modelos de regresión múltiple, y 2) Alguna medición estadística que fundamentara la afirmación de que el tipo de estructura es una fuente de variación en los modelos generados para las relaciones propuestas.

El concepto de las ANOVA's o Análisis de Varianza fue el que llegó resolver el problema. Las Anovas o análisis de varianza, son una heramienta estadística que permite evaluar relaciones entre múltiples variables a la vez, incluyendo la posible interacción existente entre algunas de ellas[50].

Específicamente en este proyecto, se realizó un análisis de varianza o ANOVA de variable compleja, manejado como un diseño experimental de bloques aleatorizado. Lo que se buscó fue generar un modelo de regresión múltiple en el que se considerara la interacción existente entre variables mutuamente dependientes, donde una de las variables es de carácter cualitativo (un valor literal,una especie de restricción o bloqueo). A nivel conceptual, el modelo de regresión empleado se describe a continuación,

$$Y_{jk} = \mu + O_j + D_k + (OD)_{jk} + \varepsilon_{jk} \qquad \textbf{Ecuación 28}$$

Donde:

Y_{jk}: variable dependiente.

μ: constante del modelo.

O_j: variable independiente.

D_k: variable cualitativa.

OD_{jk}: interacción entre las variables.

E_{jk}: Error aleatorio.

Para esta investigación se hizo uso del programa de análisis estadístico JMP para realizar tanto la regresión como el análisis de varianza. Para describir el trabajo realizado considérese como ejemplo el modelo propuesto para la relación entre el SAI y el número estructural.

[50] Referencia 21.

En primera instancia se define tanto los factores que intervienen como el papel que juegan dentro del modelo. En la Tabla 36 se resume esta información,

Tabla 36. Información para análisis de varianza.

Característica del modelo	Factor
Variable dependiente	Número Estructural (SN)
Variable cuantitativa	Índice de Adecuación Estructural (SAI)
Variable cualitativa	Tipo de estructura
Niveles de los factores	Índice de Adecuación Estructural: 47 valores (tratamientos)
	Tipo de estructura: 6 tipos de estructura (bloques)

Con esta información se hace la modelación; el programa ofrece la posibilidad de generar como respuesta tres salidas. La primera corresponde a los parámetros del modelo de regresión generado, Tabla 37, de donde se extraen los valores de porcentaje de varianza explicada. Para el caso, el dato de interés sería el porcentaje de varianza ajustado, el cual considera posibles variaciones en la muestra.

Tabla 37. Sumario de resultados de la regresión múltiple

Parámetros de la regresión	Resultado
Porcentaje de varianza	0,5757
Porcentaje de varianza ajustado	0,442
Raíz cuadrada del promedio del error	896
Promedio de la estimación	2,24
Observaciones	47

Otra salida corresponde al análisis de varianza ejecutado para comprobar la significancia del modelo regresión. Se realiza entonces una prueba de hipótesis en la que se tiene como hipótesis nula que todas las constantes del modelo de regresión (B_i, que son las constantes que multiplican el valor de cada una de las

variables de la regresión) son iguales a cero y como hipótesis alternativa que al menos una de estas constantes de regresión es diferente de cero.

H_0: $B_1 = B_2 = B_i = 0$
H_1: Al menos un $B_i \neq 0$

Y el criterio de decisión establece que si el valor de F calculado por el modelo es menor al valor de F leido de tablas para un nivel de confianza del 99% entonces se acepta la hipótesis nula, con lo que se debería concluir que no existe relación entre las variables consideradas en el modelo.

Considerando lo anterior, los resultados para el caso que nos ocupa son,

Tabla 38. Prueba de hipótesis para medir la significancia del modelo.

Origen	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F
Modelo	2	38,15	3,47	4,32
Error	43	28,12	0,80	F_{tabla} = 0,004
Total	45	66,27		

En el ejemplo, el valor obtenido para $F_{calculado}$ es mayor al de tabla, lo que conlleva a rechazar la hipótesis nula. De esto se concluye que hay evidencia estadística, al 99% de confianza, de que el modelo de regresión es significativo y que al menos una de las variables del modelo afecta significativamente el valor de la variable de respuesta. Es decir, ya sea al SAI o el *Tipo de Estructura* influyen directamente sobre el valor del Número Estructural.

Finalmente, el tercer resultado que se puede extraer del programa está compuesto por la información necesaria para realizar la correspondiente prueba de hipótesis dirigida a comprobar la influencia que ejerce cada una de las variables sobre el valor de la variable respuesta. Es decir sería la manera de medir estadísticamente el grados de influencia que la variable de *Tipo de*

Estructura tiene sobre los resultados del modelo. La prueba de hipótesis que se debería plantear para cada variable es la siguiente:

H_0: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$
H_1: Al menos un promedio es diferente.

Donde:

H_0: es la hipótesis nula
H_1: hipótesis alternativa
μ_i: es el promedio de las observaciones para el i-ésimo tipo de estructura.

Sin embargo, el planteamiento de este análisis de varianza considera una metodología de análisis muy compleja debido a que la muestra de datos está conformada por lo que en estadística se llama bloques incompletos. Lo que ocurre es que no se tiene el mismo número de observaciones para cada tipo de estructura (bloque) y a consecuencia de esto se debe hacer uso de una metodología mucho más compleja que la empleada para un análisis de varianza simple, lo cual hace que quede fuera del alcance de la presente investigación.

A consecuencia de no haber podido demostrar estadísticamente el efecto de la variable *tipo de estructura*, solo se contó con los resultados del modelo de regresión. Afortunadamente, los parámetros de regresión si permitieron observar cambios en los niveles de las correlaciones, en la Tabla 39 se muestran los porcentajes de varianza explicada generados a partir de los modelos de regresión múltiple construidos,

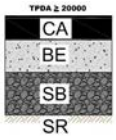
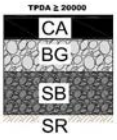
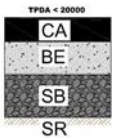
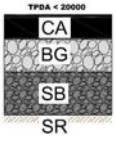
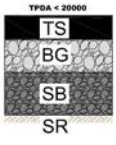
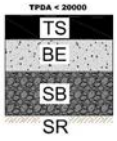
Tabla 39. Porcentajes de varianza explicada del Análisis de Varianza.

Indicador	Porcentaje de varianza explicada (R^2)				
	Número Estructural (SN)	Módulo Elástico de la carpeta asfáltica (M_{CA})	Módulo Elástico de la base (M_B)	Módulo Elástico de la subbase (M_{SB})	Módulo Elástico de la subrasante (M_{SR})
AREA	0,390				
SAI 1	0,384				
SAI 2	0,442				
BCI 1					0,633
AREA3			0,695	0,225	
AI1		0,482			
AI4					0,302
BDI			0,646		
SCI		0,459			

Los resultados en esta tabla muestran un cierto grado de mejoría en las correlaciones, quizá no fue lo que se esperaba pero si al menos se obtuvo una mejoría que es de utilidad para considerar la aplicabilidad de los índices.

Finalmente, se tabulan los porcentajes de varianza explicada de otras relaciones; estas incluyen algunos índices que podrían resultar de interés para los sistemas de administración de pavimentos. Los resultados del estudio de estas otras relaciones considerando la clasificación por tipo de estructuras se muestra a continuación.

Tabla 40. Valores de R^2 para otros índices de interés.

CLASIFICACIÓN	Indicador	Porcentaje de varianza explicada (R^2)			
		Módulo Elástico Carpeta (M_{CA})	Módulo Elástico Base (M_B)	Módulo Elástico Subbase (M_{SB})	Módulo Elástico Subrasante (M_{SR})
TIPO 1 	AREA3		0,004	0,719	
	AI1	0,177			
	AI4				0,394
	BDI		0,447	0,810	
	SCI	0,517			
TIPO 2 	AREA3		0,501	0,299	
	AI1	0,103			
	AI4				0,087
	BDI		0,168	0,071	
	SCI	0,000			
TIPO 3 	AREA3		0,742	0,034	
	AI1	0,689			
	AI4				0,007
	BDI		0,479	0,058	
	SCI	0,549			
TIPO 4 	AREA3		0,482	0,192	
	AI1	0,211			
	AI4				0,225
	BDI		0,437	0,371	
	SCI	0,312			
TIPO 5 	AREA3		0,021	0,002	
	AI1	-			
	AI4				0,462
	BDI		0,444	0,324	
	SCI	-			
TIPO 6 	AREA3		0,692	0,508	
	AI1	-			
	AI4				0,245
	BDI		0,675	0,307	
	SCI	-			

Se resaltan acá los índices que relacionan la condición de la capa de rodadura (carpeta asfáltica), pues las intervenciones a esta capa son la más comunes en Costa Rica y sería importante evaluar el grado de mejora obtenido. Como

ejemplo se tiene el Índice de Curvatura de la Superficie (SCI por sus siglas en inglés “Surface Curvature Index”), el cual muestra niveles de correlación de moderado a bajo (salvo para el caso de estructuras de carpeta asfáltica + base granular con TPDA alto) que para efectos de lo que pretende la investigación son valores aceptables.

Respecto a los demás índices, estos muestran el mismo comportamiento observado para los demás índices, es decir, muestran buena o moderada correlación para algunas estructuras y niveles de correlación despreciable para otras. De los mostrados en la Tabla 40, resalta el Índice de Daño de la Base (BDI por sus siglas en inglés “Base Damage Index”) que muestra un buen comportamiento para describir la condición de la capa de base, sin importar si es granular o estabilizada.

6.2 Evaluación de la condición funcional de los pavimentos

La metodología empleada en Costa Rica para evaluar la condición funcional de los pavimentos se basa en el uso de mediciones de la rugosidad superficial. Con estas mediciones se calcula el Índice de Rugosidad Internacional, o IRI. A partir de estas mediciones de IRI se define el PRI (por sus siglas en inglés *“Pavement Roughness Index”*) que es uno de los índices que forman parte del índice compuesto, PCI.

Al trabajar con los datos de IRI resultan evidentes las ventajas que ofrece sobre las metodologías de evaluación basadas en índices de condición estructurales. En resumen, estas ventajas son:

1. El perfilómetro láser empleado para hacer las mediciones de IRI muestra un alto rendimiento. Al medir rugosidades a 80km/h permite abarcar gran cantidad de vías en poco tiempo; contrario a lo que ocurre con los

instrumentos utilizados para medir deflexiones los cuales ocupan tiempo para ser instalados y solo permiten ensayar unas pocas estructuras diarias.

2. Los resultados son más confiables. El valor de IRI se ve poco afectado por factores externos (como lo son la temperatura y la carga aplicada para las mediciones de deflectometría). Únicamente se debe cuidar: la calibración del equipo y la velocidad de medición.

No se pretendía en un principio obtener resultados directamente relacionados con el índice funcional, solo se pensaba en emplearlo para la formulación del índice compuesto PCI; sin embargo, durante el proceso de manipulación de la información se hizo notoria una situación que se presenta con frecuencia y que podría ser fuente de errores cuando se trabaja con mediciones de IRI.

El asunto hace referencia a los "valores influenciales" (ver sección *3.3. Índice funcional*). El asunto con este tipo de datos es que se pueden presentar dos condiciones diferentes:

- Unos casos en los que se tienen datos que no siguen la tendencia del promedio pero que son mediciones reales obtenidas
- Un segundo caso en el que además de no seguir la tendencia del promedio, el valor de IRI puede ser considerado una medición errónea y por tanto se debe eliminar de la muestra de trabajo.

Con los siguientes gráficos se busca demostrar lo anterior, el Gráfico 13 representa el primer caso expuesto mientras que el Gráfico 14 hace referencia a la segunda condición citada.

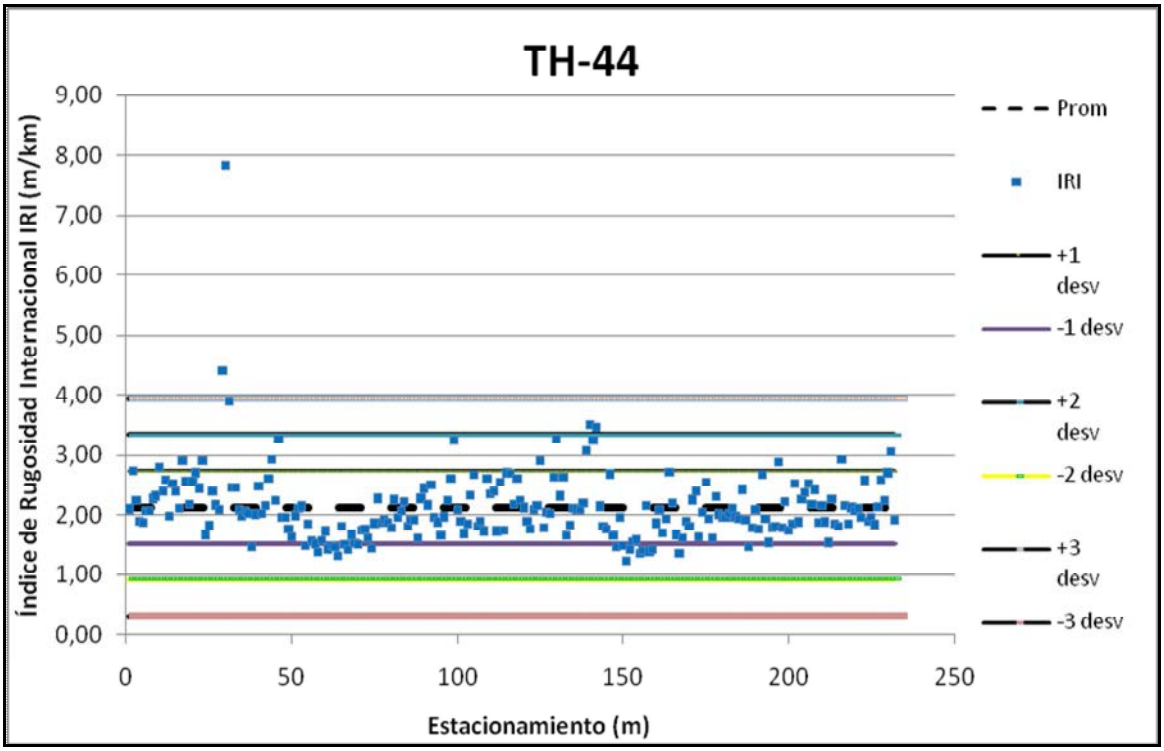


Gráfico 13. Comportamiento del IRI vs desviación estándar de la muestra. TH 44

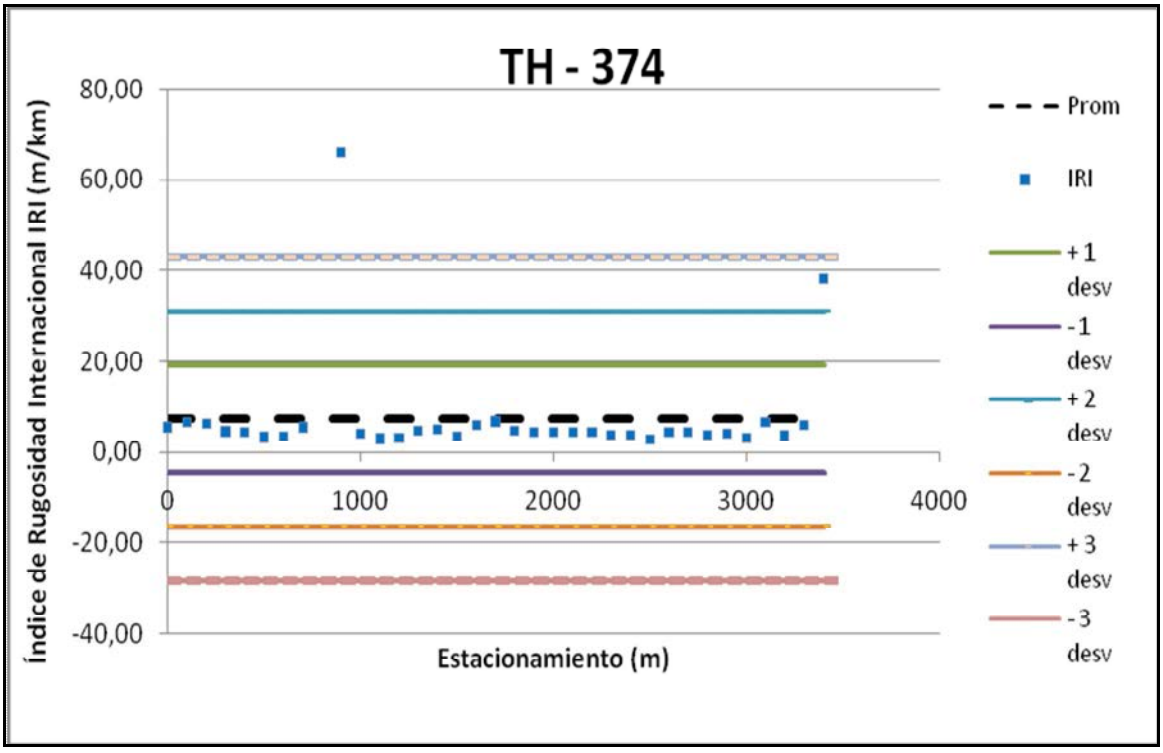


Gráfico 14. Comportamiento del IRI vs desviación estándar de la muestra. TH 374

En estos gráficos las líneas paralelas al eje de las abscisas son las líneas de control, calculadas tal y como lo hacen las agencias encargadas de llevar registros de control de calidad. El cálculo de estas líneas es algo sencillo, se trata de establecer límites inferior y superior calculados sumando y restando al promedio 1, 2 y 3 veces el valor de la desviación estándar de la misma muestra. Esta metodología de cálculo se encuentra normada y la intención de usarlas en esta investigación es porque permiten localizar, fácilmente y con cierto criterio, los valores influenciales.

Se debe aclarar que la definición de un punto de una muestra de datos como valor influencial es algo relativamente subjetivo, y por eso se trató de dar algún respaldo técnico para, primero reconocer la existencia de valores influenciales y luego decidir respecto a ellos.

El primer punto se subsanó con lo mencionado anteriormente sobre líneas de control. Mientras que para decidir respecto a si se eliminan o no de la muestra lo que se propone es usar el valor de límite de confianza obtenido del estudio estadístico realizado para la determinación de los valores máximo y mínimo de IRI, ver Tabla 14 (pág. 76). Para Costa Rica este valor es de 13,03m/km resulta un valor lógico y corresponde a pavimentos en un avanzado estado de deterioro, semejante a estructuras sin asfaltar y en donde las velocidades a las que se puede transitar son muy bajas. Este valor resulta cercano a valores propuestos por el Banco Mundial para caminos con las características mencionadas, ver Figura 12, y concuerda con los valores más altos obtenidos en los ensayos de evaluación realizados para la elaboración del Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada 2006 (LanammeUCR, 2006).

6.3 Formulación del Índice Compuesto

Para empezar esta sección se debe recordar la ecuación propuesta para calcular el índice compuesto PCI,

$$PCI = k_1 SAI + k_2 PRI$$

Ecuación 1

El problema de definir los pesos k_i según la ecuación 1, se resolvió mediante la propuesta de emplear un análisis de sensibilidad de inversiones donde el costo de recuperación de la red sería el criterio de decisión.

Para ello se desarrolló un programa de planificación estratégica para la zona de conservación del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) zona 1-9; se hizo uso del programa de optimización lineal *Woodstock* de *Remsoft* Inc. Y el código programado para el proyecto de graduación "Plan de Inversiones a Nivel Estratégico para la Zona 1-9 de Conservación Vial de CONAVI" (Madrigal, 2008). La zona 1-9 corresponde a la red vial de la provincia de Heredia y en el estudio se trabajó con 187.5 km de la red, los cuales presentaban condiciones de deterioro bastante avanzado, donde la mayoría de las vías mostraban deflexiones altas o muy altas y las mediciones de regularidad se encuentran entre regulares y malas.

La metodología empleada para desarrollar este análisis de sensibilidad se puede observar en la siguiente figura.

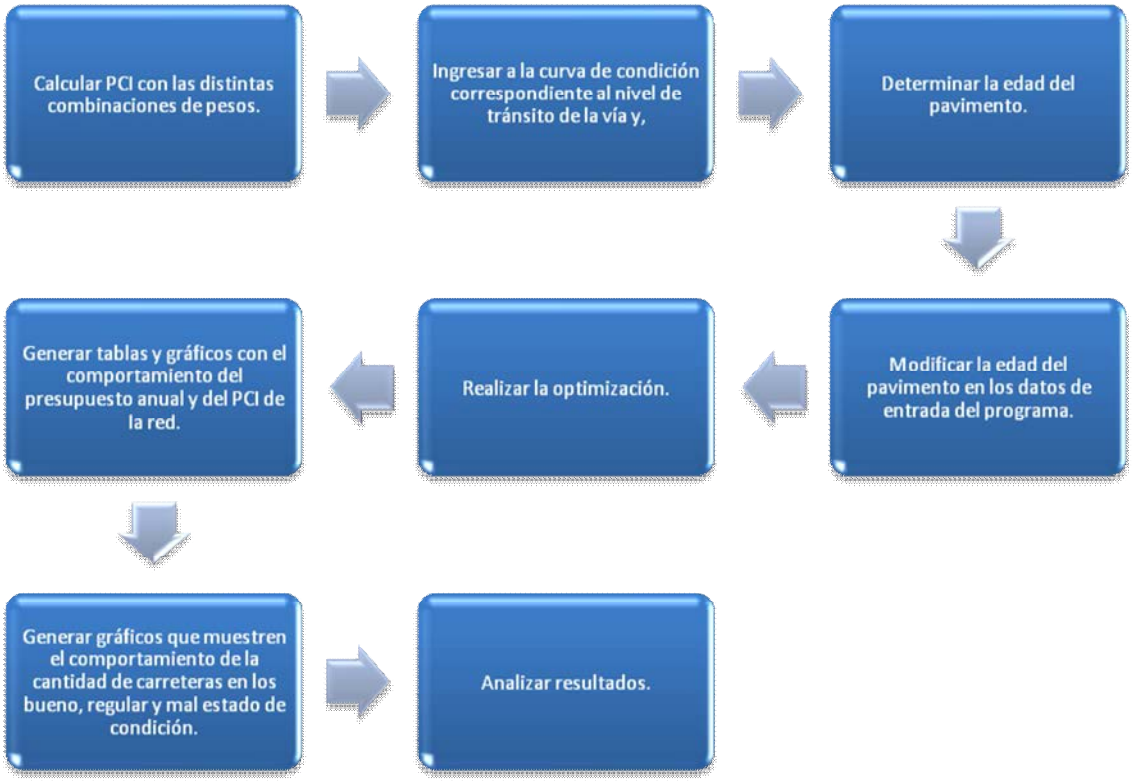


Figura 21. Secuencia seguida en el proceso de elección de los pesos k_i del Índice de Condición del Pavimento, PCI.

La totalidad de los resultados obtenidos se presentan a manera de gráficos y tablas resumen en la sección 9.6. ANEXO F. Resumen de la planificación estratégica para la zona de conservación del CONAVI 1-9 (Heredia). Resultados del software Woodstock de Remsoft Inc.

A continuación se muestran dos gráficos con los resultados para la totalidad de la red, uno referente a los costos de inversión anual y otro con el PCI medido anualmente para toda la red.

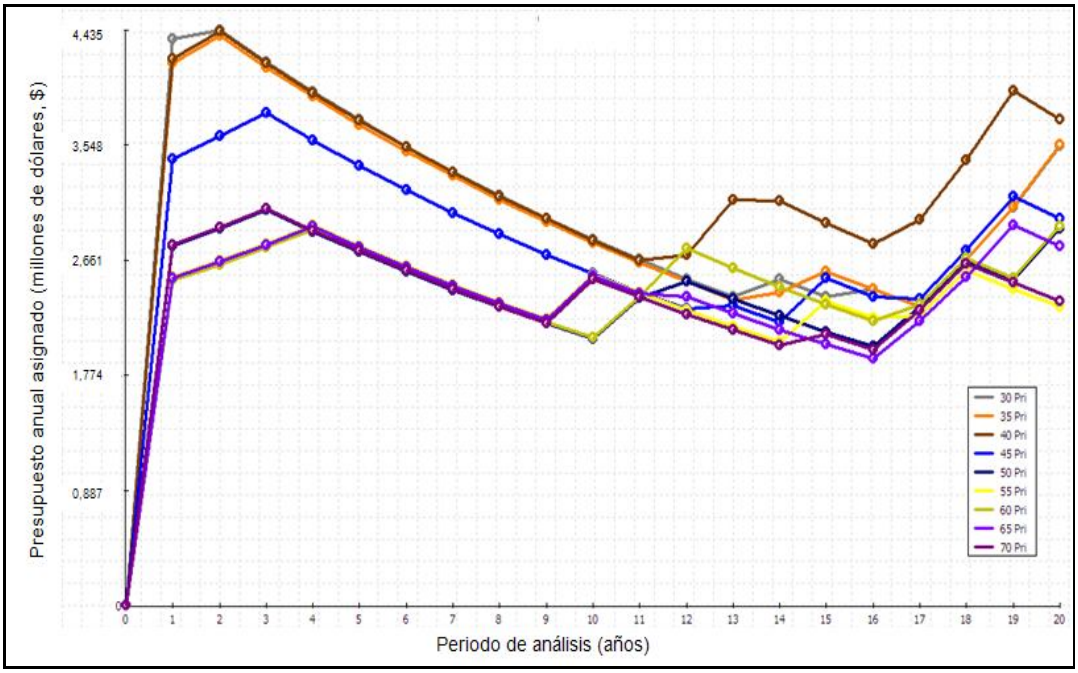


Figura 22. Comportamiento de la inversión anual durante el periodo de 20 años para los diferentes escenarios

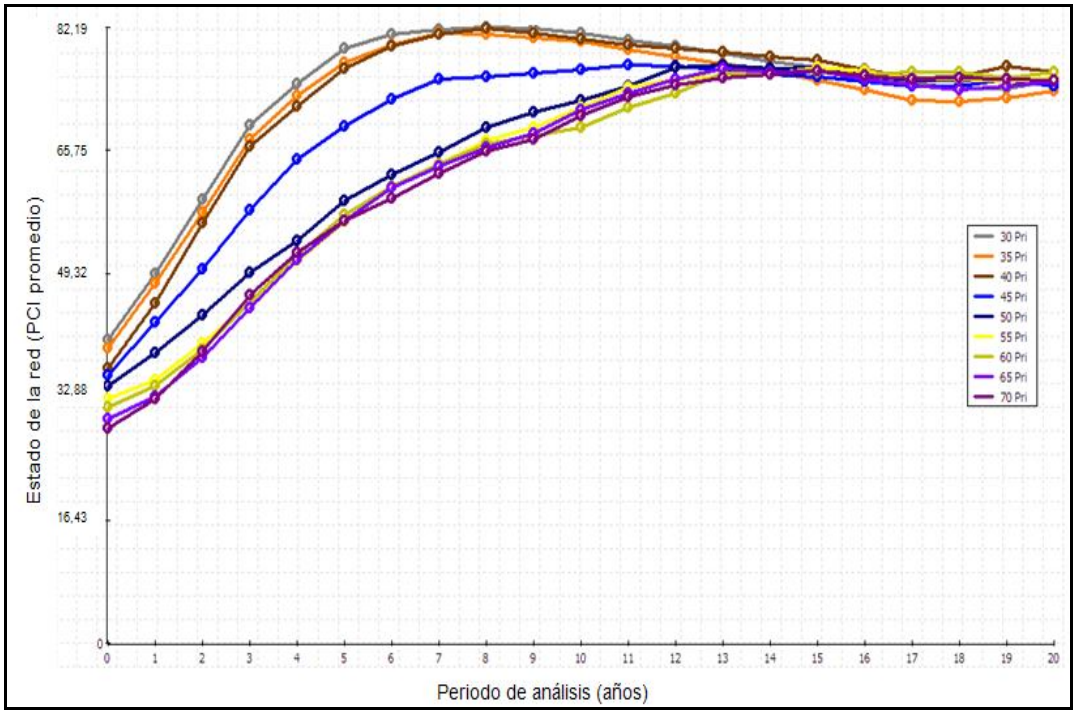


Figura 23. Comportamiento del PCI promedio de la red para los diferentes escenarios.

Se muestra además la siguiente tabla en donde se resumen los resultados tanto de costos de inversión (medidos mediante el valor actual neto) como de condición de la red, ambos criterios estudiados en momentos de interés para el análisis.

Tabla 41. Comparación de las diferentes propuestas.

K_{PRI} / Periodo	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
Inversión a 20 años (millones)	$ 30,4	$ 30,0	$ 31,4	$ 27,1	$ 22,7	$ 22,2	$ 22,4	$ 22,2	$ 22,6
Inversión a 12 años (millones)	$ 25,6	$ 25,3	$ 25,5	$ 22,4	$ 18,4	$ 18,1	$ 17,8	$ 18,0	$ 18,6
PCI promedio a 20 años ($x10^6$)	75.11	73.68	76.18	74.34	74.97	75.36	76.17	75.03	75.13
PCI promedio a 12 años ($x10^6$)	79.74	78.25	79.41	77.07	76.80	75.20	73.44	75.25	74.50

Se explicará un poco esta tabla. En la fila superior se muestran los distintos valores de peso asignado al índice PRI, k_{PRI}, el peso del índice SAI se calculará considerando que la suma de los pesos debe ser igual a uno. Los datos de inversión corresponden al valor actual neto (VAN) para los presupuestos anuales asignados hasta la fecha de corte (20 y 12 años). Este VAN es calculado suponiendo una tasa de interés constante durante todo el periodo de inversión de 9.5%. Este dato se supuso ante la ausencia de un estudio formal para definir la tasa de interés para el programa de inversiones (que no tenía lugar dentro de los alcances del proyecto), y ese 9.5% corresponde a la tasa básica pasiva de la banca estatal.

Por otro lado, se muestran los valores del PCI promedio de toda la red en estudio para el año en cuestión. Se presentan los valores a 12 años porque es en este año cuando se observaron condiciones específicas de interés en el análisis. En este año se alcanzó lo que puede considerarse el nivel de recuperación de la red óptimo, a partir de este año el PCI varía poco.

Considerando tanto los gráficos de la Figura 22 y la Figura 23 así, como la información de la Tabla 41, se emplearán dos criterios de decisión:

- El costo de la inversión (medido mediante el VAN) y el comportamiento de la gráfica de presupuesto anual asignado, y,
- La condición general de la red (valorado mediante PCI promedio de toda la red).

Considerando esto se observa que existe un comportamiento marcadamente diferenciado de dos grupos de combinaciones, en un primer grupo se muestran las combinaciones en las que se da mayor peso al índice estructural SAI, estas son las que suponen k_{SAI} = 0.7, k_{SAI} = 0.65, k_{SAI} = 0.6, k_{SAI} = 0.55; cuyos resultados muestran mejor condición final de la red desde los primeros años hasta el final del periodo de análisis, pero a mayores costos que las combinaciones del grupo 2 conformado por las propuestas que suponen igual peso para ambos índices o mayor peso para el índice funcional PRI.

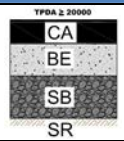
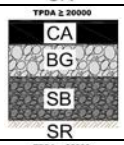
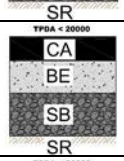
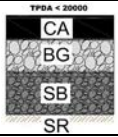
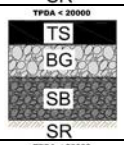
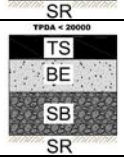
6.4 Análisis e Interpretación de Resultados

6.4.1 Aplicabilidad de índices estructurales

Los resultados expuestos en las secciones predecesoras sirven para llegar a conclusiones respecto a la aplicabilidad de los índices de condición estructurales. La diversidad de situaciones encontradas era esperada con anticipación, y son producto de las diferencias que conllevaron a generar los grupos de trabajo con características homogéneas de estructura de pavimento y nivel de tránsito.

A nivel individual los resultados para el Índice de Adecuación Estructural (SAI 2) y el índice de Curvatura de la Base (BCI) se pueden resumir en la siguiente tabla,

Tabla 42. Resumen del estado de las correlaciones, para los tipos específicos.

CLASIFICACIÓN	Caracterización	Indicador	Conclusión			
			SN	M_{SR}	ε_t	ε_c
TIPO 1		SAI 2	Alta		Moderada	
		BCI 1		Muy Alta		Muy Alta
TIPO 2		SAI 2	Despreciable		Baja	
		BCI 1		Moderada		Despreciable
TIPO 3		SAI 2	Alta		Despreciable	
		BCI 1		Moderada		Moderada
TIPO 4		SAI 2	Moderada		Moderada	
		BCI 1		Baja		Baja
TIPO 5		SAI 2	Despreciable		---	
		BCI 1		Moderada		Moderada
TIPO 6		SAI 2	Despreciable		Alta	
		BCI 1		Alta		Muy Alta

En general, el nivel de correlación mostrado por el índice SAI 2 mediante el valor del porcentaje de varianza explicada es concordante con la tendencia mostrada por los datos cuando estos son graficados. En los casos en los que se obtuvo como resultado una mala correlación, la línea de ajuste de los datos mostró una pendiente inversa a la que debería presentarse (la correcta es a mayor SAI 2, mayor número estructural y menor deformación unitaria) y esto se considera como un comportamiento incorrecto. Dos excepciones específicas merecen atención especial.

La primera es el caso de la modelación de la relación entre el Índice de Adecuación Estructural (SAI 2) y la deformación unitaria a tensión para el ***Tipo 3*** (TPDA <20 000, carpeta asfáltica + base estabilizada). En este caso el porcentaje

de varianza resultó ser muy bajo, a pesar de que la dispersión mostrada por los datos sigue una tendencia correcta.

La otra es el caso de las relaciones establecidas para estructuras con tratamiento superficial y base estabilizada. En este caso al modelar las relaciones entre el Índice de Adecuación Estructural (SAI 2) con el número estructural se obtuvo un pésimo nivel de correlación (reforzado con una tendencia de los datos incorrecta). Sin embargo, al emplear el criterio de fatiga (deformación a tensión de la fibra extrema de la base estabilizada) se logró corregir la situación y se mejoró la correlación.

La conclusión de esto, un poco lógica quizá, es que el índice es aplicable en algunas estructuras y se debe desechar su uso en otras. Sin embargo, antes de decidir se deben considerar aspectos limitantes que pueden ser causantes de distorsiones en los modelos de regresión. Como se pueden mencionar:

1. Pequeño tamaño de la muestra.
2. Poca variabilidad de estados de condición de las estructuras. Al respecto, se debe notar que las observaciones se ubican dentro de un rango de valores que es relativamente estrecho, por ejemplo, el valor de SAI 2 oscila entre 30 y 50 para estructuras del ***tipo 5***, y entre 50 y 78 para las estructuras del ***tipo 6***. Tener valores dentro de un margen tan pequeño puede ser una limitante para definir adecuadamente los modelos de regresión, más aún considerando la calidad de los datos.
3. Mal estado de las capas de base. Las cuales tienen bastante peso en el valor del número estructural pues los espesores de las capas de base que se presentan son por lo general altos. A esto se le suma que el valor de módulo que se obtiene del retrocálculo es poco exacto puesto que la modelación del comportamiento real no-lineal de los materiales granulares mediante la suposición de comportamiento lineal, provoca que las curvas de deflexiones sean difíciles de ajustar a la altura de las deflexiones

intermedias (que representan a las capas de base). Otro aspecto relacionado con la condición de las capas de base es el problema observado que involucra la determinación de los coeficientes estructurales para bases estabilizadas con módulos muy bajos (bases en mal estado).

Apegado a esto, las conclusiones a las que se llega en esta investigación deben ser tomadas con suma precaución, y más bien sus resultados buscan dar pie a la realización de una investigación a mayor escala que considere una inversión en la construcción de una mejor base de datos con mayor cantidad de muestras, caracterización de materiales definición de espesores y mediciones de tránsito más precisas.

Por otro lado, los resultados del índice de curvatura de la base (BCI), muestran tendencias aceptables, y los porcentajes de varianza explicada muestran igualmente niveles de correlación bastante buenos. Sin embargo, se aprecia una excepción para las estructuras con carpeta asfáltica y base granular para condiciones de tránsito moderado-bajo, donde el porcentaje de varianza explicada resulta demasiado bajo (R^2 = 0.217); posiblemente la presencia de un par de tramos con suelo de subrasante bastante deficiente sumado a la presencia de un tramo de carretera que presentaba una capa de suelo muy competente (módulo elástico de 144.8 MPa (21000 psi), que como ya se había mencionado antes es un resultado dudoso) pueden ser causantes de una interferencia importante que influya en el modelo de regresión elaborado.

Se destacan además los resultados de las relaciones que consideran el criterio de fatiga (deformación a compresión de la fibra extrema superior de la subrasante). Puede observarse que para las estructuras compuestas por bases granulares no se apreciaron mejorías en los valores de porcentaje de varianza explicada, de hecho el nivel de la correlación es bajo o deficiente; situación opuesta a lo que ocurrió con las estructuras que se conforman de una base estabilizada, en estos casos el nivel de la correlación se mantuvo o mejoró substancialmente, las causas

de esto pueden tener su origen en el hecho de que la metodología de cálculo de las deformaciones si considera el aporte positivo de la estabilización de la base a la capacidad de la estructura, a diferencia de la metodología de cálculo del número estructural. La deformación a compresión de la fibra extrema de la subrasante es por tanto, para estructuras de este tipo, un mejor criterio de decisión.

Respecto a los demás índices, el $AREA_3$, al AI 2, el AI 4, el BDI y el SCI, se tiene que estos pueden ser aplicables a algunas estructuras y en otras no, bajo condiciones específicas de tránsito. El origen de esta variabilidad está condicionado a las deficiencias de la muestra de datos.

Recordando el trabajo realizado con la totalidad de la muestra, sin considerar la subdivisión en grupos de estructuras, se presenta la Tabla 43. Esta muestra las conclusiones hechas al considerar tanto los porcentajes de varianza explicada como la tendencia mostrada al graficar las mediciones. Los niveles de correlación son moderados o bajos, y mejoran cuando se analiza la relación mediante el análisis de varianza y la regresión múltiple (resultados expuestos líneas arriba, Tabla 39). Estos resultados se pueden considerar para decidir acerca de la aplicabilidad de los índices, pero son los resultados discriminados por tipo de estructura los que relacionan las variables de manera más similar a la realidad.

Tabla 43. Resumen del estado de las correlaciones, para la condición general.

	Análisis de Regresión lineal		Análisis de Varianza (ANOVA)	
Relación	**Porcentaje de varianza explicada**	**Condición de la correlación**	**Porcentaje de varianza explicada**	**Condición de la correlación**
SAI 2 vs Número Estructural	0,402	Moderada	0,442	Moderada
SAI 2 vs Deformación de la fibra extrema a tensión	0,323	Baja	-	-
BCI vs Módulo de Subrasante	0,437	Moderada	0,633	Moderada
BCI vs Deformación de la fibra extrema compresión	0,287	Baja	-	-

Las relaciones que consideran deformaciones no se consideraron en el análisis de varianza por decisión del investigador.

6.4.2 Índice funcional

Vale la pena comentar acá las situaciones específicas que se pueden presentar con los valores influenciales.

Para explicar la importancia del manejo adecuado de los valores influenciales, debe introducirse un poco acerca de la metodología empleada en un sistema de administración de pavimentos para asignar las medidas de intervención según la condición de las estructuras. Los sistemas de administración utilizan lo que se conoce como ventanas de operación que son rangos de valores del indicador de condición dentro de los cuales se aplica un tipo de tratamiento específico a la estructura, ya sea sello de protección, sello de juntas, sobrecapa, sobrecapa estructural, reconstrucción, etc., ver Figura 24.

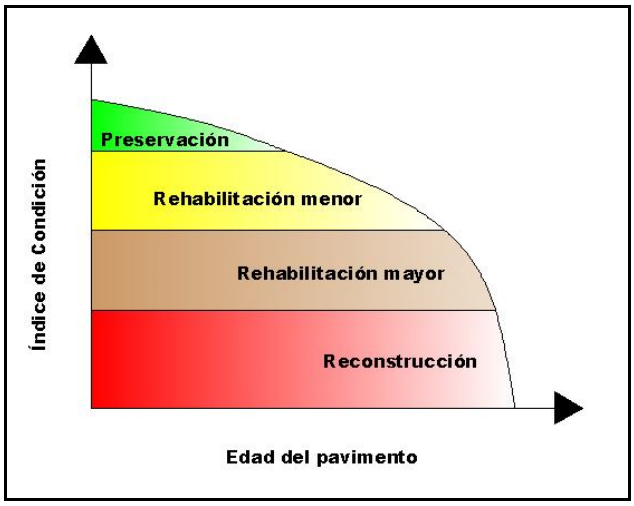


Figura 24[51]. Ventanas de operación.

[51] Madrigal, 2008.

Considérese ahora el caso específico en el que uno de los tramos homogéneos analizados dé un valor de índice de condición muy cercano al límite entre las ventanas de rehabilitación menor y preservación, en este caso la presencia de un valor influencial puede hacer la diferencia entre asignar un tratamiento u otro. Cuando se piensa en términos de costos esta situación puede significar un ahorro importante. Por esto es relevante poder decidir con criterio cuando un valor influencial debe desecharse del análisis, para no incurrir en asignaciones de tratamientos erróneos.

6.4.3 Formulación del índice compuesto, PCI

Los resultados obtenidos de esta etapa del proyecto son sumamente interesantes. El comportamiento de la condición de la red, medida mediante la sumatoria del PCI de toda la red, así como el comportamiento de los costos de inversión año a año del programa de planificación generado, demostraron claras diferencias para dos grupos de las propuestas de peso establecidas. Recordando:

- Grupo 1: $k_{SAI} = 0.7$, $k_{SAI} = 0.65$, $k_{SAI} = 0.6$, $k_{SAI} = 0.55$.
- Grupo 2: $k_{SAI} = 0.5$, $k_{SAI} = 0.45$, $k_{SAI} = 0.4$, $k_{SAI} = 0.35$, $k_{SAI} = 0.3$.

Se observó que al dar mayor peso al índice estructural se logra, en los primeros años, una mayor mejoría en la condición de toda la red y en general un mayor aumento en la cantidad de kilómetros de carreteras en muy bueno y buen estado; pero a un mayor costo de inversión, de hecho a un muy elevado costo de inversión, tan elevado que no puede considerarse factible para un plan de inversiones en Costa Rica; sin embargo, la razón de este elevado costo de inversión del primer año tiene, posiblemente, su causa en el hecho de que la red estudiada estaba sumamente deteriorada, con un PCI promedio al año cero de 34, esto provoca que los primeros costos de inversión se disparen. Esta situación representa una limitante que debe ser asumida, pero también sirve de criterio para discernir entre propuestas.

Además de los gráficos mostrados en la sección *1286.3. Formulación del Índice Compuesto,* se presenta la información del anexo E, allí se muestran gráficos donde se puede ver la peculiaridad de la que se hablaba líneas atrás en la misma sección. La situación que se presenta es que a los doce años del periodo de análisis, se aprecia una cierta estabilización en el comportamiento de los resultados, se llega, al parecer, a un equilibrio tanto de costos como de condición de la red, en ambos casos el porcentaje de diferencia entre el valor mayor y el menor oscila el 22.7%.

Considerando lo visto se deben indicar como predilectas aquellas combinaciones de pesos relativos en las que se dé un mayor peso a los índices funcionales, pues nos permiten a largo plazo llegar a tener una red vial en buenas condiciones con menores costos de inversión; aunque no son exclusivas puesto que con la metodología empleada se apreciaron buenos resultados cuando se estudió la red con una combinación de pesos relativos de 50% para cada índice.

Esta situación es solo reflejo de una realidad que hasta el momento no se ha considerado. El *Remsoft* es un programa que, en Costa Rica, se encuentra en un estado de calibración, y se pueden hallar aún grandes variaciones en los resultados al variar un poco el código fuente programado. Esto no desmerita la labor realizada pues lo que se buscó era demostrar que un análisis de sensibilidad de inversiones de este tipo podría servir de herramienta para que los Sistemas de Administración de Carreteras pudieran establecer su metodología de cálculo del PCI; y con los expuesto se puede llegar a concluir, como ya se mencionó, que las combinaciones de peso elegibles deben ser desde las de 50%-%50 hasta las que dan mayor peso al índice funcional.

Es importante aclarar que no se debe malinterpretar la afirmación anterior pensando que al dar mayor peso al índice funcional en la ecuación del PCI, se está restringiendo las acciones de intervención a técnicas de preservación

únicamente. De ser así, los esfuerzos por dar mantenimiento a la red serían en vano, pues estas medidas son, para las carreteras en avanzado estado de deterioro, solo una diminuta capa que oculta la realidad con una superficie momentánea, de buena calidad, pero que resultará en un colapso estructural repentino y brusco.

De lo que realmente se está hablando en esta investigación es de una metodología para definir la condición de las estructuras de pavimento, lo que constituye una primera fase en la programación de inversiones, posteriormente se asignan las medidas de intervención adecuadas para cada condición, las cuales incluyen *per se* una mejoría estructural.

Por el contrario podría considerarse esta posición como conservadora si se comprobase que el deterioro funcional aparece antes del estructural y en mayor orden de magnitud; en este sentido, podrían hacerse intervenciones más severas de las que se requieren estructuralmente (criterio conservador).

Capitulo 7. Conclusiones y Recomendaciones

- En atención al objetivo principal de la investigación se concluye a partir de los diferentes hallazgos encontrados que es totalmente justificable la ejecución de una inversión en un proceso de generación de información cuantiosa y de calidad para ampliar y revalidar los resultados expuestos en la presente investigación.
- En cuanto a la aplicabilidad de los índices estructurales estudiados se concluye:
    - De las dos formulaciones estudiadas para el cálculo del Índice de Adecuación Estructural (SAI), se elige el denominado SAI 2 correspondiente a la ecuación que considera de manera directa el valor de la deflexión central medida. Las razones son, en primera instancia el hecho de incluir el valor de la deflexión central directamente, con lo cual se considera el aporte de la subrasante en la definición de la condición de la estructura; y la ventaja de que al manipular la base de datos, los valores de SAI 2 mostraban una menor desviación estándar que los valores de SAI 1, es decir mostraron menor variabilidad.
    - Este Índice de Adecuación Estructural mostró ser bastante eficiente para determinar la condición de estructuras constituidas por bases estabilizadas, por lo que se considera aplicables en Costa Rica para este tipo de estructuras, sin embargo su uso en estructuras que incluyan bases granulares debe ser evaluado con mas detalle.
    - En el caso del estudio de las estructuras con tratamiento superficial y base estabilizada, el criterio de fatiga que considera la deformación unitaria a tensión de la fibra extrema inferior de la capa de asfalto (o capa de base estabilizada de ser el caso) mostró ser un mejor criterio de comparación de estados de condición que el Número Estructural.

- En Índice AREA mostró un comportamiento similar al del Índice de Adecuación Estructural, y se considera igualmente aplicable a los mismos tipos de estructuras.
- Para determinar la condición de la capa de subrasante se estudió la habilidad del Índice de Curvatura de la Base (BCI), los resultados mostraron una buena correlación tanto en las relaciones que consideran el módulo de la subrasante como en las que se considera el criterio de fatiga de deformación unitaria a compresión de la fibra extrema superior de la subrasante.
- Se considera entonces su aplicabilidad bajo las condiciones de Costa Rica, aunque debe tenerse un poco de cuidado cuando se traten de estructuras compuestas por base granular.
- Se acepta la aplicabilidad de los índices AREA 3 y BDI (Índice de Daño de la Base) para caracterizar la condición de las capas de base y subbase, aunque se advierte que su uso debe ser combinado, a modo de calibrar mediante un control cruzado los resultados.
- Para caracterizar la condición de la capa de rodadura asfáltica se recomienda el uso del Índice de Curvatura de la Superficie (SCI), únicamente para estructuras que incluyan una capa de base estabilizada. Para estructuras compuestas por base granular no se mostraron resultados aceptables.

- Se hallaron claras diferencias en cuanto a la capacidad de algunos índices para representar la condición de las estructuras de pavimento, cuando se consideran las diferencias de estructura y tránsito que representan los tipos de estructura utilizados. No se puede por lo tanto generalizar el uso de algún índice para toda la variabilidad de condiciones que se pueden hallar en Costa Rica.
- Se establece el valor de Índice de Regularidad Internacional (IRI) de 13,03m/km como valor máximo que se puede presentar en las carreteras

de Costa Rica, y se asocia a estructuras en un avanzado estado de deterioro.

- En cuanto a la formulación del Índice de Condición de Pavimentos (PCI), se propone considerar rangos de pesos relativos que se encuentran desde $k_{PRI} = 0.7$ hasta $k_{PRI} = 0.5$.
- Las recomendaciones a exponer van dirigidas a guiar la futura investigación propuesta para realizarse con mayores recursos. Estas son:
    - Ampliar la base de datos a emplear.
    - Actualizar los sondeos para la caracterización de espesores y materiales.
    - Esta caracterización de materiales puede ir acompañada de ensayos de CBR y cono de penetración dinámica para contar con mediciones de campo que puedan relacionarse de manera directa con la condición de las estructuras.
    - Invertir en recursos tecnológicos como técnicas de elemento finito y modelos probabilístico- estadísticos que empleen redes neuronales artificiales.
    - Depurar la información existente, en caso de hallar información dudosa que deba incluirse, emplear únicamente información de estructuras en buen o regular estado (de especial importancia cuando se trate de bases estabilizadas)
    - Siguiendo los trabajos realizados en el proyecto NCHRP 10-48, debería pensarse en considerar el espesor de las capas de ruedo o capa de base estabilizada como una variable más dentro del modelo generado para definir la condición de las capas.
    - Se puede pensar además en hacer mediciones en distintas estaciones del año, en busca de describir alguna posible relación entre los índices y las condiciones de humedad y temperatura promedio.

Capítulo 8. Bibliografía

1. American Association of State Highway Transport Officials. **Guide for Design of Pavement Structures**, EEUU, 1993.
2. American Society for Testing Materials. **Road and Paving Management Technologies, Volume 04,03.** EEUU, 1992.
3. Chavarria Luis, **Comportamiento Estructural de Pavimentos Urbanos**, Proyecto de Graduación para Obtener el Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, 1995.
4. Chaverri Jenny, **Desarrollo de un Plan Piloto de Administración de Pavimentos en Curridabat**, Proyecto de Graduación para Obtener el Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, 2000.
5. Chaverri Jenny, **Notas del curso de Pavimentos**, Universidad de Costa Rica, 2007.
6. Crespo del Río, Ramón. AEPO Ingenieros Consultores. **Calidad ante la Rodadura. Barcelona**, España, 1999.
7. De Solminihac, Hernán. **Gestión de Infraestructura Vial**. Editorial Teleduc, Chile, 1998.
8. Huang, Yang H. **Pavement Analysis and Design**, 1993.
9. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la UCR. **Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada**, Costa Rica, 2004.
10. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la UCR. **Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada**, Costa Rica, 2006.
11. Madrigal, Daniel. **"Plan de Inversiones a Nivel Estratégico para la Zona 1-9 de Conservación Vial de CONAVI"**. Proyecto de Graduación para Obtener el Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, Noviembre 2008.

12. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. **Manual de diseño de carreteras CR-2002**, Costa Rica, 2002.
13. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. **Metodología Simplificada, Determinación el Índice de Priorización**, Costa Rica, 2006.
14. Mrawira,Donath. **"Aplicando un SIG en Transportes para Desarrollar un Modelo de Desempeño de Infraestructura Vial y un Sistema de Planificación a Largo Plazo para una Red de Carreteras"**, XIV congreso ibero-latinoamericano del asfalto (CILA XIV), 2007.
15. National Cooperative Highway Research Program. **Transportation Asset Management Guide, Project 10 – 48,** EEUU, Noviembre 2002.
16. Orozco Orozco Erick. **"Zonificación climática de Costa Rica para la gestión vial"** Proyecto de Graduación para Obtener el Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, Mayo 2007.
17. Paterson, William D.O. **"Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management. Highway Design and Maintenance Standards Series"**, World Bank Transportation Department, Washington D.C., 1987
18. Porras, Juan Diego. "**Determinación de rangos de módulos resilientes en estructuras de pavimentos en Costa Rica. Mediante el procedimiento de retrocálculo de módulos y ensayos dinámicos".** Proyecto de Graduación para Obtener el Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, Julio 2009.
19. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Office of Asset Management. **"Asset Management Primer".** Estados Unidos, diciembre de 1999.
20. Ventura, J. y Alvarenga, E. **"Determinación del Índice de Rugosidad Internacional"**. San Salvador: Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2005.
21. Víquez Rojas, J. **Determinación del Coeficiente de Rozamiento y la Textura del Pavimento y su correlación con la incidencia de**

accidentes , Proyecto de Graduación para Obtener el Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, 1998.

22. Shahin, M.Y. **"Pavement Management for Airports, Roads, and Parquing Lots"**. Estados Unidos, Springer: 2005.

Otras Fuentes:

1. Consulta de documentos en internet. http://www.vaxasoftware.com/indexes.html, consultado el 1 de junio de 2009.
2. Consulta de documentos en internet. http:// www.uiah.fi/projects/metodi/280.htm#korr, consultado el 17 de octubre de 2009.
3. Entrevista con la Máster en estadística María Isabel González Lutz.

Capítulo 9. Anexos

9.1. ANEXO A. Localización de los puntos de extracción de núcleos, para caracterización de espesores y materiales de las capas de los pavimentos

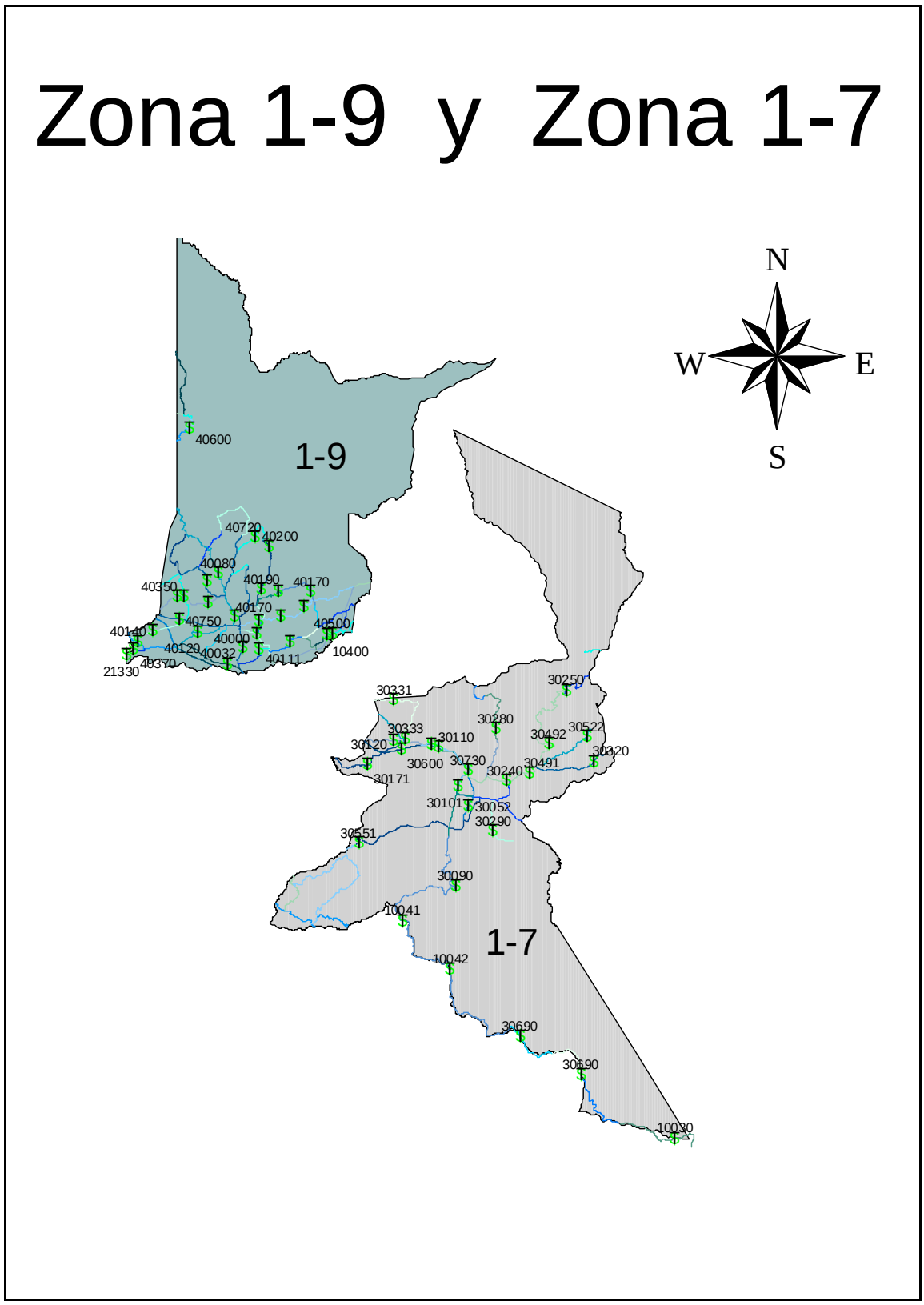


Figura 25. Perforaciones Zona 1-7 y Zona 1-9.

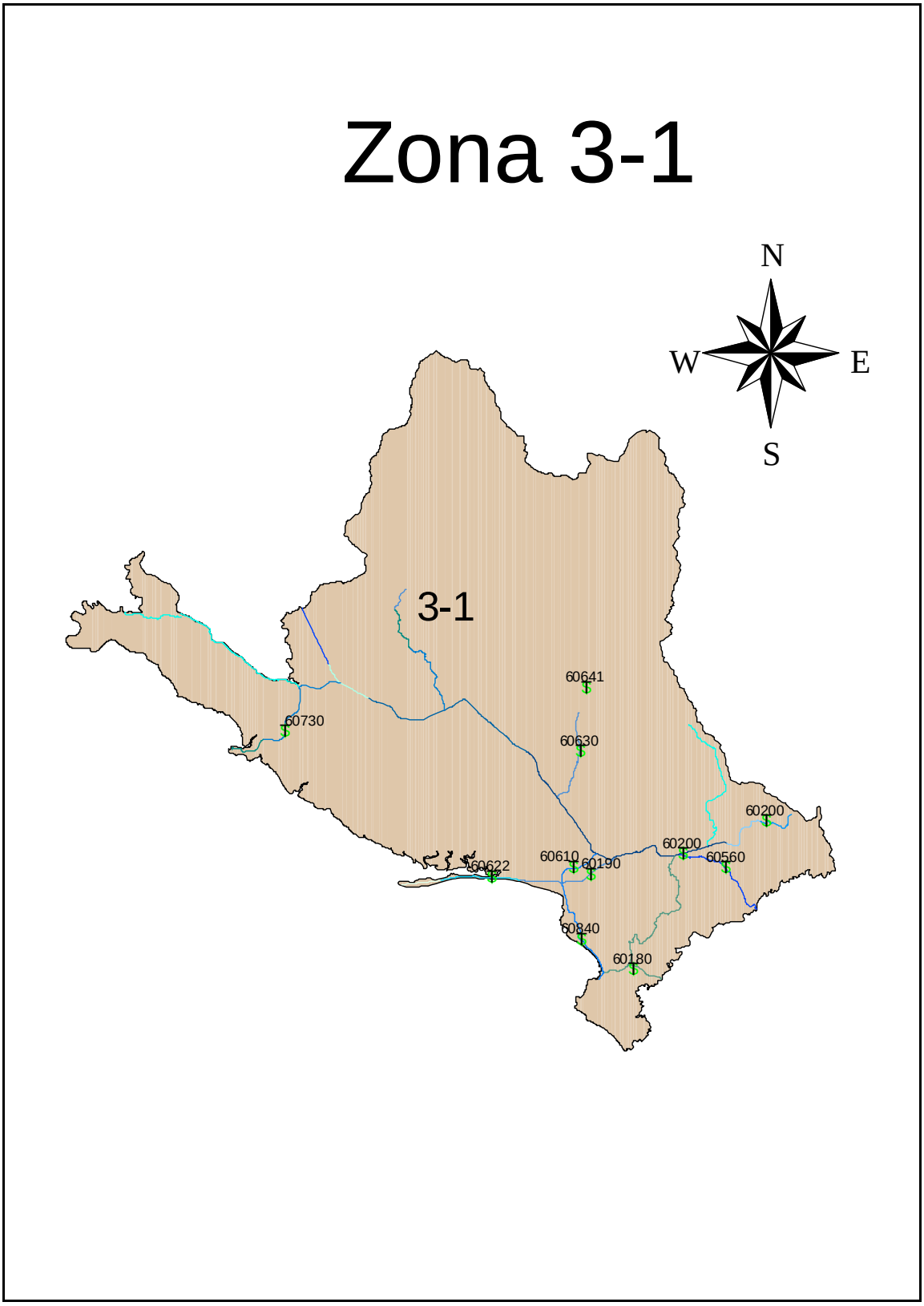


Figura 26. Perforaciones Zona 3-1.

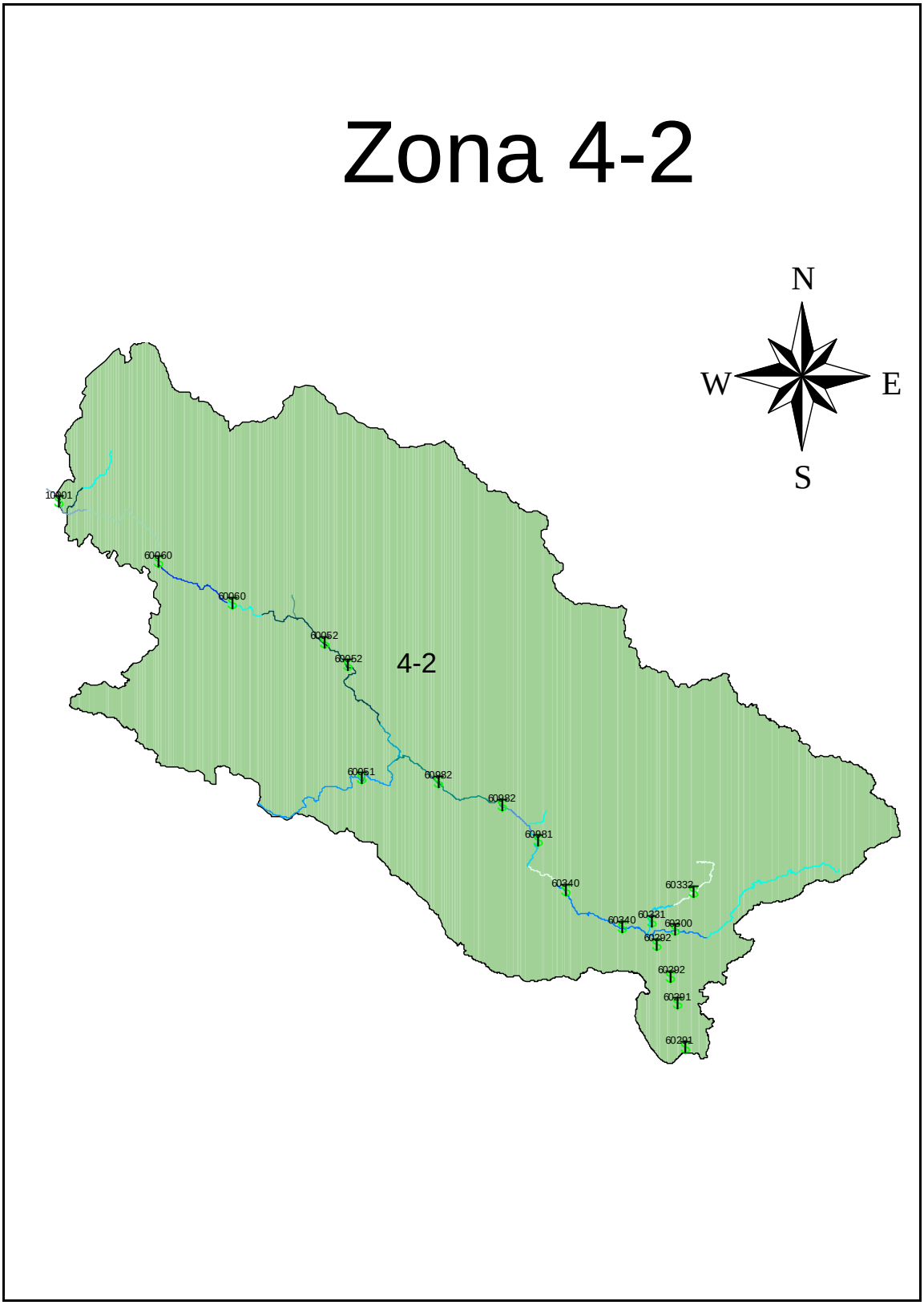


Figura 27. Perforaciones Zona 4-2.

9.2. ANEXO B. Valores obtenidos de los índices de condición estructurales

Tabla 44. Índices de condición, clase de estudio Tipo 1 (TPDA alto, carpeta asfáltica + base estabilizada).

TH	Sección		A1	A2	A3	SAI	SAI 2	AI1	AI2	AI3	AI4	AUPP	BCI1	BCI2	BDI	SCI	F1	F2	F3	S
61	**40000**	**Prom**	557,03	356,29	204,61	68,97	68,68	0,86	0,60	0,40	0,28	72,30	-2,91	8,93	14,88	18,20	0,76	0,91	0,88	62,99
29c	**30110**	**Prom**	600,24	389,25	259,11	79,70	82,40	0,86	0,65	0,50	0,37	25,33	-1,30	2,66	2,61	8,03	1,06	0,53	0,63	67,70
29d	**30600**	**Prom**	571,00	366,78	223,70	72,44	76,47	0,86	0,61	0,44	0,31	28,71	-1,66	3,80	5,30	7,54	0,71	0,73	0,73	64,59
60	**30600**	**Prom**	545,40	338,13	212,22	66,09	72,51	0,84	0,57	0,41	0,30	27,14	-1,38	3,16	4,51	7,52	0,79	0,73	0,67	62,17

Tabla 45. Índices de condición, clase de estudio Tipo 2 (TPDA alto, carpeta asfáltica + base granular).

TH	Sección		A1	A2	A3	SAI	SAI 2	AI1	AI2	AI3	AI4	AUPP	BCI1	BCI2	BDI	SCI	F1	F2	F3	S
274	**21330**	**Prom**	569,80	363,92	229,94	72,14	75,38	0,85	0,61	0,44	0,33	38,64	-1,42	4,53	7,46	10,08	0,72	0,78	0,73	64,60
29ª	**30101**	**Prom**	617,35	413,78	218,51	83,94	83,40	0,93	0,69	0,44	0,29	36,56	-1,63	5,64	10,01	7,49	0,62	1,04	0,96	68,22
59ª	**30101**	**Prom**	513,49	313,40	179,36	58,17	64,65	0,82	0,54	0,35	0,25	51,77	-1,42	4,91	9,11	14,26	0,96	1,03	0,88	58,81
29b	**30730**	**Prom**	550,88	348,79	219,10	67,45	71,32	0,83	0,58	0,42	0,31	48,15	-1,98	4,60	6,24	14,59	1,41	0,73	0,77	62,75
59b	**30750**	**Prom**	488,00	296,17	168,67	51,84	61,00	0,80	0,50	0,33	0,23	46,68	-1,20	4,00	6,71	13,84	1,44	0,87	0,82	56,43

Tabla 46. Índices de condición, clase de estudio Tipo 3 (TPDA moderado-bajo, carpeta asfáltica + base estabilizada).

TH	Sección		A1	A2	A3	SAI	SAI 2	AI1	AI2	AI3	AI4	AUPP	BCI1	BCI2	BDI	SCI	F1	F2	F3	S
61	**40750**	**Prom**	526,40	330,19	180,50	61,37	65,16	0,84	0,56	0,36	0,24	57,63	-2,48	6,96	11,53	14,74	0,85	0,92	0,83	59,94
6	*****	**Prom**	437,13	249,66	124,95	39,22	51,03	0,78	0,43	0,25	0,17	62,54	-0,82	4,18	11,40	17,34	1,26	1,32	0,92	51,34
8	*****	**Prom**	622,75	407,80	259,67	85,28	86,06	0,89	0,68	0,50	0,37	20,19	-1,61	3,62	4,60	4,59	0,53	0,65	0,62	69,57
12	**60200**	**Prom**	520,79	326,97	160,13	59,98	68,48	0,86	0,56	0,32	0,21	27,55	-0,80	2,93	6,72	6,40	0,90	1,28	0,88	58,97
44b	**60052**	**Prom**	858,61	618,41	368,55	143,81	128,86	1,11	1,03	0,72	0,51	1,91	-1,07	2,73	4,14	-2,27	0,14	0,79	0,73	91,40

* Datos extraídos del proyecto de graduación del Ingeniero Juan Diego Porras, referencia 19.

Tabla 47. Índices de condición, clase de estudio Tipo 4 (TPDA moderado-bajo, carpeta asfáltica + base granular).

TH	Sección		A1	A2	A3	SAI	SAI 2	AI1	AI2	AI3	AI4	AUPP	BCI1	BCI2	BDI	SCI	F1	F2	F3	S
85	**40730**	**Prom**	530,80	337,89	174,66	62,46	66,37	0,85	0,57	0,35	0,23	55,34	-2,03	7,19	11,43	13,84	0,82	0,99	0,95	60,13
197	**40032**	**Prom**	528,91	336,21	174,95	61,99	64,22	0,84	0,56	0,36	0,23	70,17	-2,80	8,81	14,08	17,86	0,83	0,99	0,97	60,01
206	**40200**	**Prom**	422,16	247,69	89,76	35,51	37,96	0,79	0,42	0,20	0,10	158,79	-2,67	14,40	30,72	42,20	1,29	1,80	1,83	49,28
215	**40251**	**Prom**	529,41	338,97	158,98	62,12	63,47	0,86	0,57	0,33	0,20	72,74	-2,81	10,78	18,53	15,82	0,82	1,18	1,09	59,66
231a	**40070**	**Prom**	568,87	367,48	198,62	71,91	72,53	0,88	0,62	0,40	0,27	55,16	-2,21	7,99	14,47	11,78	0,71	1,08	1,01	63,81
231b	**40080**	**Prom**	533,84	338,29	173,22	63,22	63,79	0,86	0,57	0,35	0,23	79,18	-2,78	9,91	18,36	18,67	0,81	1,06	0,94	60,37
374	**30052**	**Prom**	456,02	265,29	123,64	43,91	50,17	0,81	0,46	0,25	0,16	93,14	-2,06	8,23	19,35	24,00	1,17	1,52	1,11	52,84
405	**30120**	**Prom**	781,38	554,80	289,42	100,00	113,05	1,09	0,94	0,58	0,39	11,14	-1,91	6,30	12,16	-4,10	0,28	1,13	0,88	83,25
443	**30171**	**Prom**	597,14	399,64	171,49	78,93	76,77	0,95	0,68	0,36	0,21	53,52	-2,28	9,99	22,32	6,02	0,64	1,47	1,23	65,48
346a	**30240**	**Prom**	568,07	362,71	179,56	71,71	73,80	0,90	0,63	0,37	0,23	46,62	-1,46	6,64	13,56	9,18	0,84	1,54	1,14	63,28
135a	**60610**	**Prom**	390,76	215,58	89,08	27,71	41,01	0,75	0,37	0,18	0,12	85,33	-0,81	4,72	14,09	24,73	1,55	1,67	1,01	46,73
105	**60622**	**Prom**	546,38	355,11	164,21	66,33	67,16	0,88	0,60	0,34	0,21	65,95	-2,41	10,35	18,51	13,20	0,75	1,21	1,13	61,16
241	**60730**	**Prom**	419,09	229,23	93,07	34,74	46,33	0,79	0,41	0,19	0,12	76,00	-1,17	4,72	16,96	19,28	1,33	2,02	1,00	49,19
41	**60060[a]**	**Prom**	720,76	492,15	329,89	100,00	100,00	0,96	0,82	0,62	0,48	7,86	-1,04	2,22	2,80	1,02	0,33	0,56	0,57	79,26

Tabla 48. Índices de condición, clase de estudio Tipo 5 (Tratamiento superficial + base granular).

TH	Sección		A1	A2	A3	SAI	SAI 2	AI1	AI2	AI3	AI4	AUPP	BCI1	BCI2	BDI	SCI	F1	F2	F3	S
205a	40152	Prom	413,94	235,78	97,08	33,46	40,23	0,77	0,40	0,20	0,12	128,97	-1,65	9,29	22,66	36,13	1,38	1,63	1,21	48,80
205b	40160	Prom	438,11	258,04	110,91	39,46	45,29	0,79	0,44	0,23	0,14	115,47	-1,91	9,28	21,11	31,67	1,23	1,45	1,16	51,08
206	40190	Prom	478,60	295,38	131,64	49,51	51,62	0,82	0,50	0,28	0,16	113,20	-2,18	11,95	23,32	28,90	1,03	1,38	1,26	54,85
220b	40630	Prom	432,94	251,23	109,22	38,18	41,36	0,79	0,43	0,22	0,14	146,82	-1,80	10,82	27,29	40,19	1,26	1,60	1,15	50,62
348-349	40270	Prom	454,98	272,94	112,40	43,65	38,92	0,81	0,47	0,24	0,13	193,89	-3,60	19,01	39,91	49,81	1,12	1,47	1,30	52,50
30	30090	Prom	452,66	267,77	126,04	43,07	50,80	0,80	0,46	0,26	0,16	88,37	-1,51	6,71	16,08	24,36	1,21	1,45	1,12	52,63
366	30230	Prom	450,70	256,11	132,49	42,59	45,38	0,79	0,45	0,26	0,18	127,03	-2,97	9,46	23,90	34,58	1,24	1,44	0,82	52,65
137	60180	Prom	378,27	212,64	63,61	24,61	31,82	0,75	0,36	0,15	0,06	161,58	-1,12	11,53	27,51	45,82	1,60	2,09	2,06	45,06
460	60300	Prom	480,89	279,64	153,54	50,08	52,75	0,81	0,49	0,30	0,21	108,19	-2,50	7,73	20,89	29,20	1,09	1,24	0,74	55,59
379a	60340ª	Prom	393,21	206,64	86,50	28,32	36,52	0,76	0,37	0,18	0,11	136,96	-1,44	7,37	23,94	38,95	1,54	1,93	1,05	46,86
379b	60340b	Prom	429,97	238,78	115,31	37,44	43,19	0,78	0,42	0,23	0,15	127,66	-1,91	7,84	21,75	36,44	1,35	1,56	0,94	50,53
377	60981	Prom	368,36	186,26	69,77	22,15	31,37	0,74	0,34	0,15	0,09	149,94	-1,41	7,85	24,39	43,77	1,73	2,41	2,64	44,43
375	60982ª	Prom	359,85	175,38	80,90	20,04	34,67	0,72	0,32	0,16	0,11	101,44	-1,07	4,29	13,26	31,76	1,89	1,70	0,94	44,01
376	60982b	Prom	356,11	173,70	69,17	19,12	30,57	0,73	0,32	0,14	0,09	140,99	-1,15	5,82	20,71	42,81	1,96	2,44	1,03	43,44

Tabla 49. Índices de condición, clase de estudio Tipo 6 (Tratamiento superficial + base estabilizada).

TH	Sección		A1	A2	A3	SAI	SAI 2	AI1	AI2	AI3	AI4	AUPP	BCI1	BCI2	BDI	SCI	F1	F2	F3	S
346b	30491	Prom	556,03	349,07	200,79	68,73	70,71	0,86	0,60	0,40	0,27	57,72	-1,72	6,70	11,93	14,59	0,80	1,02	0,90	62,77
346c	30492	Prom	604,45	389,82	245,09	80,74	78,49	0,88	0,66	0,47	0,35	51,15	-2,81	7,78	11,21	12,18	0,61	0,75	0,73	67,76
365	30551	Prom	462,56	270,86	125,31	45,53	48,86	0,81	0,47	0,26	0,16	117,08	-2,40	10,28	23,56	30,64	1,15	1,54	1,18	53,41
458	60331	Prom	539,66	332,37	186,56	64,66	65,63	0,85	0,58	0,37	0,25	74,38	-2,32	8,60	15,50	18,73	0,83	1,04	0,89	61,11
459	60332	Prom	544,42	338,73	194,16	65,84	63,51	0,86	0,58	0,38	0,27	98,12	-4,45	11,10	21,70	24,01	0,82	1,06	0,80	61,64

9.3. ANEXO C. Mapas de caracterización de las zonas de estudio

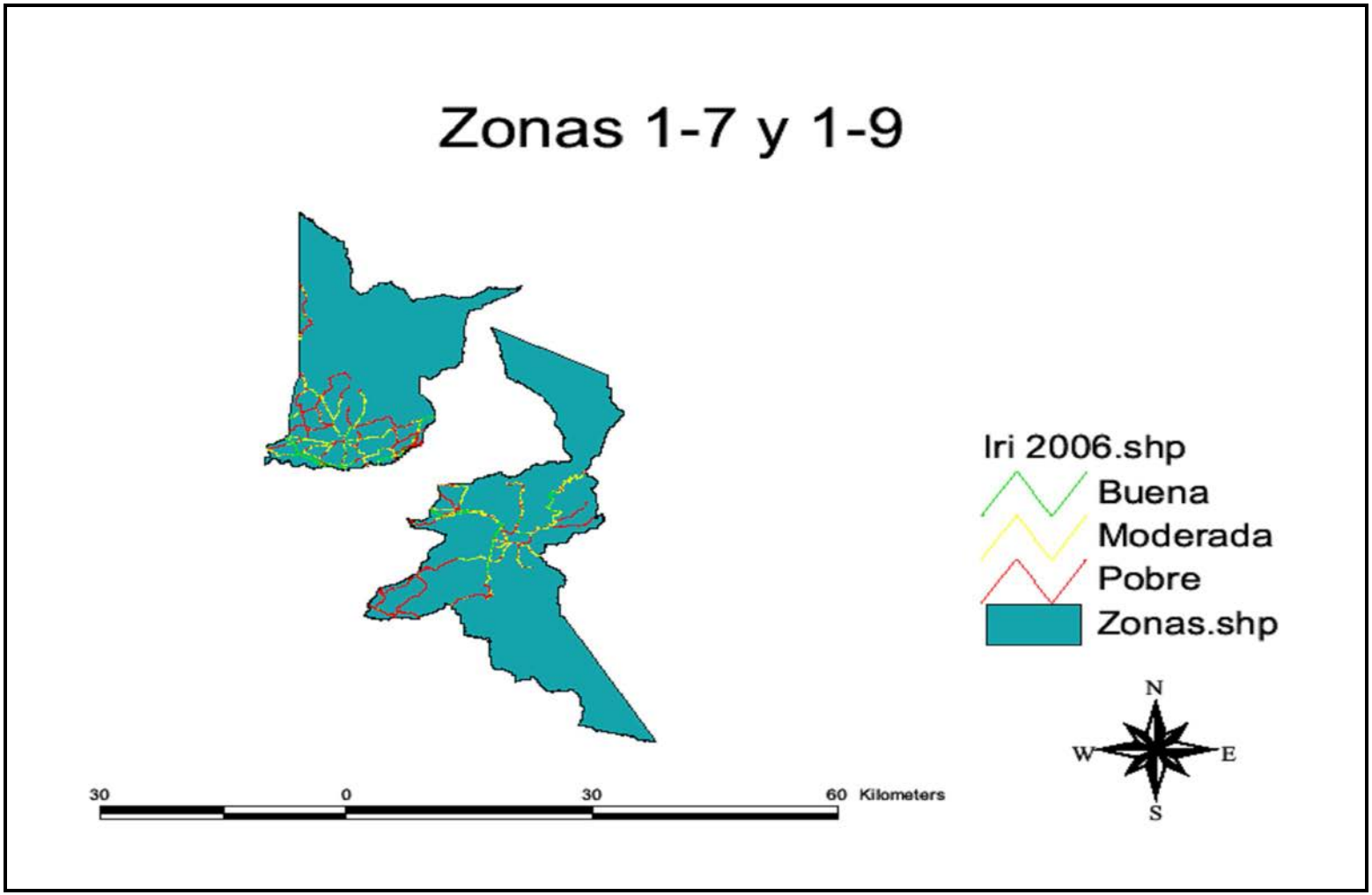


Figura 28. Caracterización de IRI para las zonas 1-7 y 1-9.

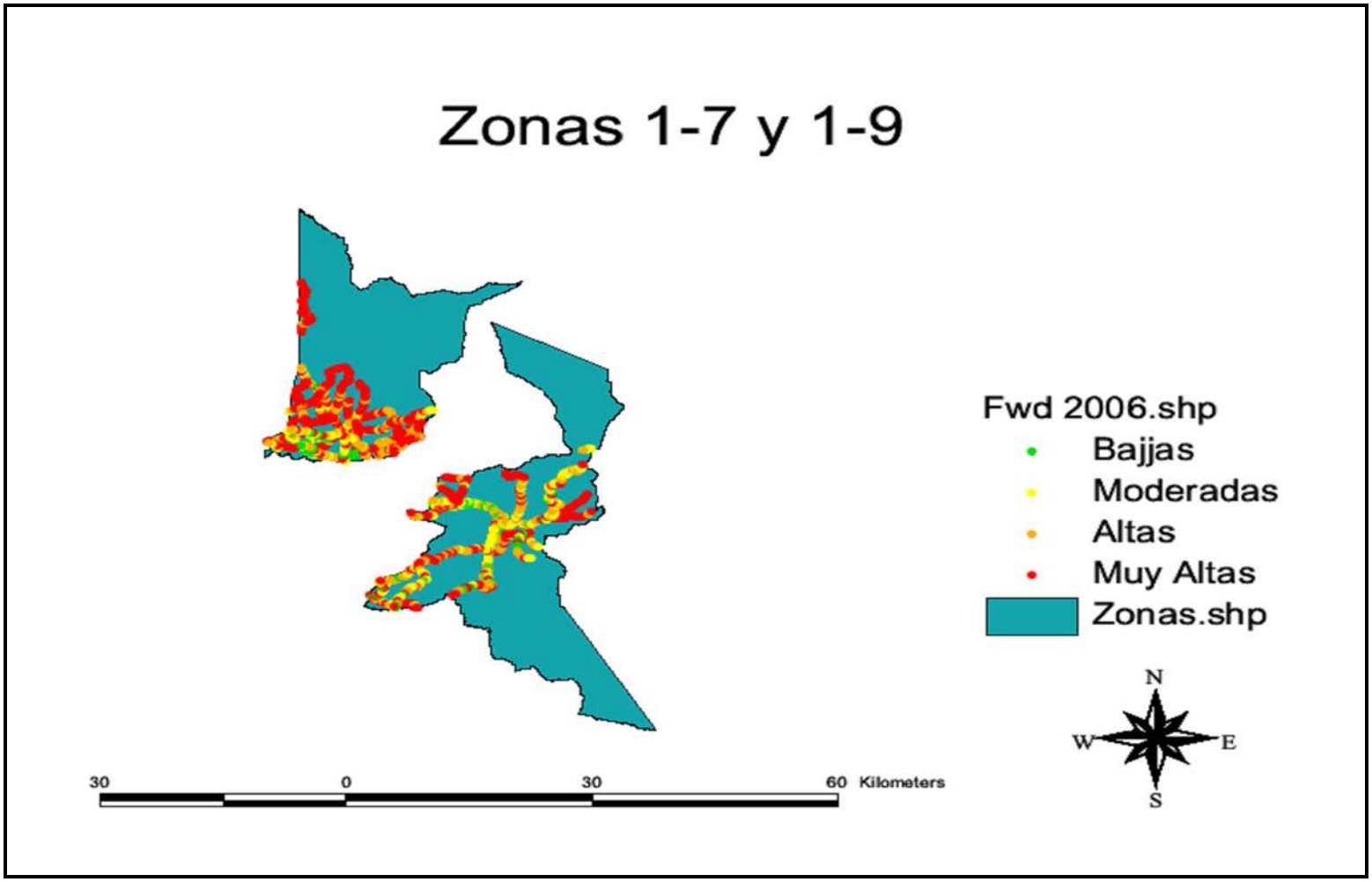


Figura 29. Caracterización de deflectometría para las zonas 1-7 y 1-9

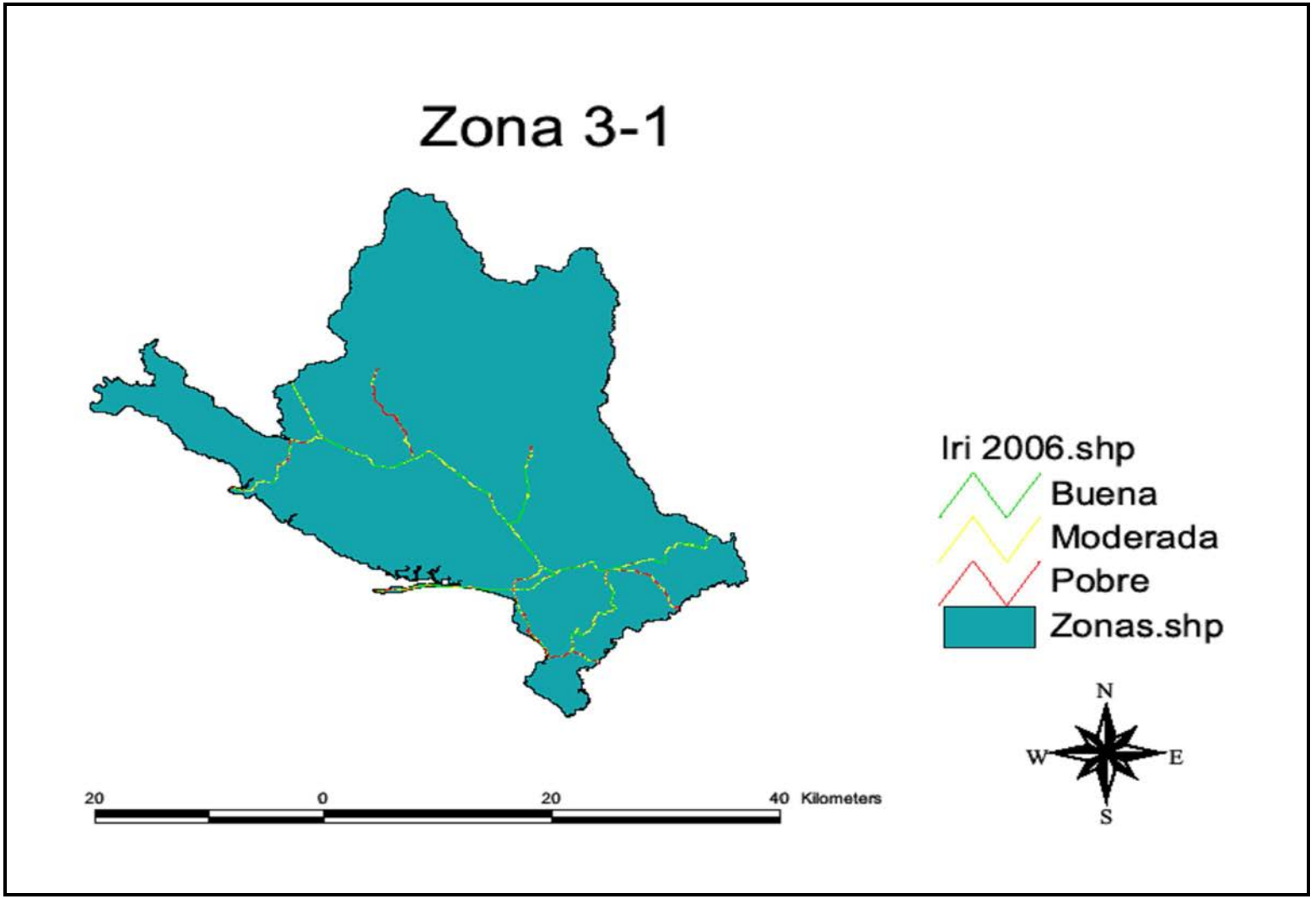


Figura 30. Caracterización de IRI para la zona 3-1.

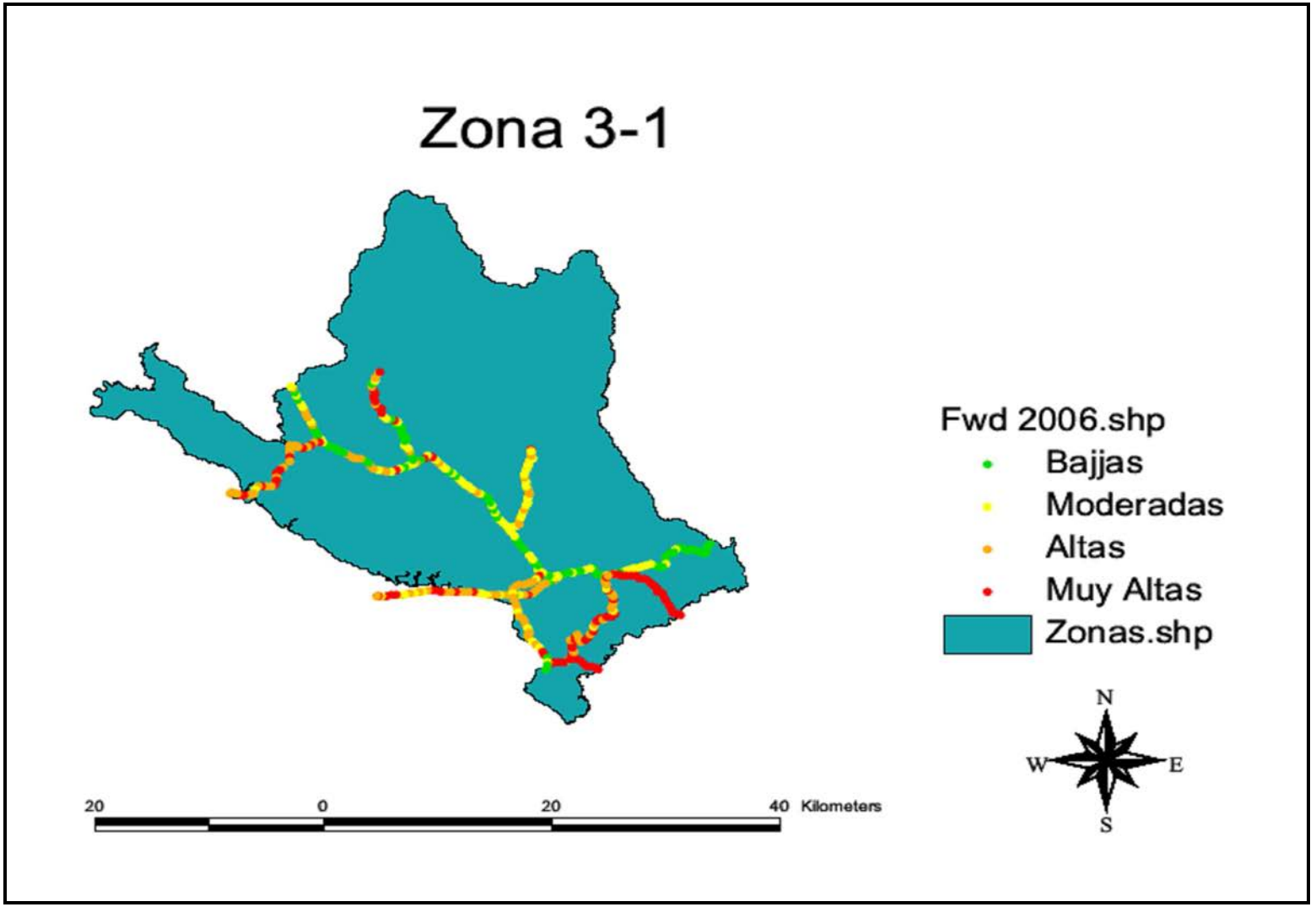


Figura 31. Caracterización de deflectometría para la zona 3-1.

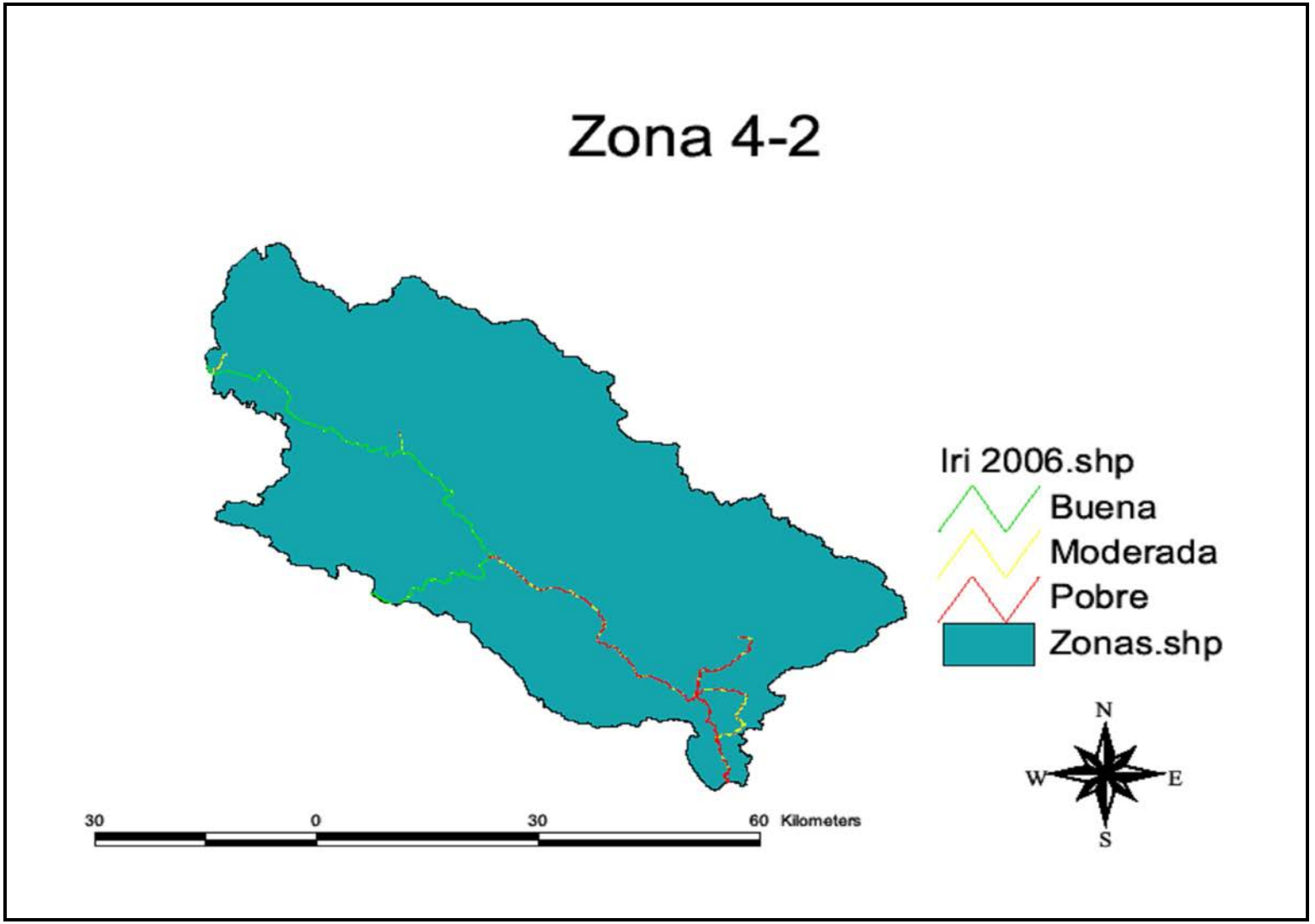


Figura 32. Caracterización de IRI para la zona 4-2.

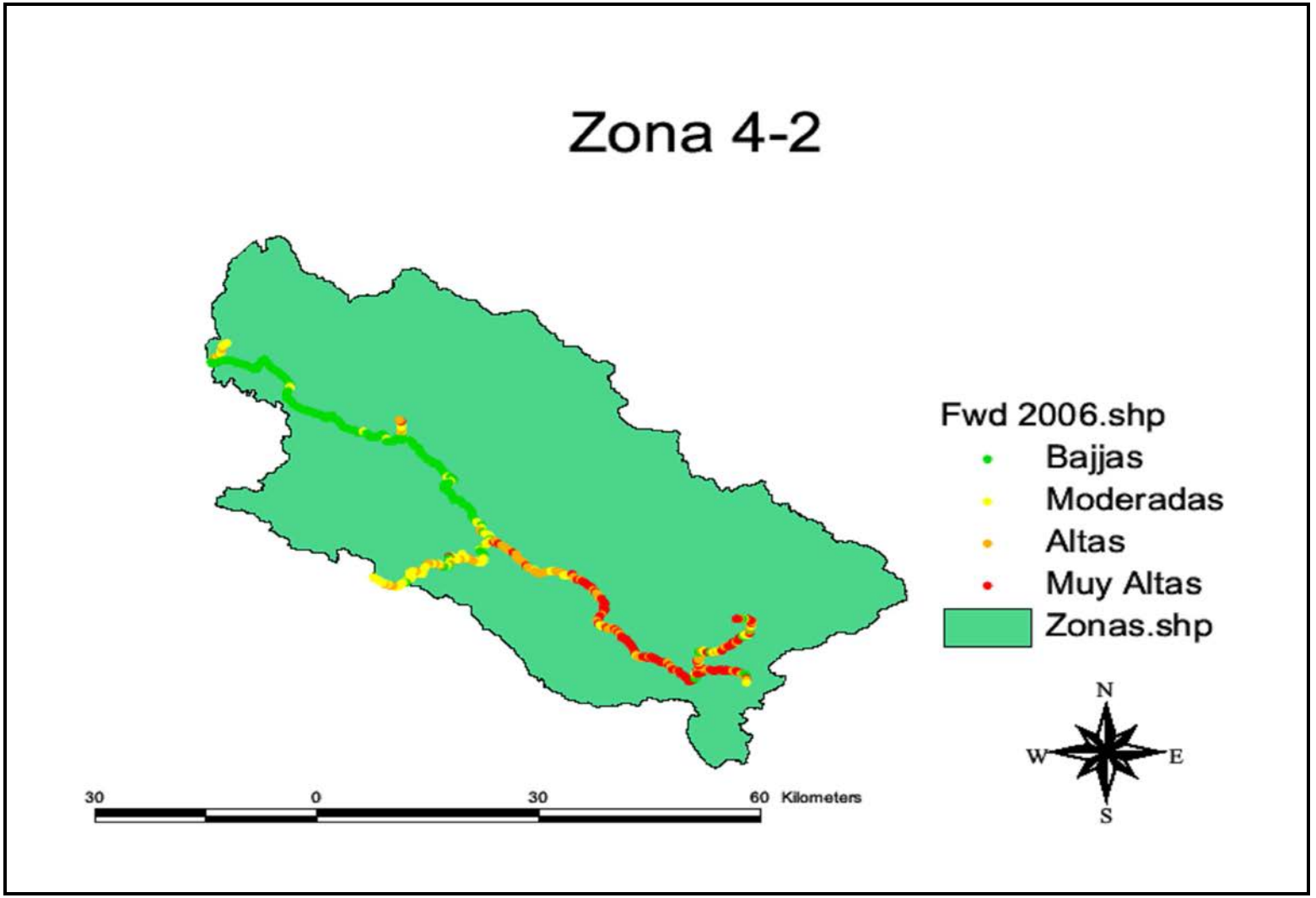
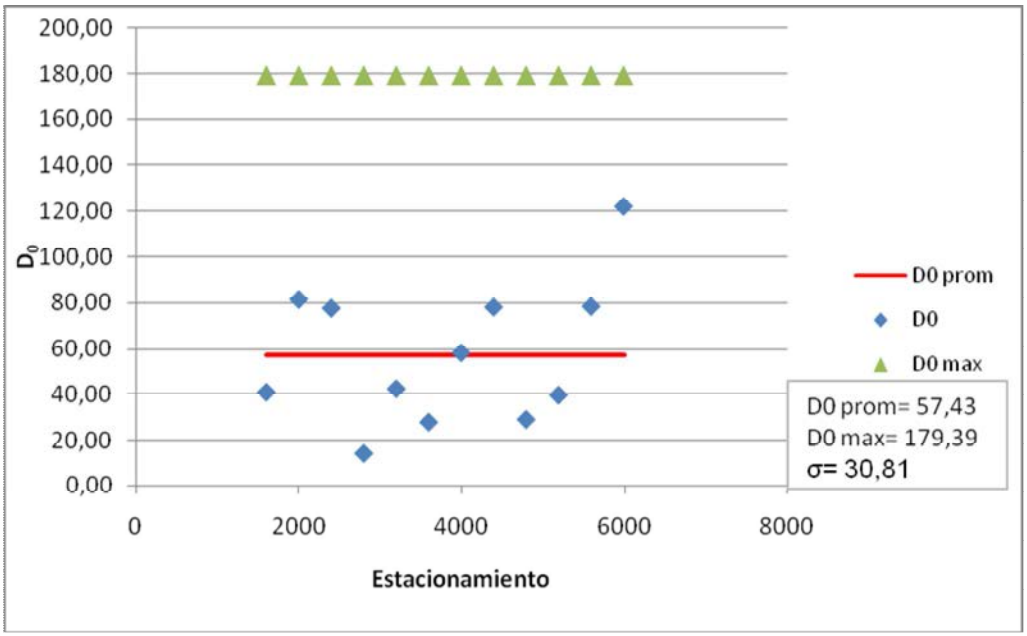


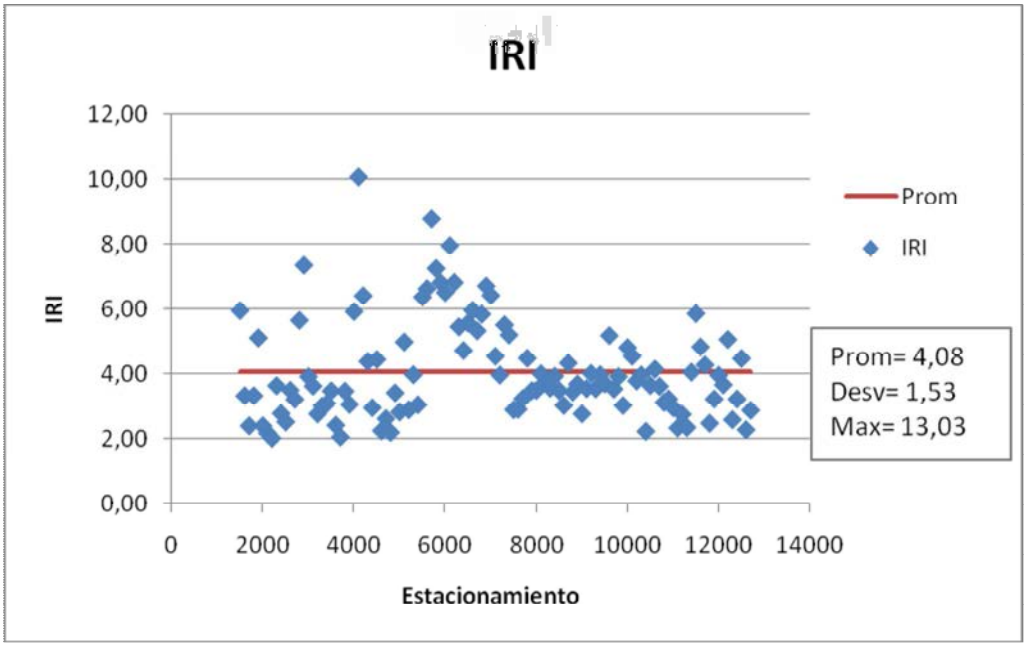
Figura 33. Caracterización de deflectometría para la zona 4-2.

9.4. ANEXO D. Base de datos para el retrocálculo de módulos. Caracterización de la condición funcional de los tramos.

TIPO 1 (TPDA alto- ≥ 20 000, carpeta asfáltica + base estabilizada)
TH-61

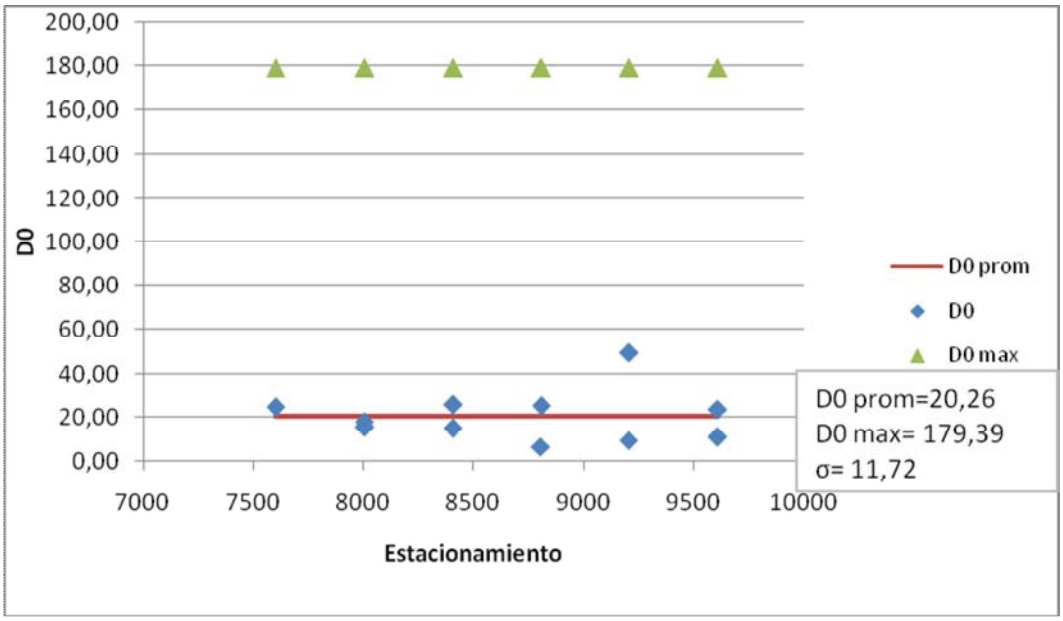
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	12.7 (5)	413.8 (60000)
BE	0.35	20.32 (8)	75.9 (11000)
SBG	0.35	25.4 (10)	69.0 (10000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	55.9 (8100)

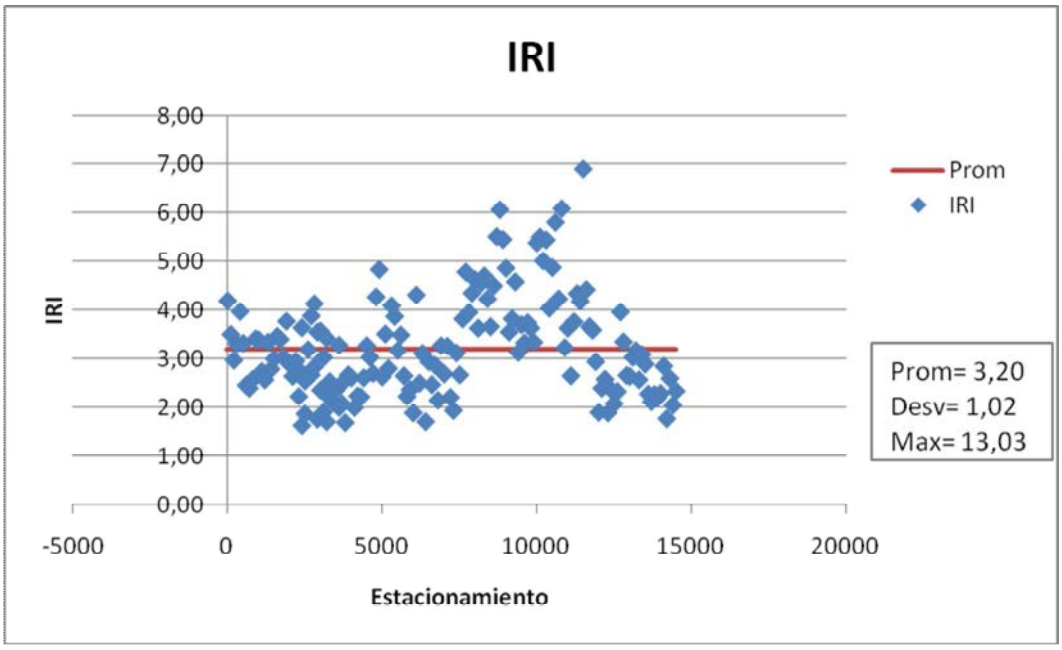




TH-29c

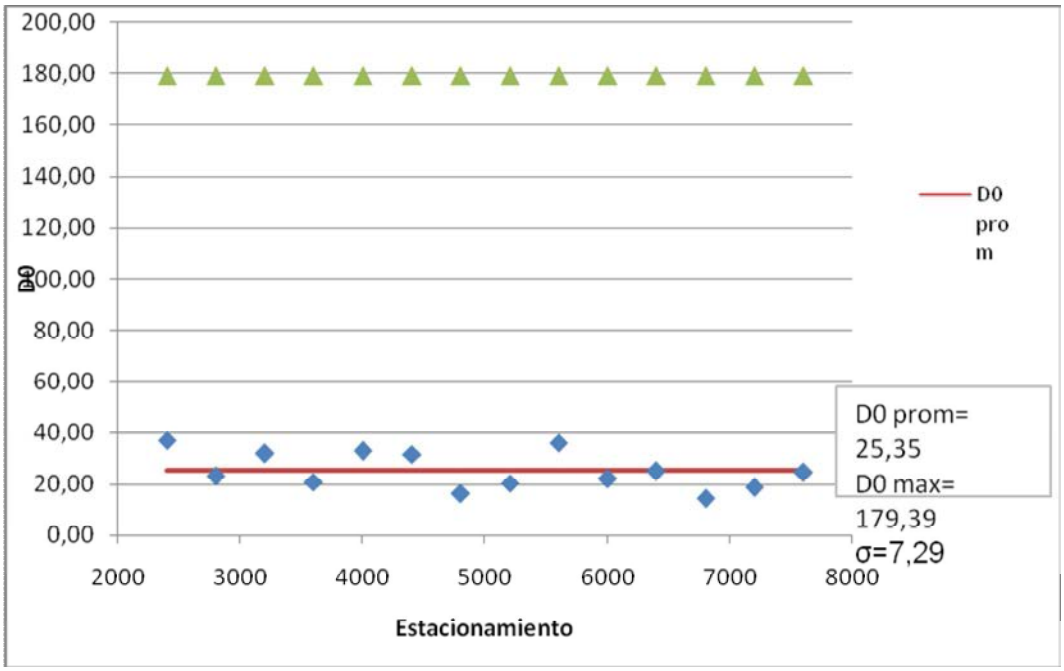
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	17.3 (6.82)	517.2 (75000)
BE	0.18	17.0 (6.69)	1448.3 (210000)
SBG	0.35	17.0 (6.69)	96.6 (14000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	113.8 (16500)

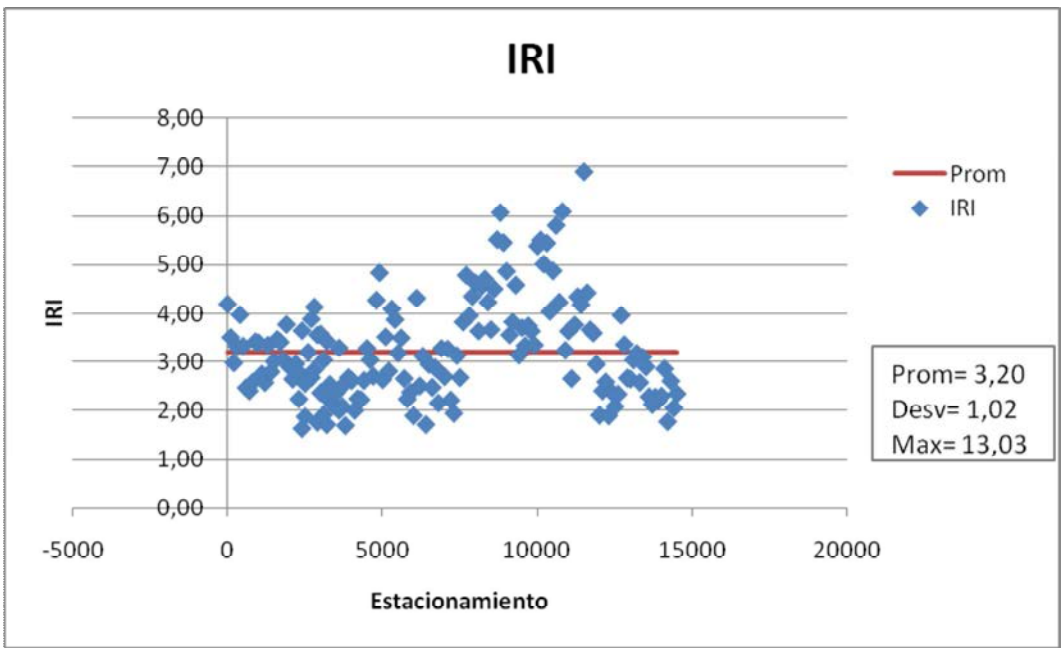




TH-29d

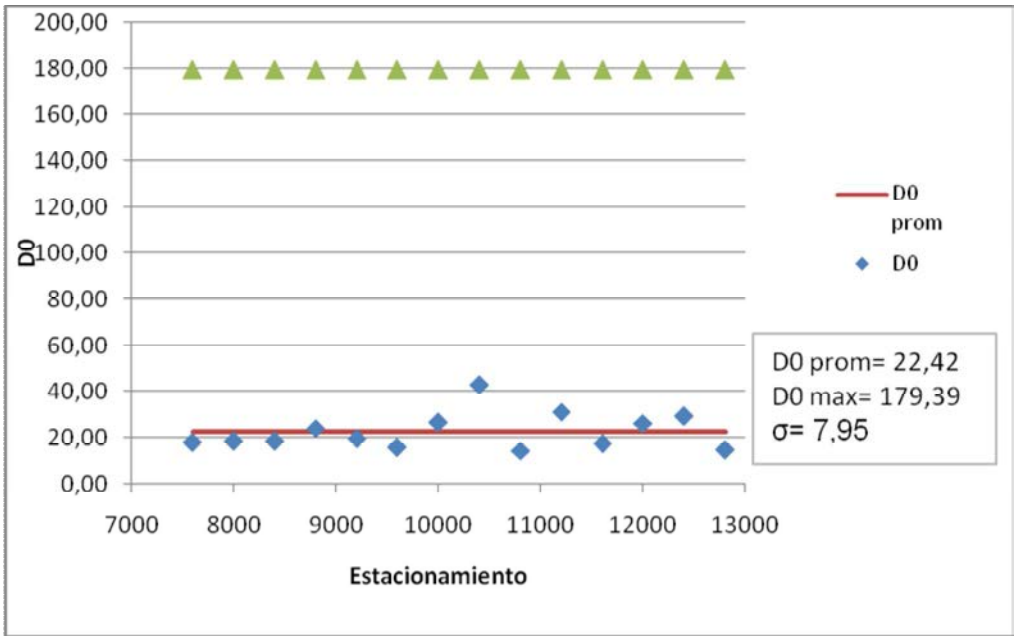
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	12.0 (4,74)	965.5 (140000)
BE	0.18	13.0 (5,12)	2482.8 (360000)
SBG	0.35	19.0 (7,48)	79.3 (11500)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	110.3 (16000)

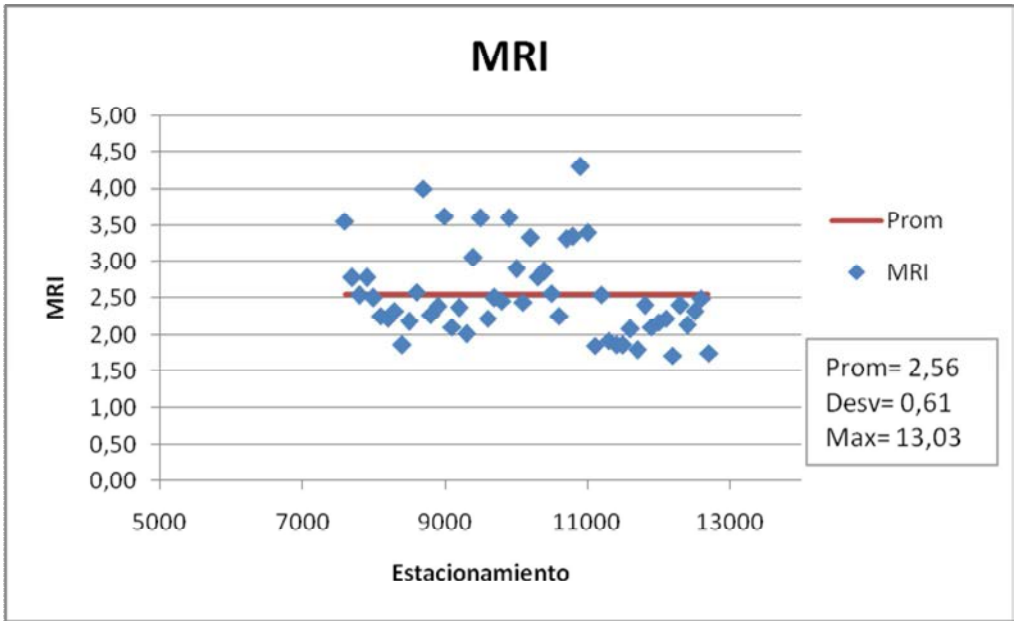




TH-60

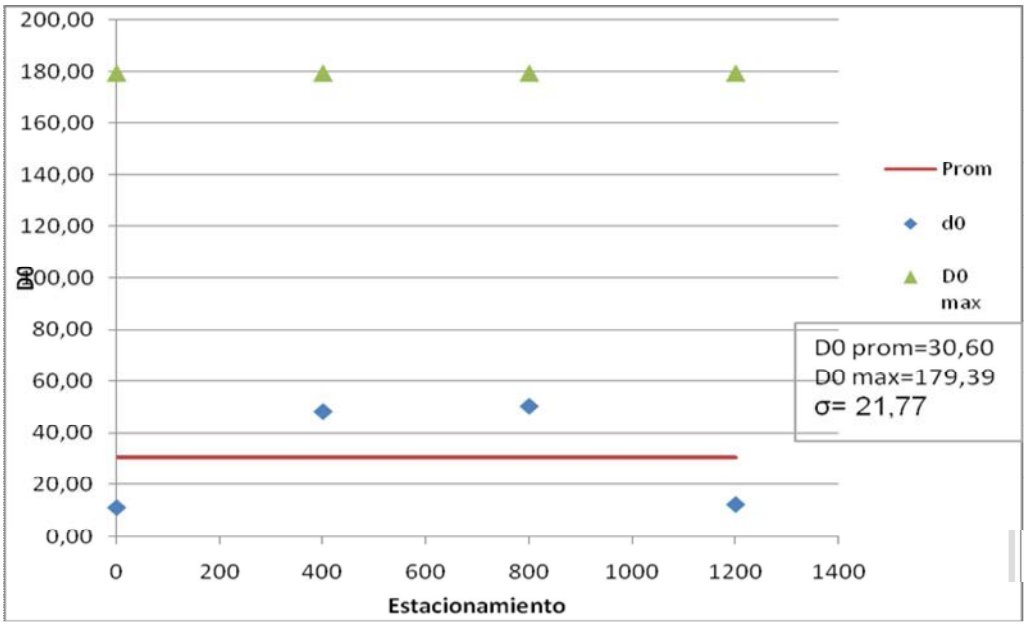
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	12.0 (4,74)	827.6 (120000)
BE	0.18	13.0 (5,12)	4137.9 (600000)
SBG	0.35	19.0 (7,48)	86.2 (12500)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	113.8 (16500)

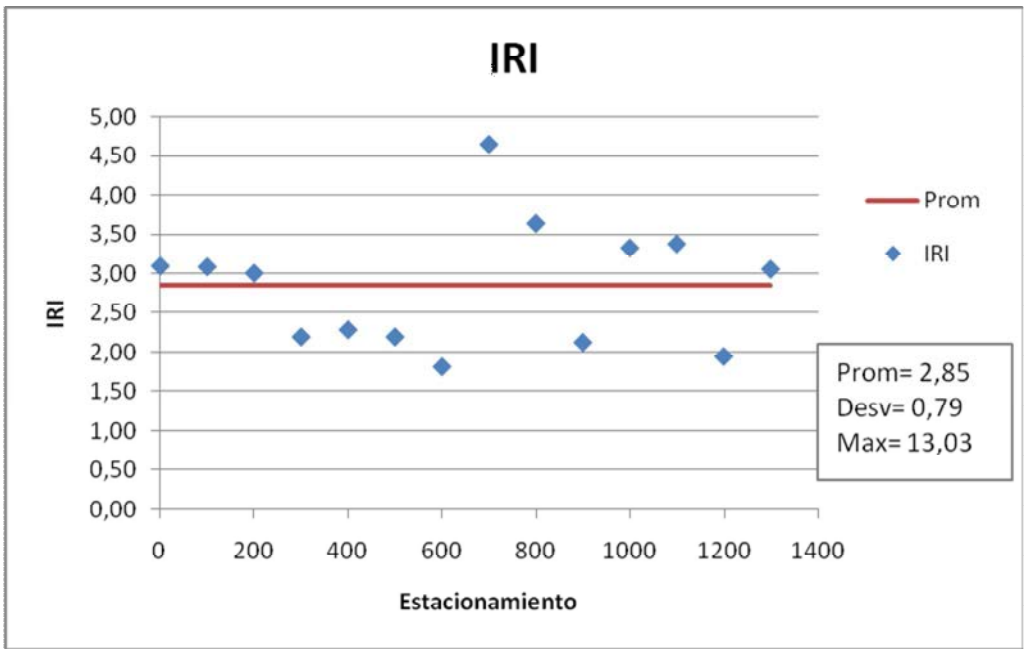




TIPO 2 (TPDA alto- ≥ 20 000, carpeta asfáltica + base granular)
TH-274

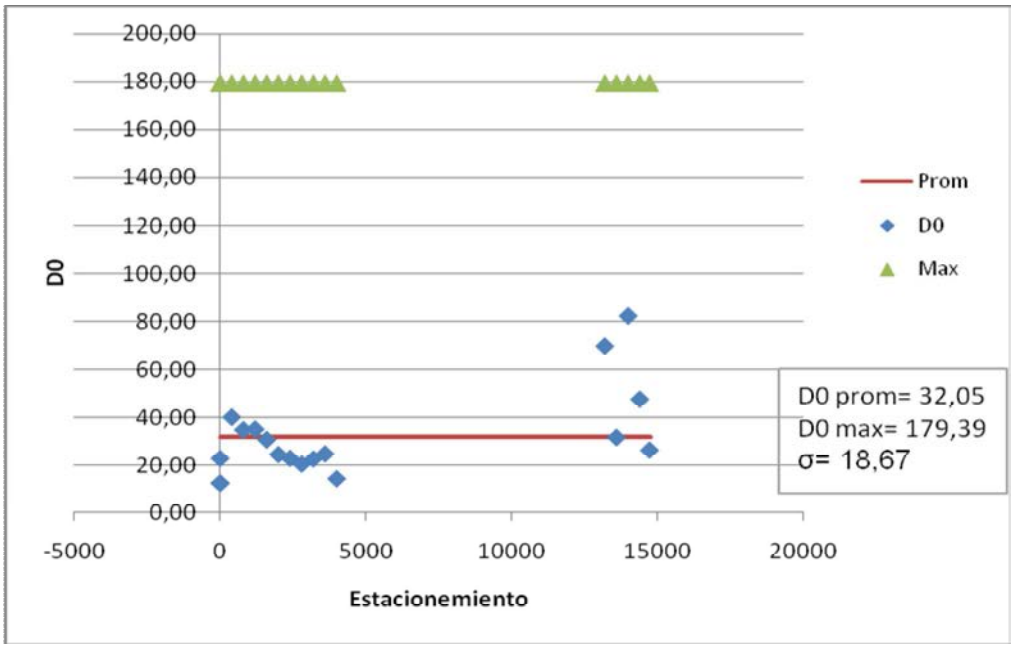
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	10.8 (4.26)	689.7 (100000)
BG	0.35	22.86 (9)	144.8 (21000)
SBG	0.35	38.1 (15)	124.1 (18000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	124.1 (18000)

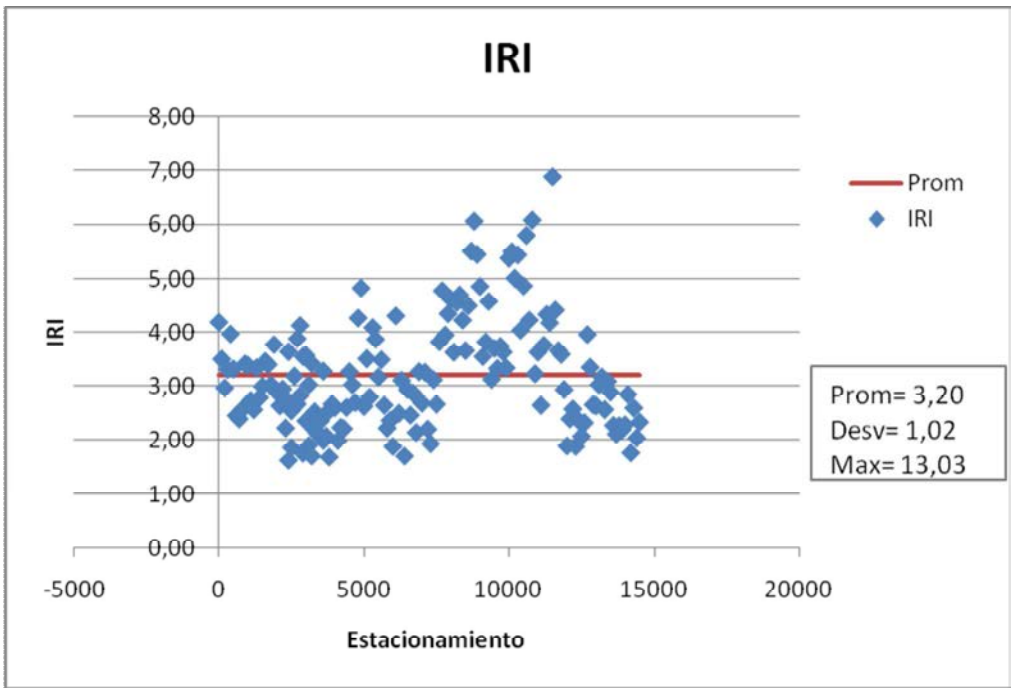




TH-29a

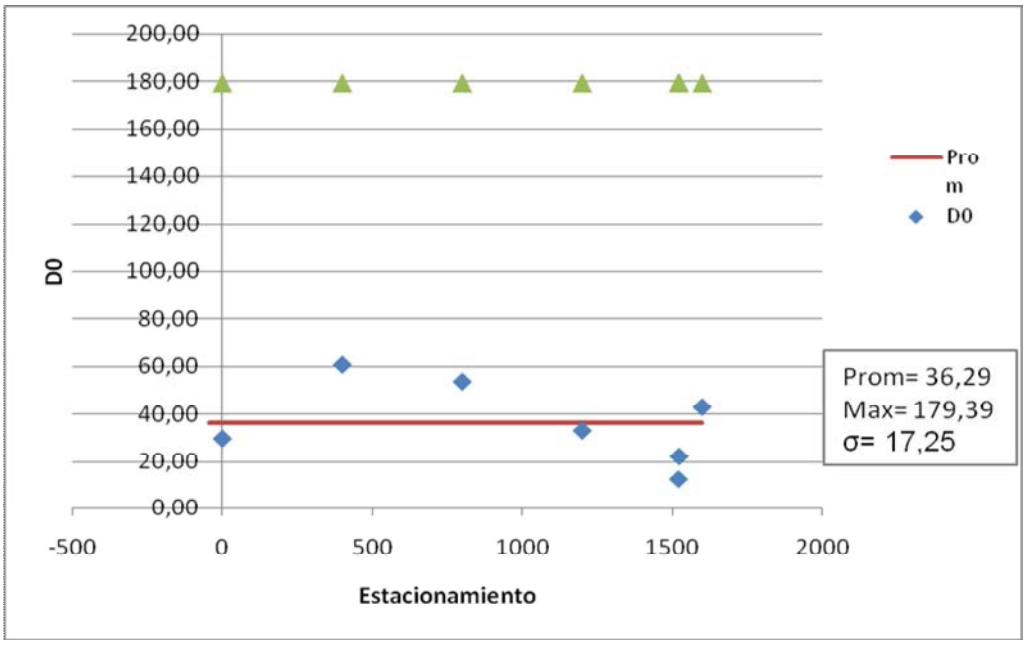
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	18.1 (7.14)	724.1 (105000)
BG	0.35	12.0 (4.72)	75.9 (11000)
SBG	0.35	9.0 (3.54)	72.4 (10500)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	109.7 (15900)

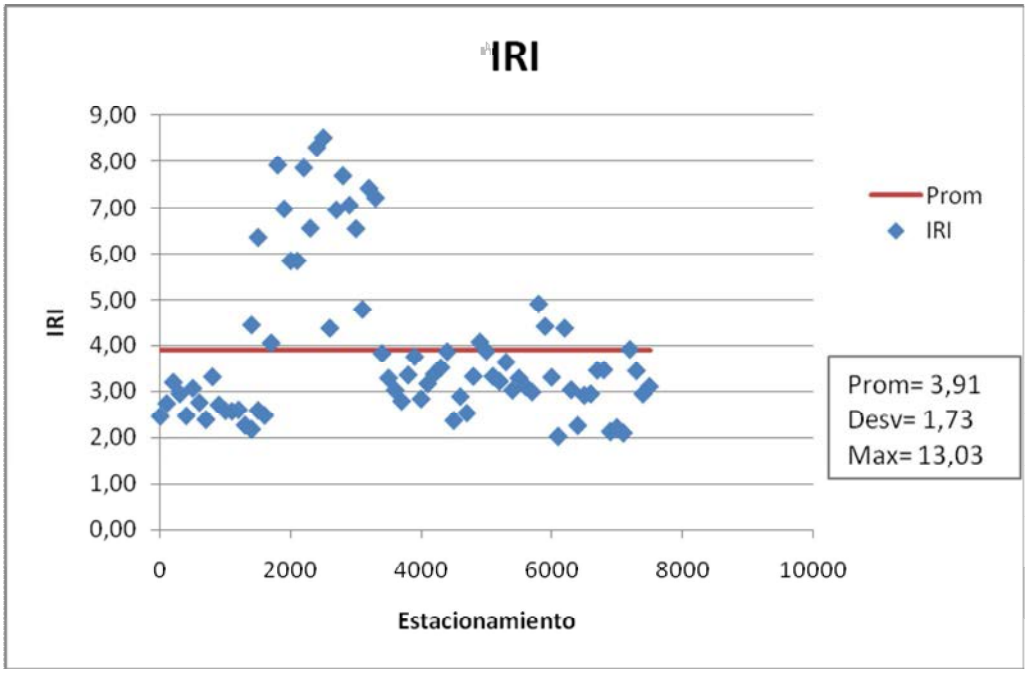




TH-59a

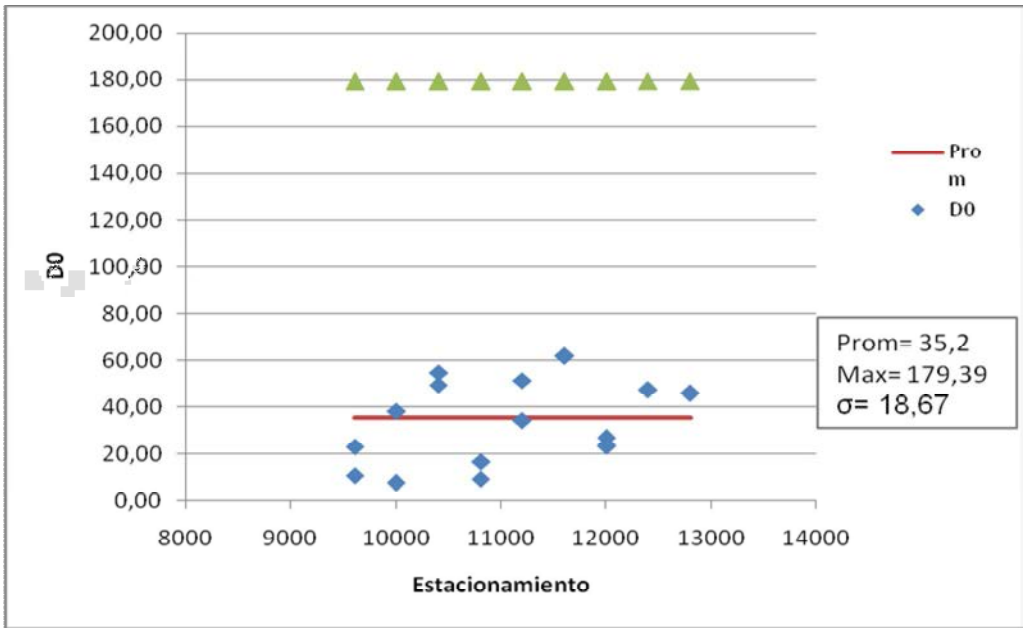
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	18.1 (7.14)	620.7 (90000)
BG	0.35	12.0 (4.72)	72.4 (10500)
SBG	0.35	9.0 (3.54)	69.0 (10000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	137.9 (20000)

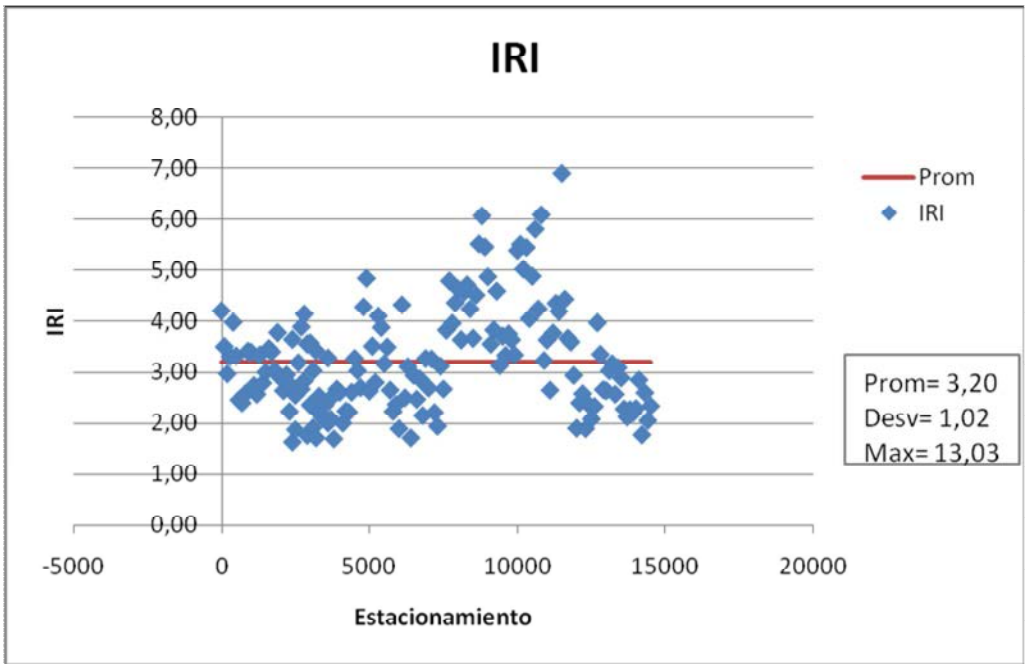




TH-29b

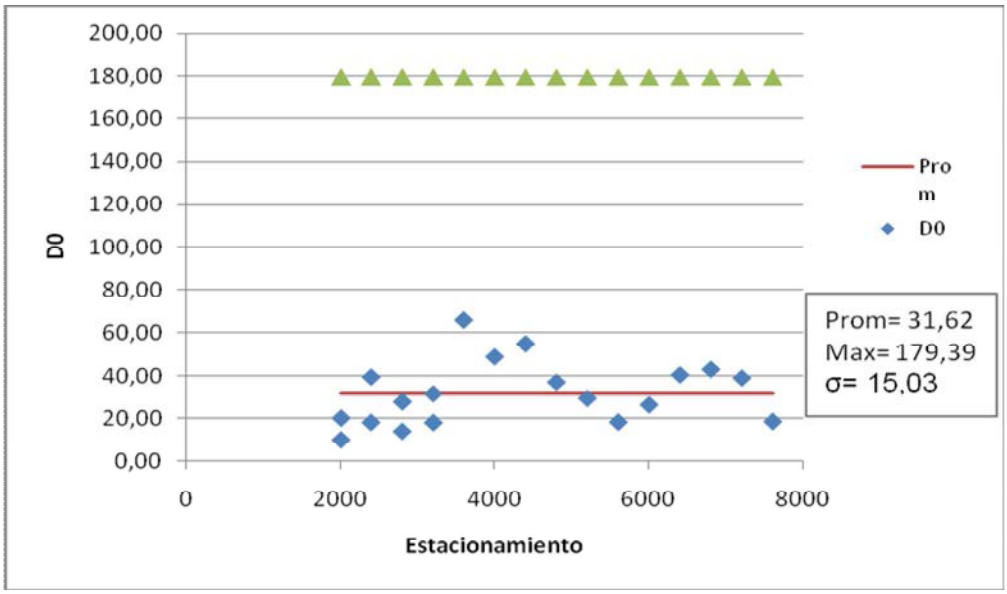
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	19.7 (7.35)	965.5 (140000)
BG	0.35	12.5 (4.92)	103.4 (15000)
SBG	0.35	25.4 (10)	75.9 (11000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	62.1 (9000)

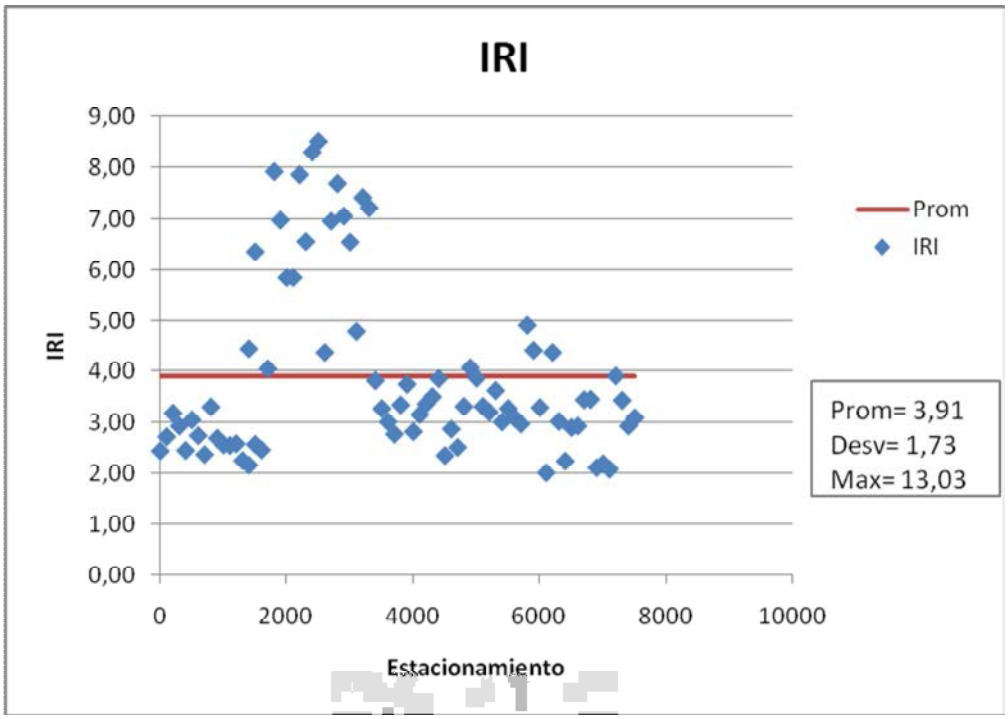




TH-59b

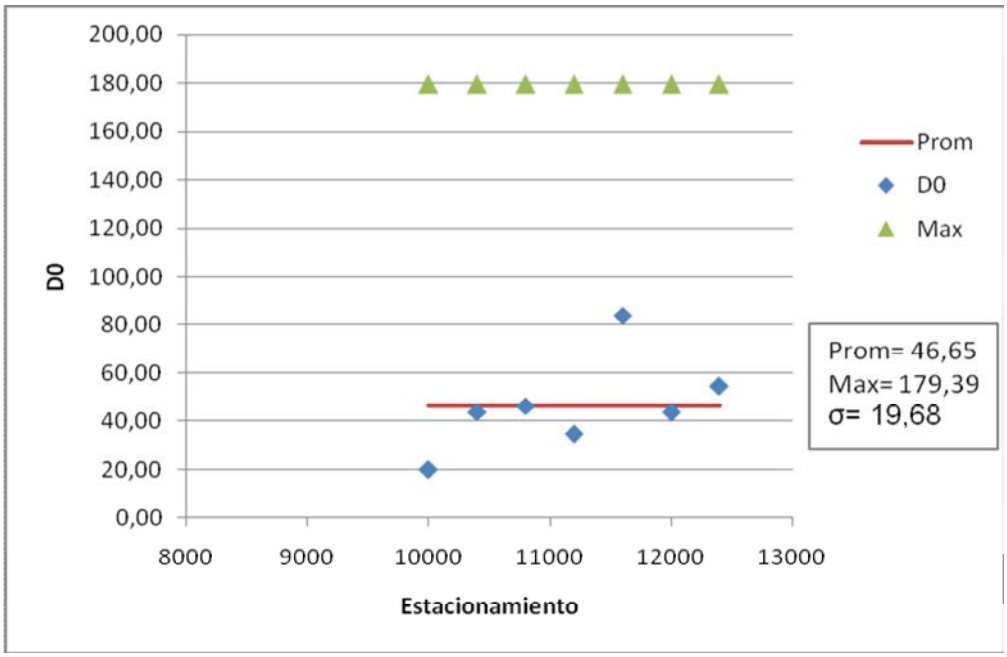
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	34.8 (13.72)	462.1 (67000)
BG	0.35	13.0 (5.12)	75.9 (11000)
SBG	0.35	23.3 (9.17)	77.2 (11200)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	105.5 (15300)

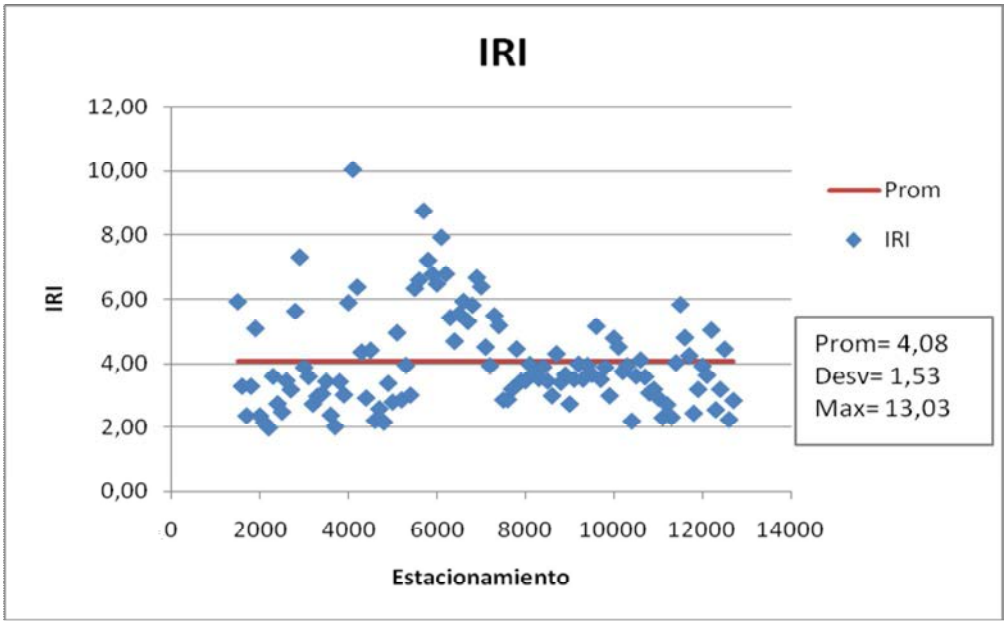




TIPO 3 (TPDA moderado-bajo - < 20 000, carpeta asfáltica + base estabilizada)
TH-61

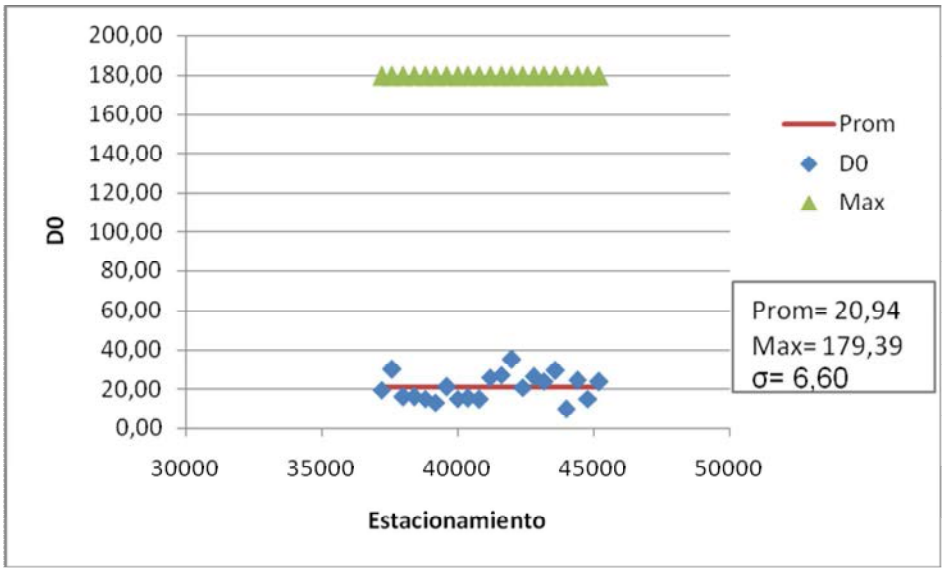
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	12.7 (5)	827.6 (120000)
B. ASF.MA	0.35	12.7 (5)	137.9 (20000)
SBG	0.35	17.8 (7)	96.6 (14000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	69.0 (10000)

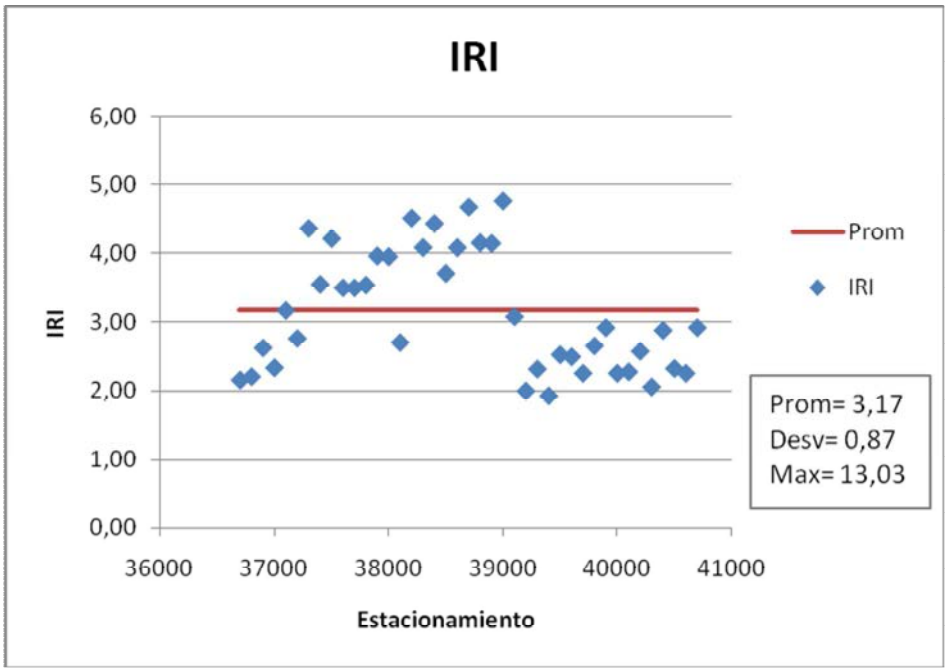




TH-12

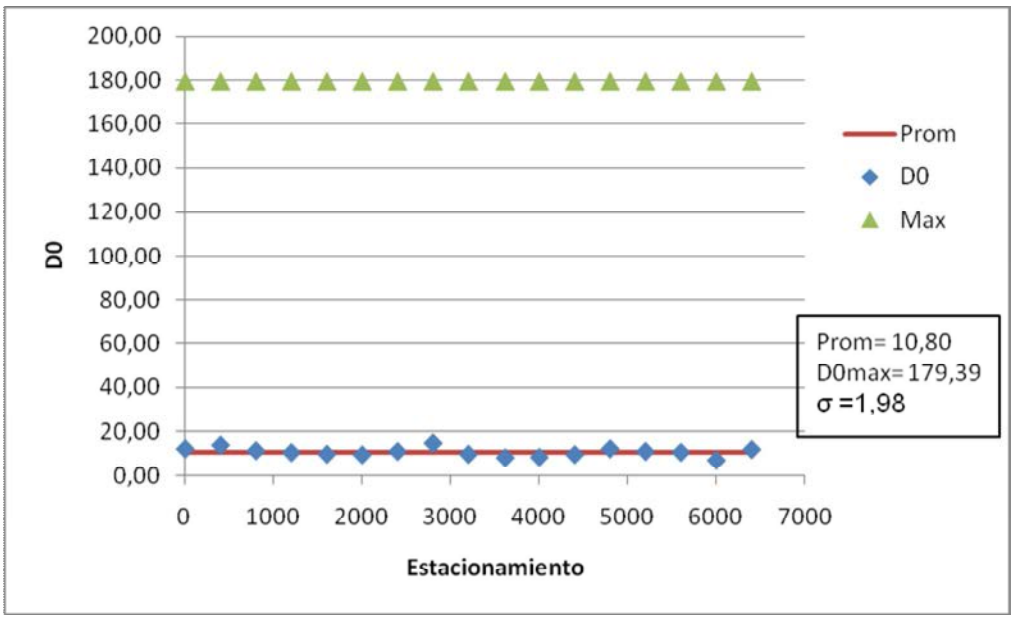
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	21.6 (8.49)	758.6 (110000)
BE	0.18	15.0 (5.91)	1379.3 (200000)
SBG	0.35	9.0 (3.54)	82.8 (12000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	155.2 (22500)

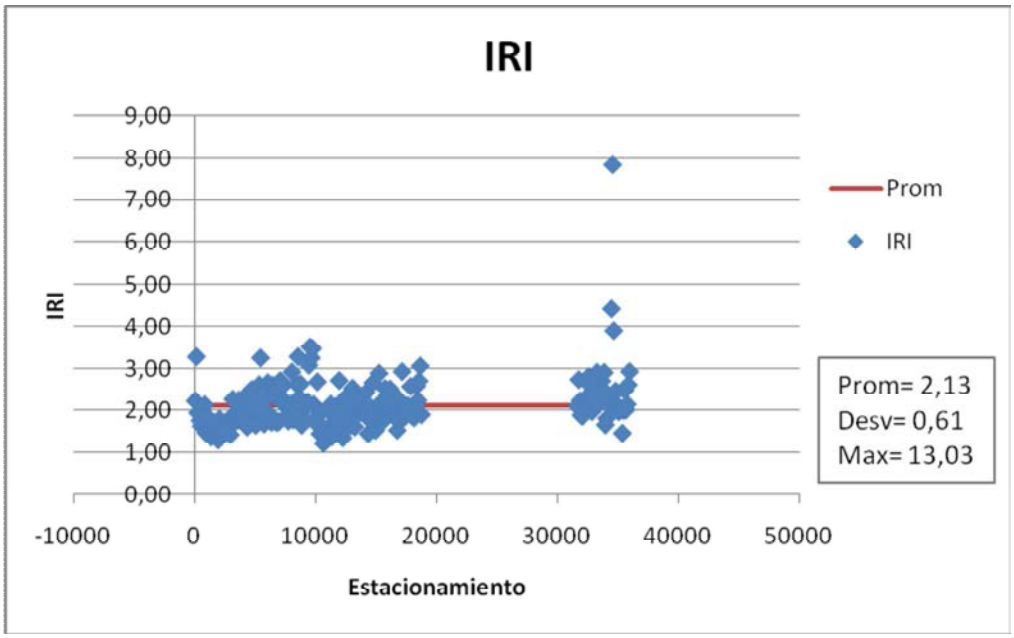




TH-44b

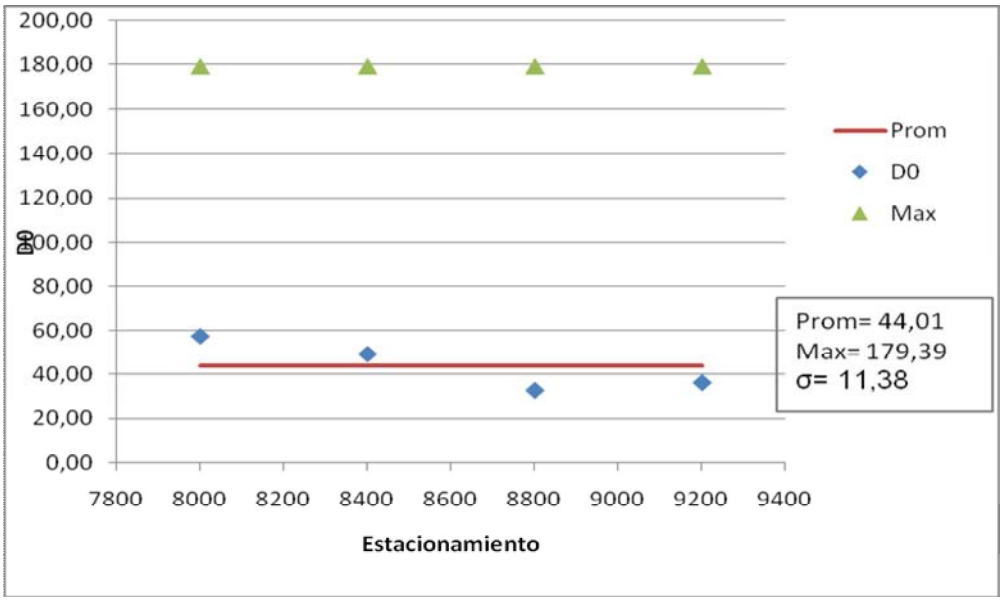
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	14.1 (5.57)	5862.1 (850000)
BE	0.18	18.0 (7.09)	6758.6 (980000)
SBEST	0.35	20.0 (7.87)	172.4 (25000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	144.8 (21000)

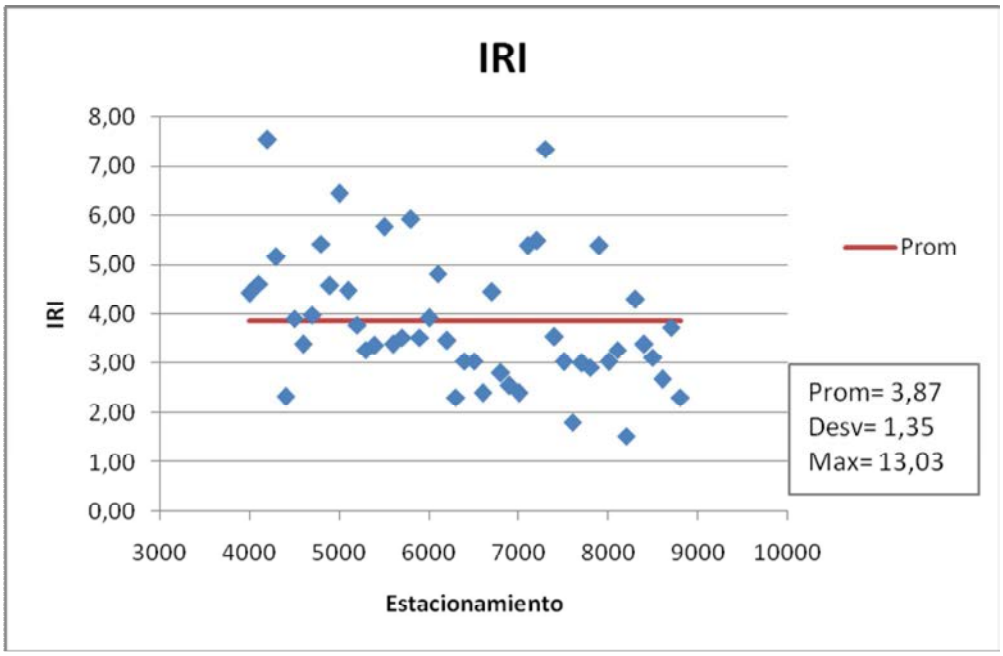




TIPO 4 (TPDA moderado-bajo - < 20 000, carpeta asfáltica + base granular)
TH-85

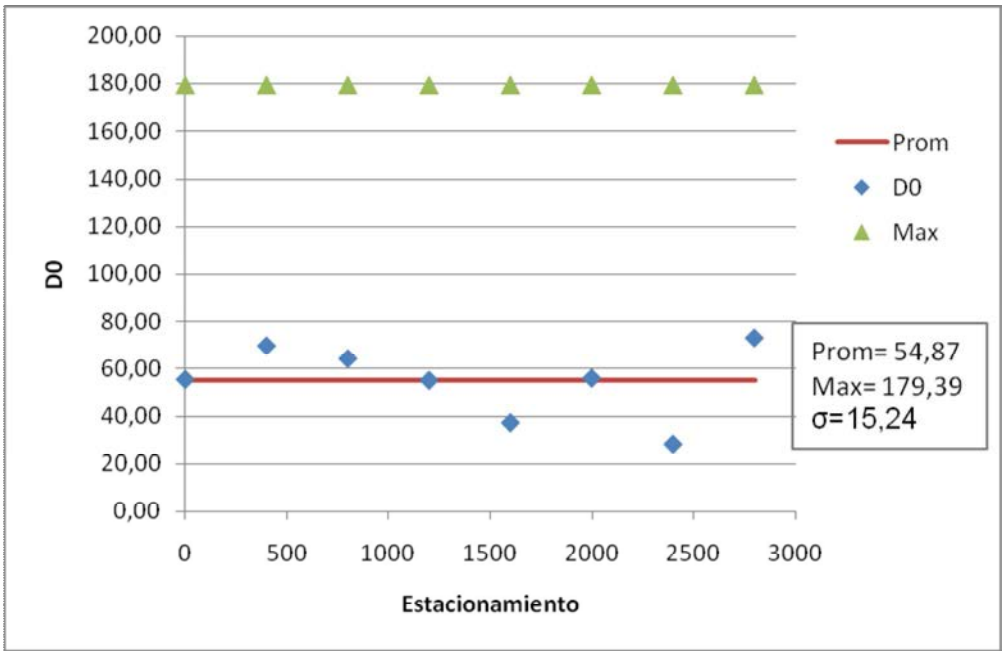
CAPA	MÓDULO POISSON	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	12.7 (5)	606.9 (88000)
BG	0.35	12.7 (5)	200.0 (29000)
SBG	0.35	17.8 (7)	193.1 (28000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	103.4 (15000)

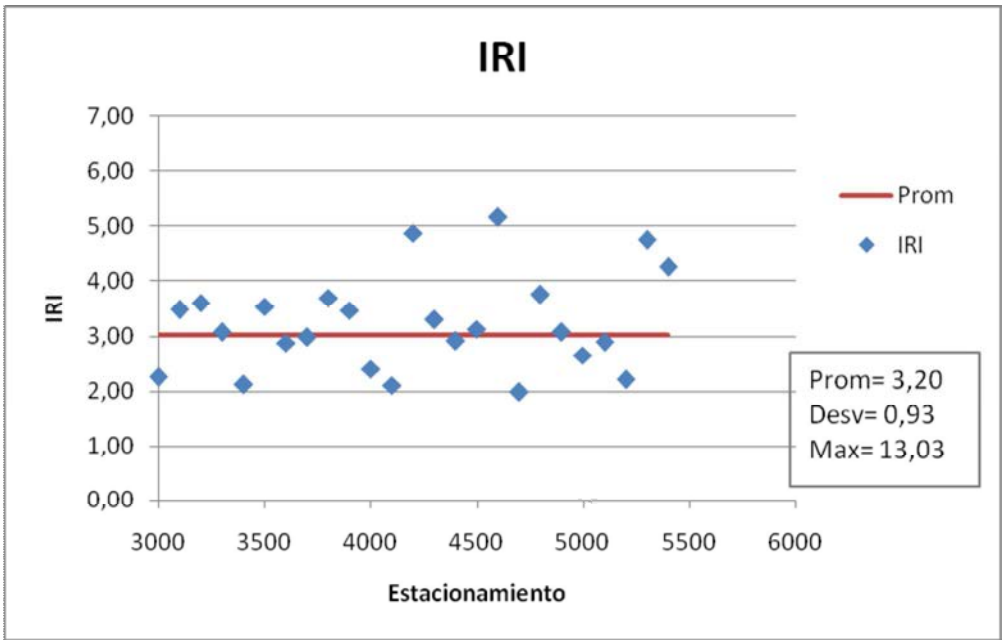




TH-197

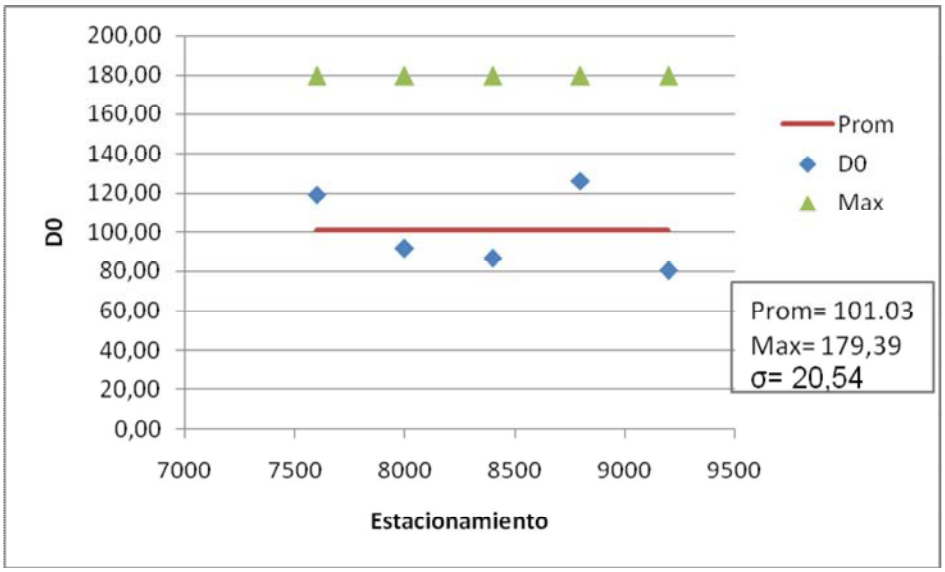
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	12.7 (5)	689.7 (100000)
BG	0.35	10.2 (4)	89.7 (13000)
SBG	0.35	20.3 (8)	110.3 (16000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	95.9 (13900)

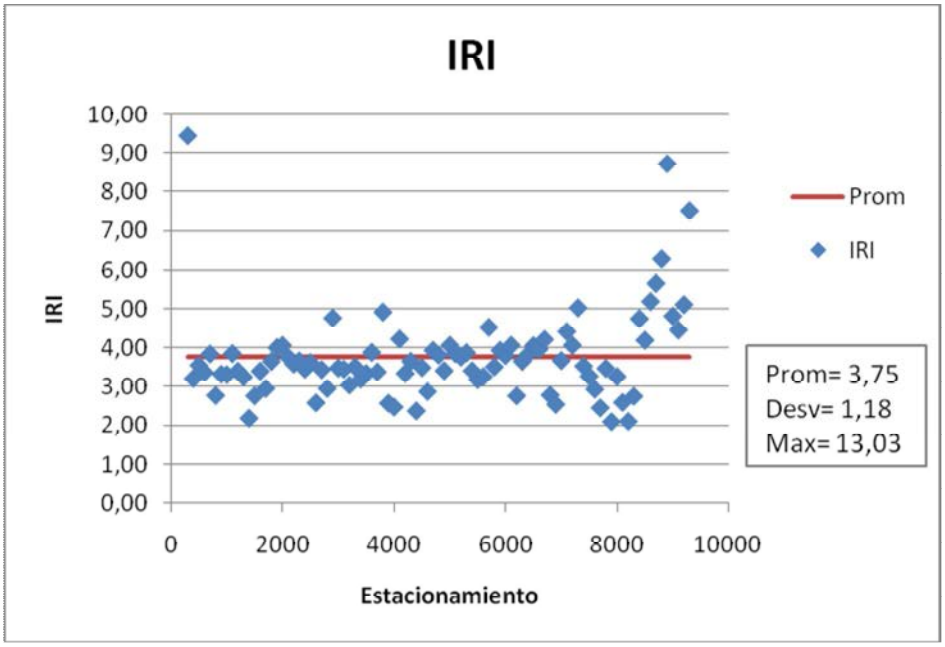




TH-206

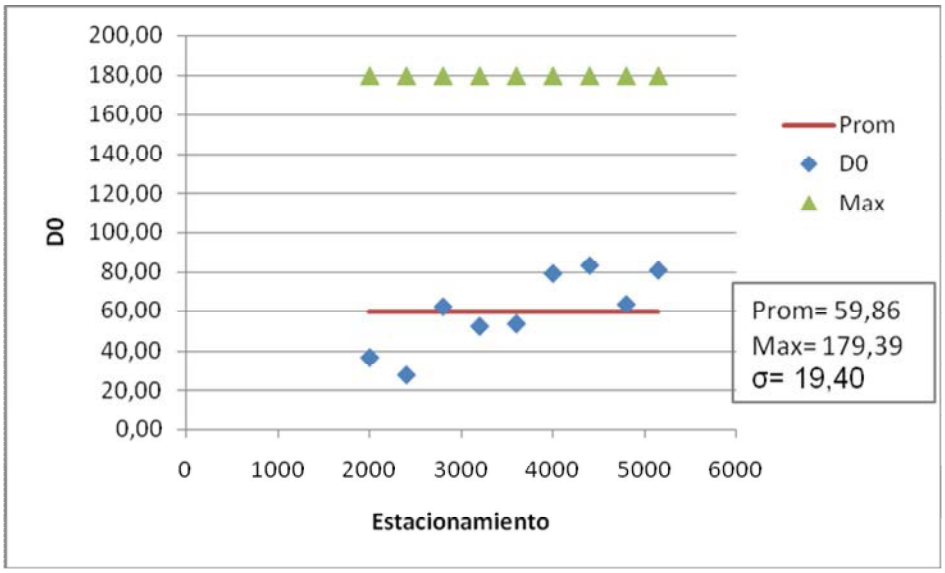
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	8.6 (3.37)	413.8 (60000)
BG	0.35	5.1 (2)	75.9 (11000)
SBG	0.35	20.3 (8)	75.9 (11000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	89.7 (13000)

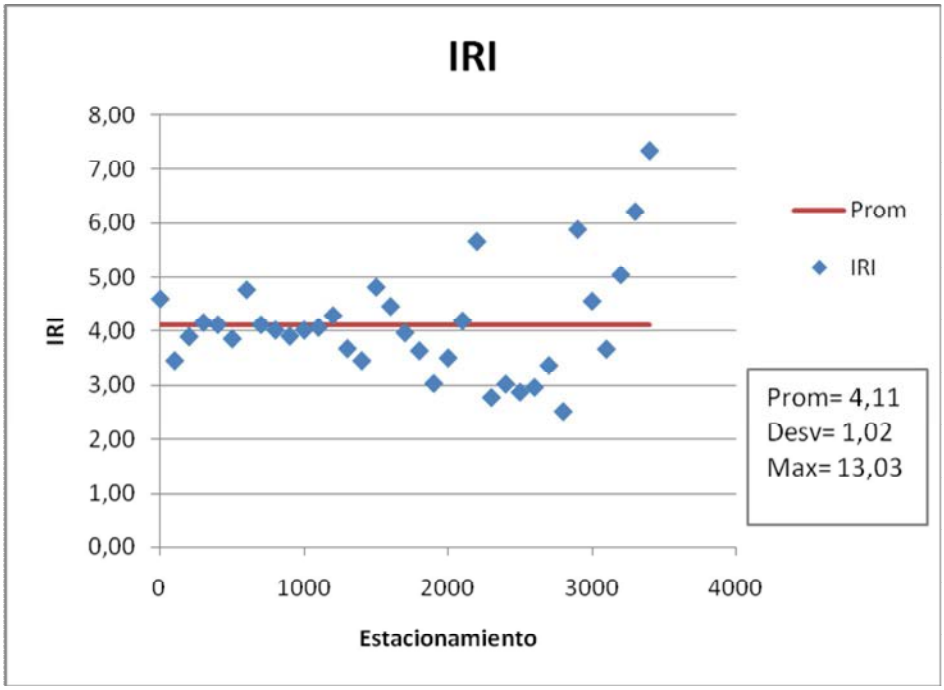




TH-215

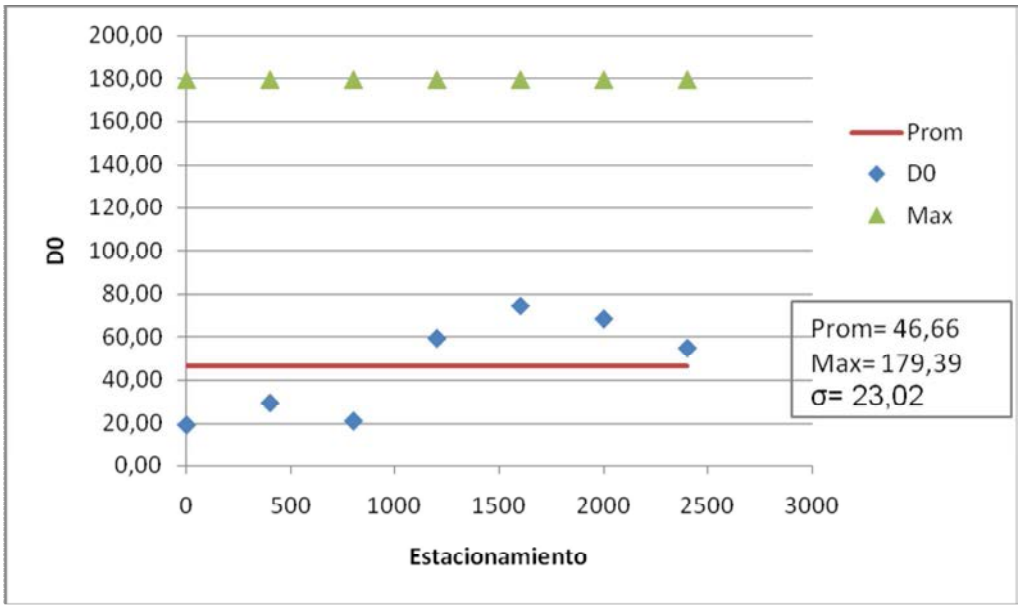
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	6.8 (2.66)	551.7 (80000)
BG	0.35	10.2 (4)	241.4 (35000)
SBG	0.35	7.6 (3)	172.4 (25000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	79.3 (11500)

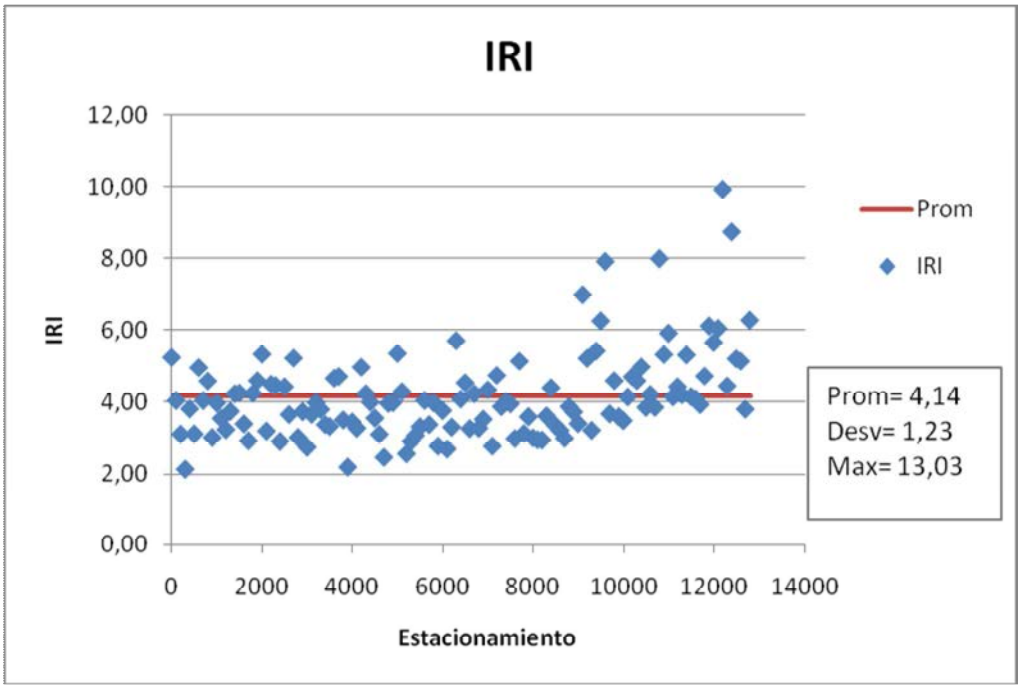




TH-231a

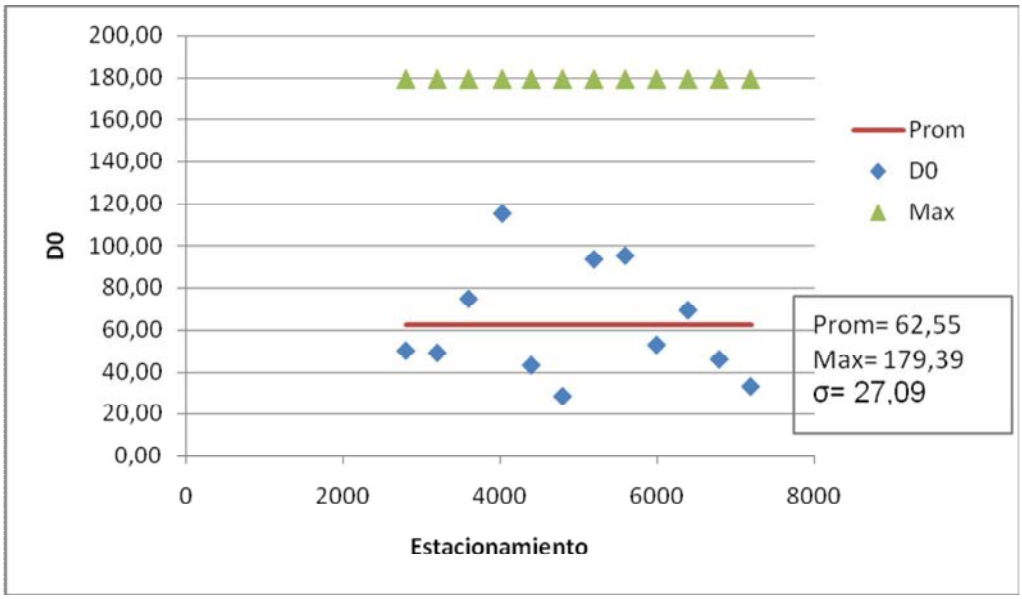
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	13.3 (5.25)	689.7 (100000)
BG	0.35	7.6 (3)	79.3 (11500)
SBG	0.35	15.2 (6)	96.6 (14000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	82.8 (12000)

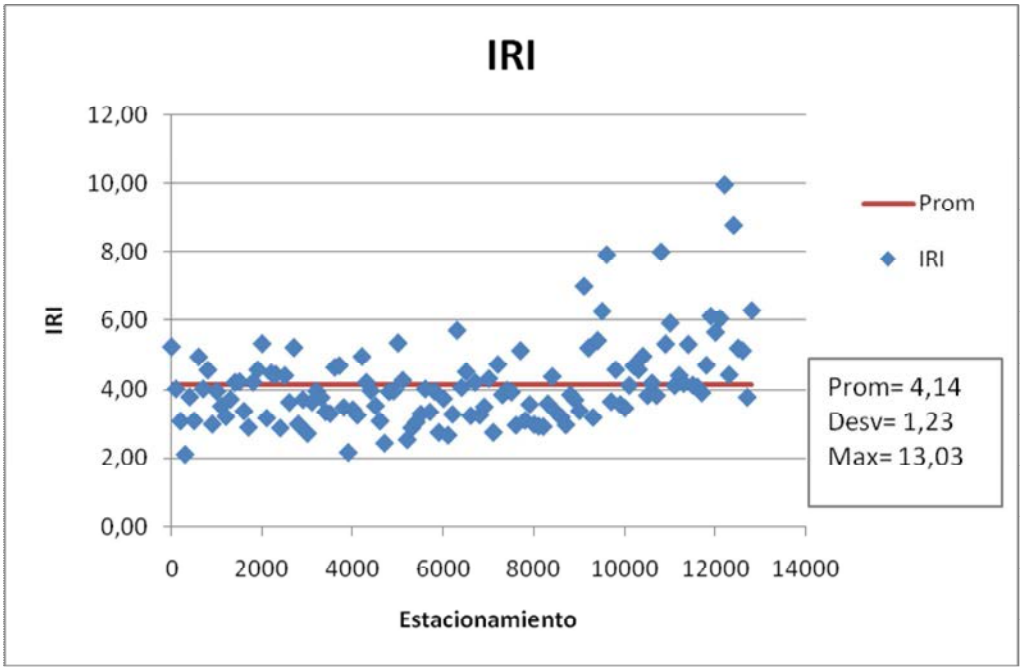




TH-231b

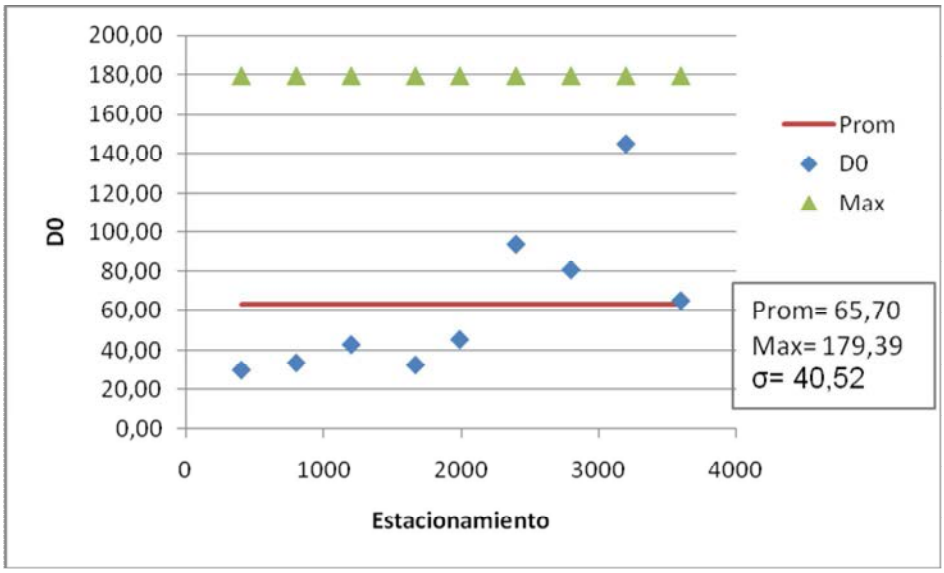
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	9.2 (3.64)	689.7 (100000)
BG	0.35	15.2 (6)	82.8 (12000)
SBG	0.35	30.5 (12)	79.3 (11500)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	72.4 (10500)

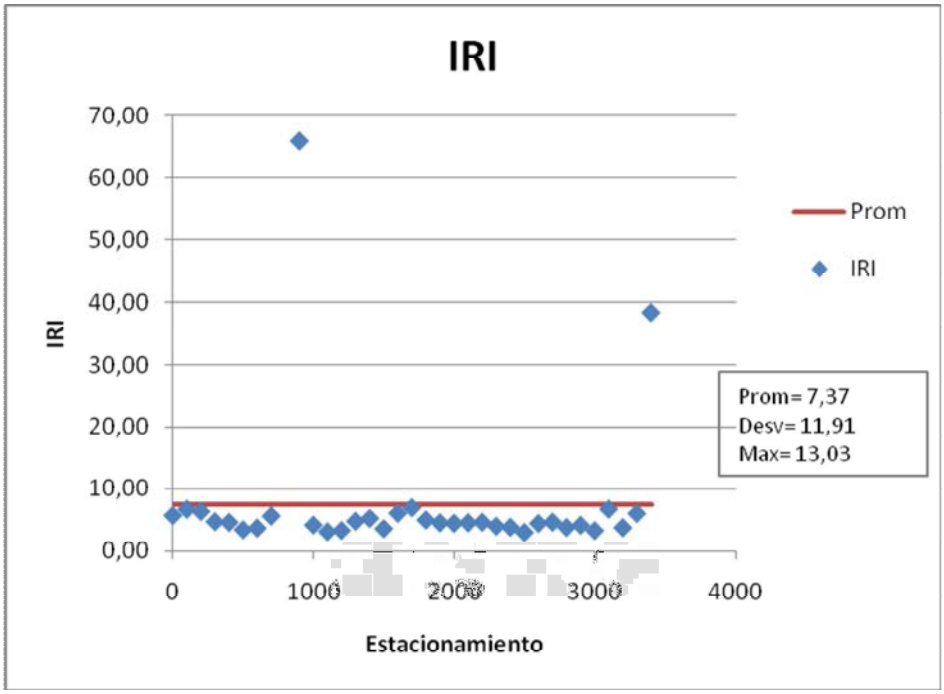




TH-374

CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	7.7 (3.05)	620.7 (90000)
BG	0.35	10.0 (3.94)	134.5 (19500)
SBG	0.35	7.0 (2.76)	82.8 (12000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	51.7 (7500)

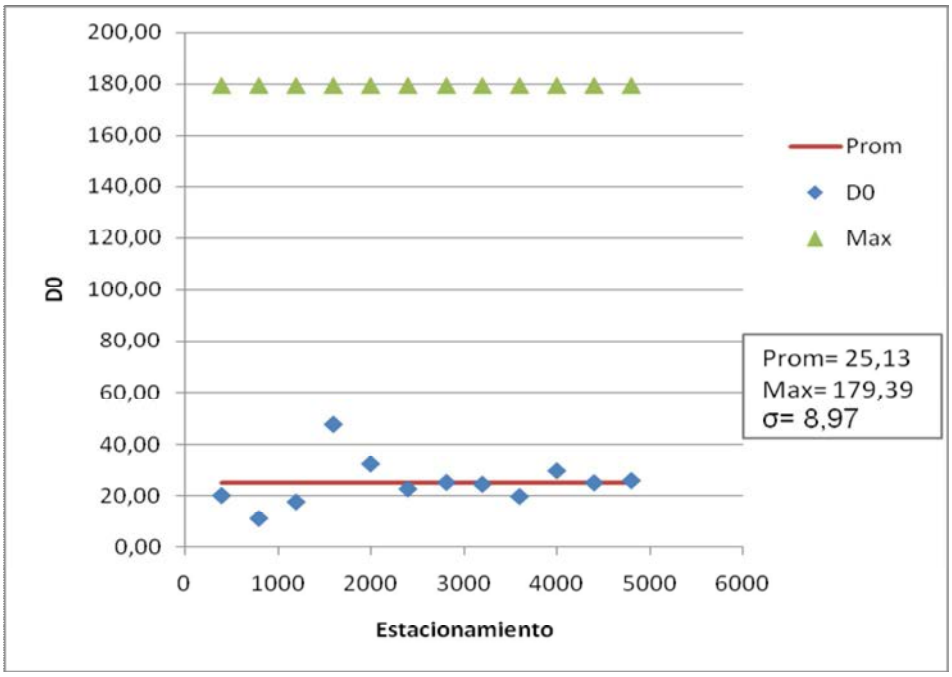


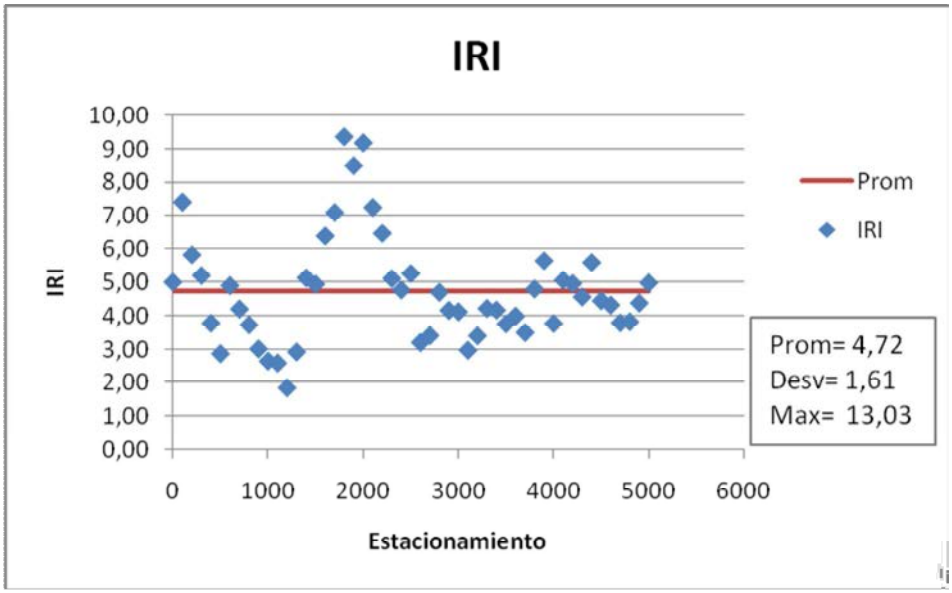


Promedio de 4.57 y desviación estándar de 1.12 si se eliminan los extremos.

TH-405

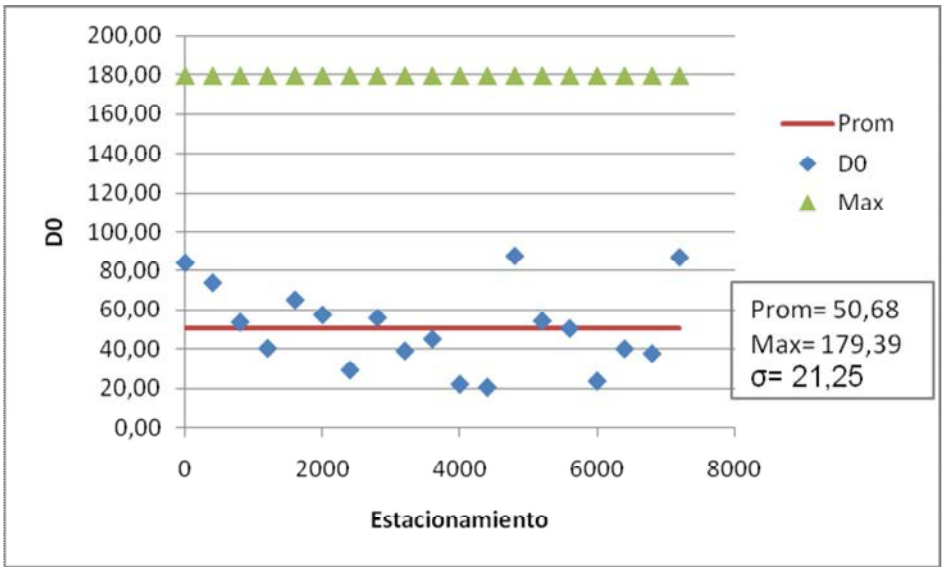
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	20.6 (8.11)	2413.8 (350000)
BG	0.35	12.0 (4.72)	172.4 (25000)
SBG	0.35	20.0 (7.87)	106.9 (15500)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	77.9 (11300)

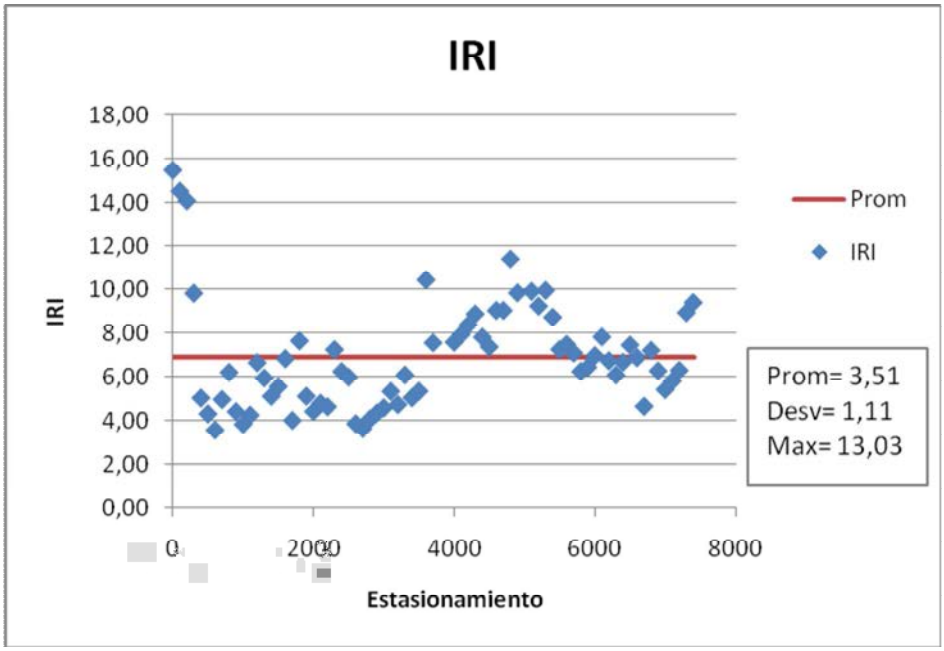




TH-443

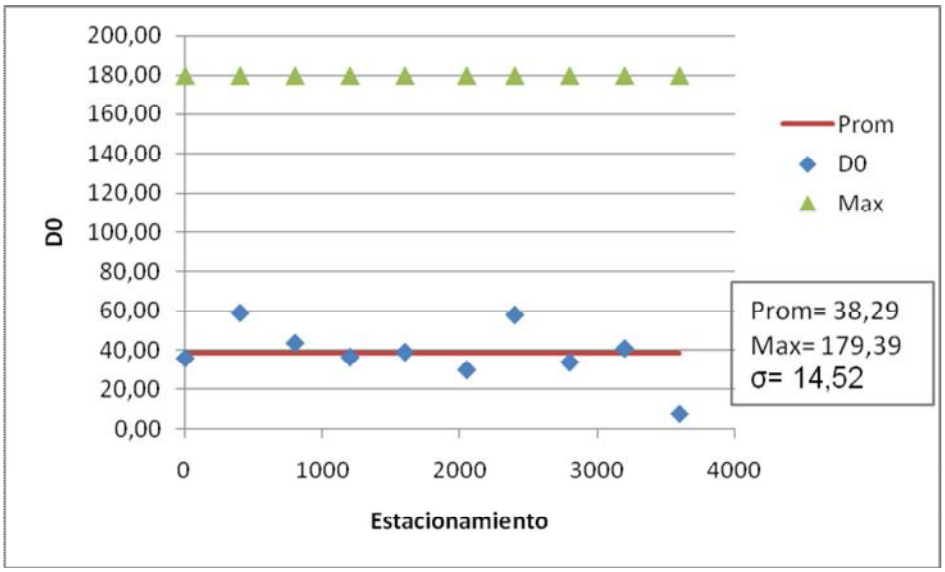
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	13.6 (5.34)	862.1 (125000)
BG	0.35	14.0 (5.51)	103.4 (15000)
SBG	0.35	13.0 (5.12)	75.9 (11000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	66.9 (9700)

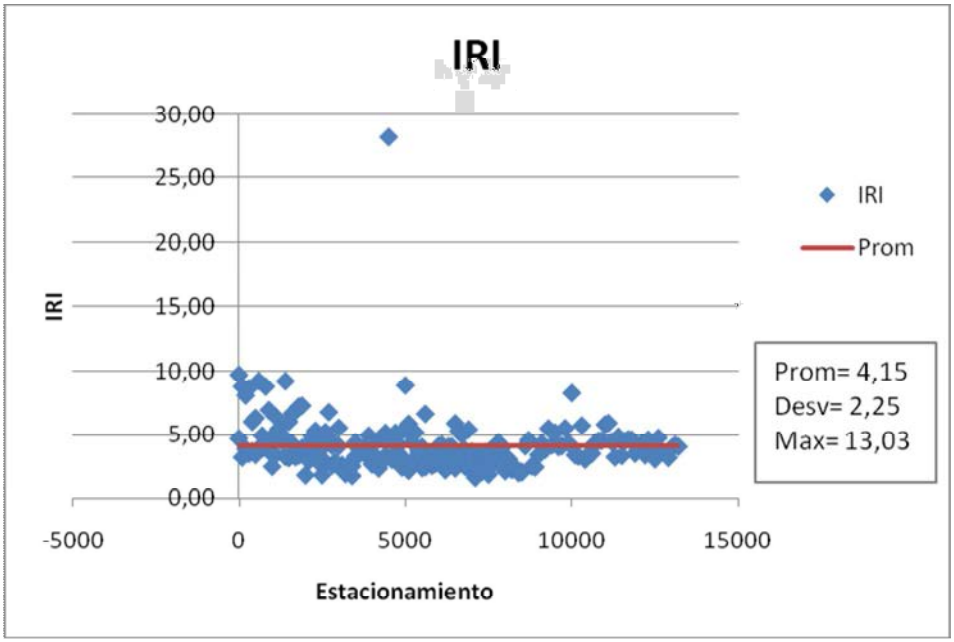




TH-346a

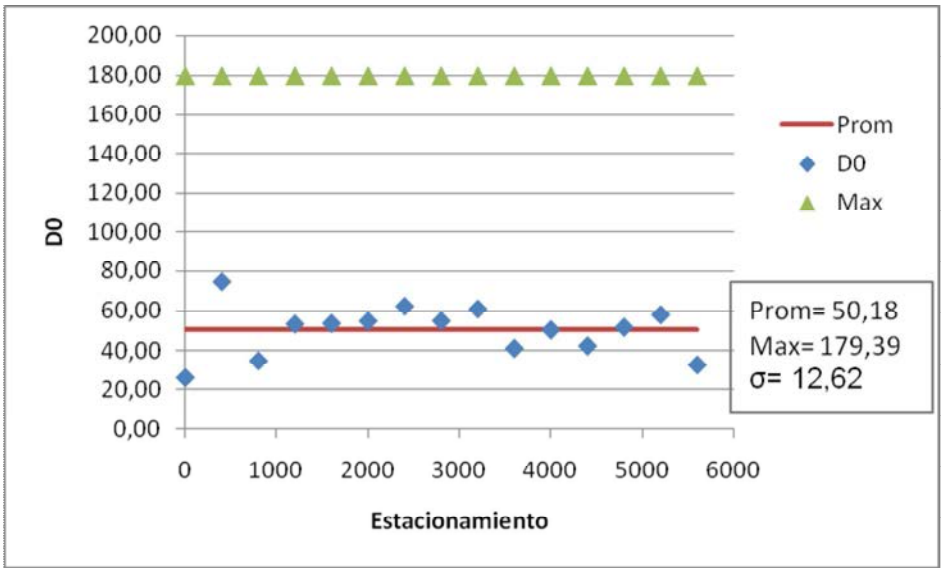
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	7.7 (3.04)	3103.4 (450000)
BG	0.35	18.0 (7.09)	172.4 (25000)
SBG	0.35	57.2 (22.05)	113.8 (16500)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	82.8 (12000)

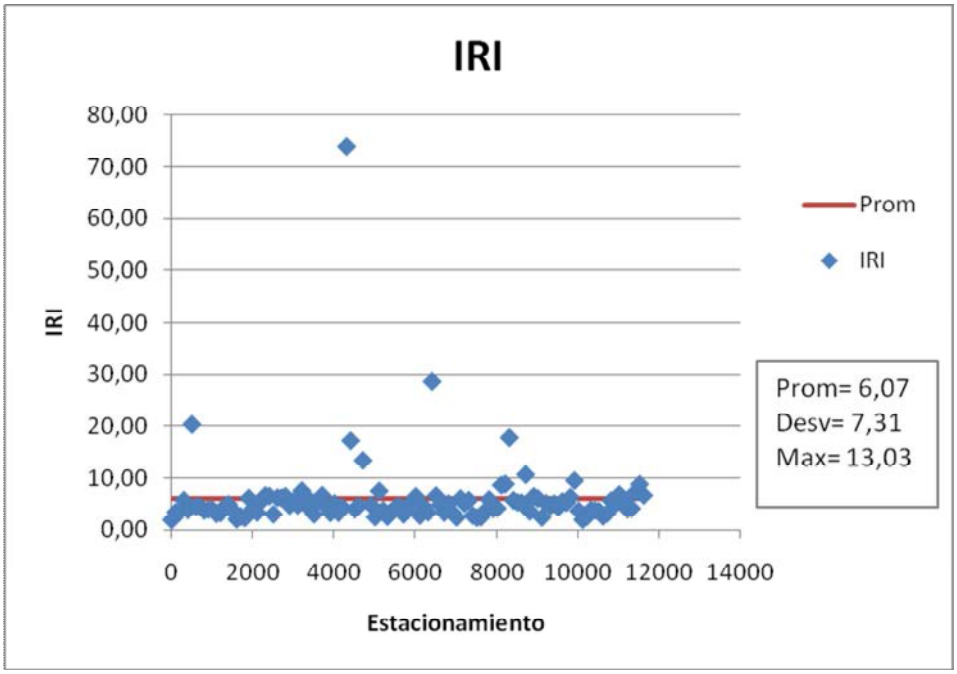




TH-135a

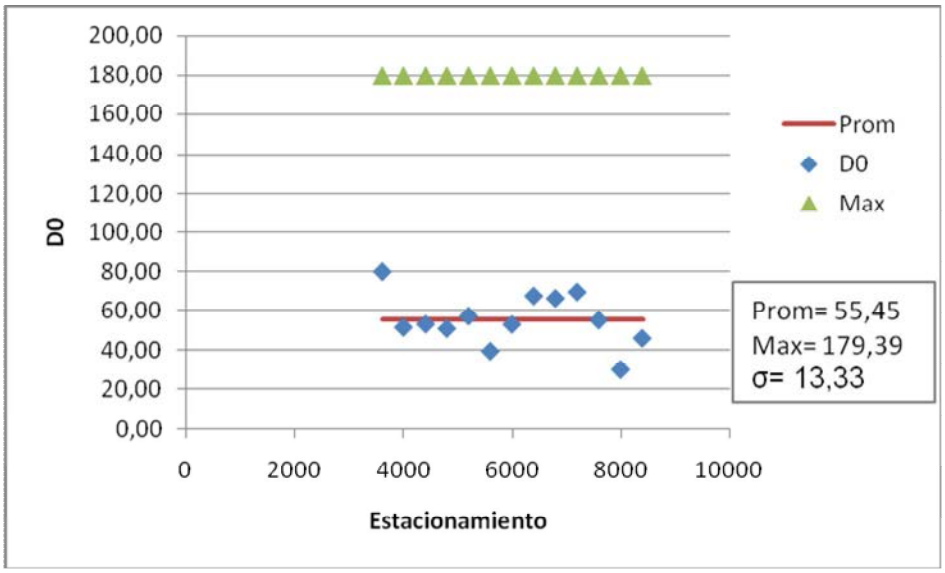
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	13.9 (5.47)	1034.5 (150000)
BG	0.35	21.0 (8.27)	96.6 (14000)
SBG	0.35	34.0 (13.39)	93.1 (13500)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	95.9 (13900)

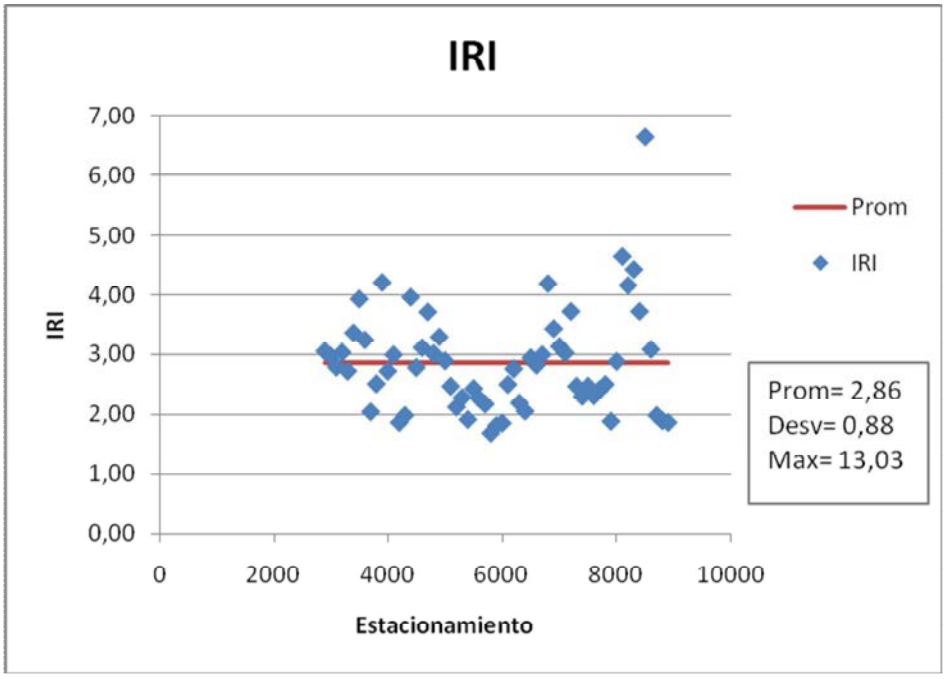




TH-105

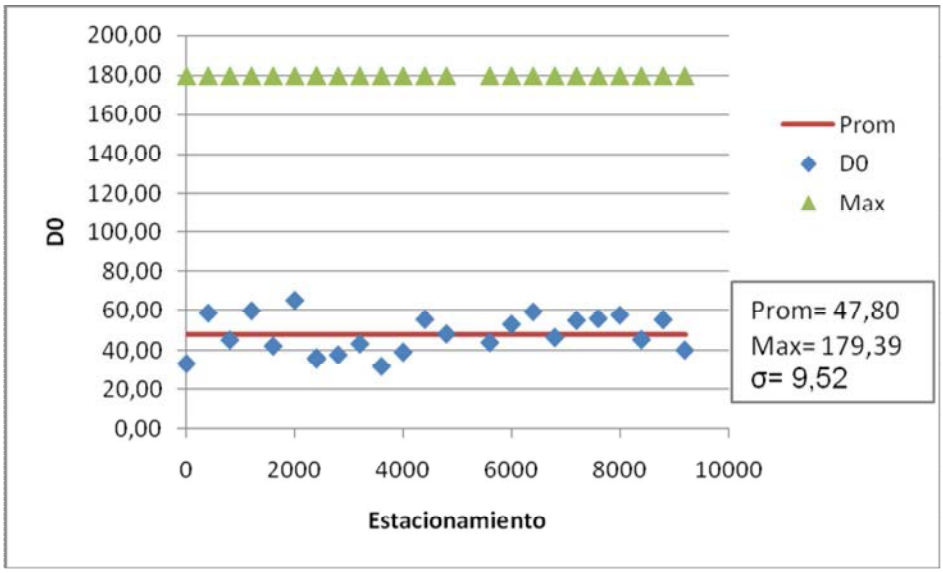
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	10.7 (4.23)	1034.5 (150000)
BG	0.35	14.0 (5.51)	137.9 (20000)
SBG	0.35	31.0 (12.2)	98.6 (14300)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	86.9 (12600)

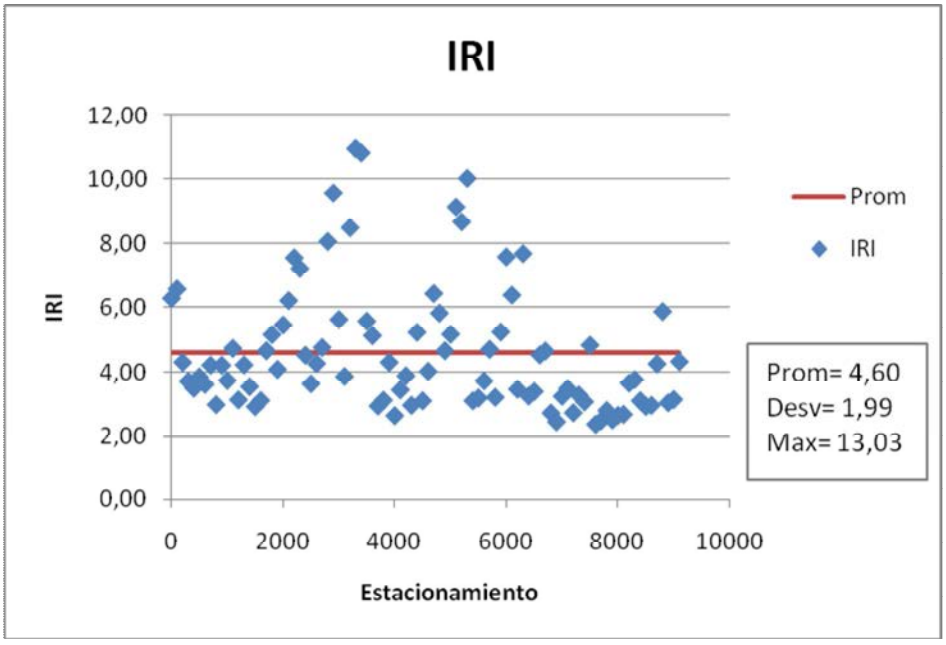




TH-241

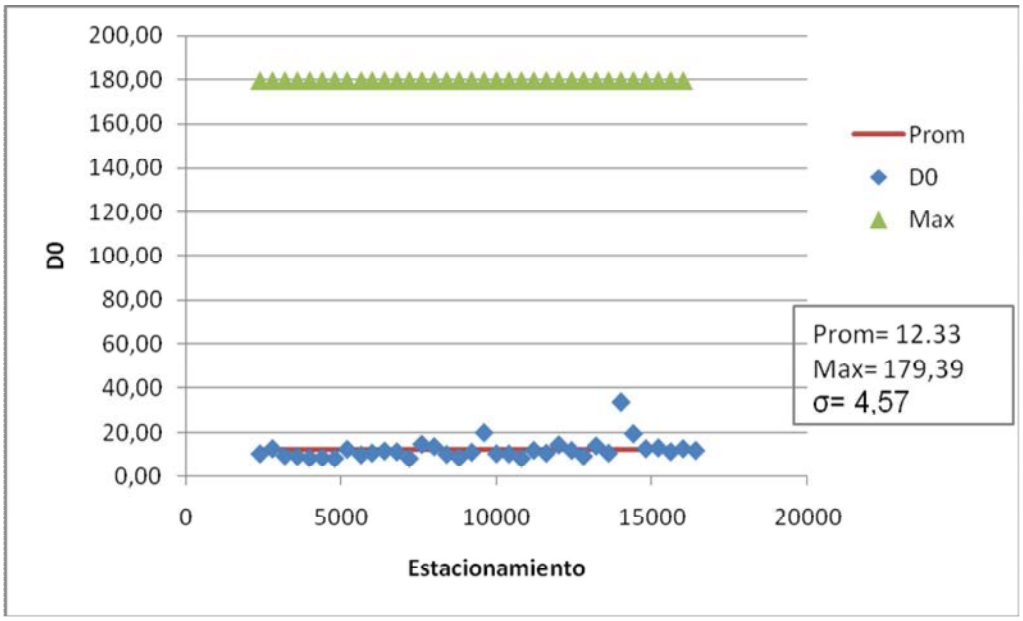
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	9.8 (3.86)	2620.7 (380000)
BG	0.35	15.0 (5.91)	110.3 (16000)
SBG	0.35	43.0 (16.93)	96.6 (14000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	95.9 (13900)

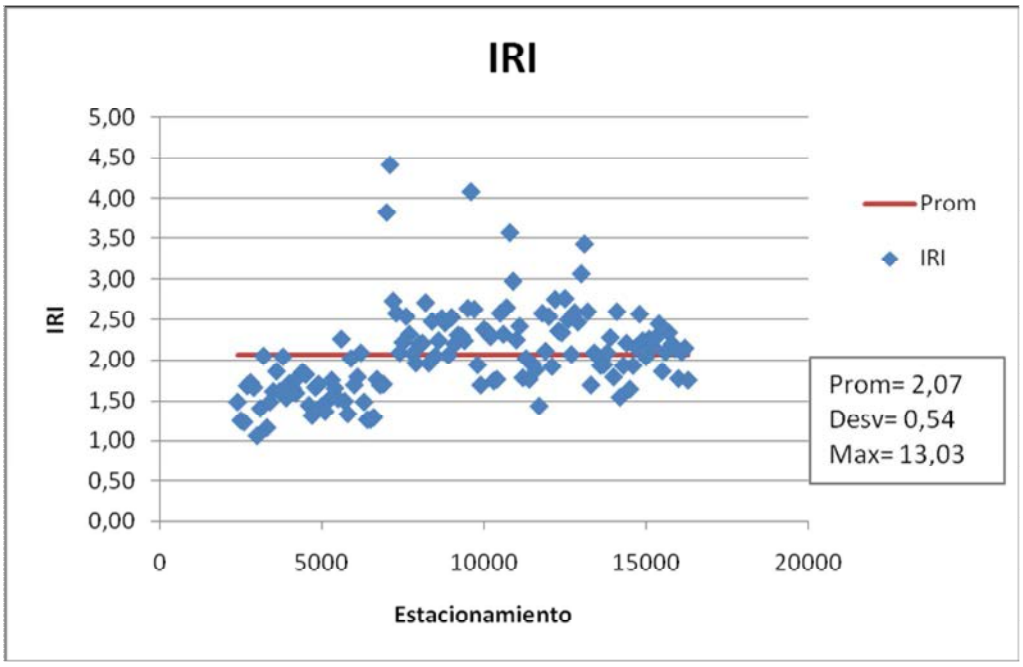




TH-41

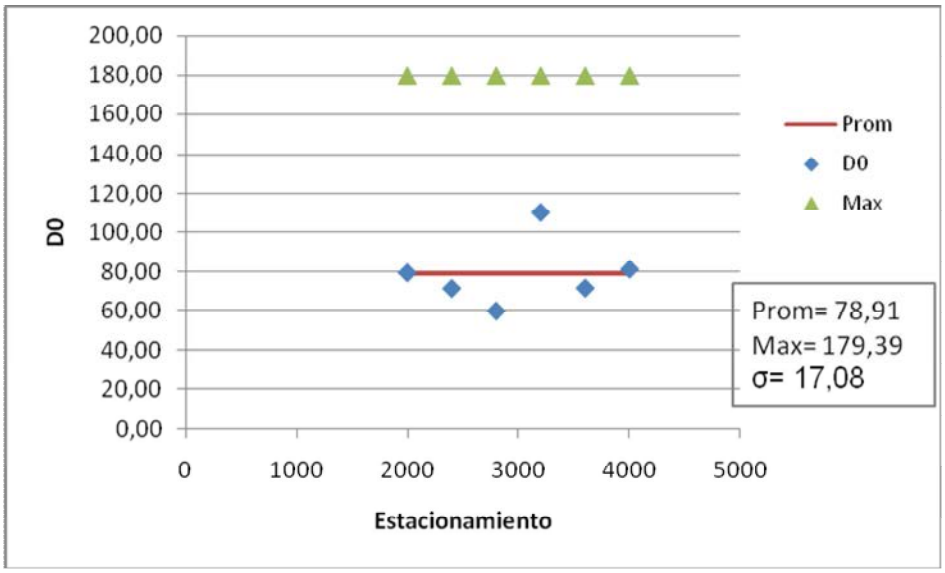
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	13.7 (5.38)	3448.3 (500000)
BG	0.35	28.0 (11.02)	1034.5 (150000)
SBG	0.35	11.0 (4.33)	172.4 (25000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	144.8 (21000)

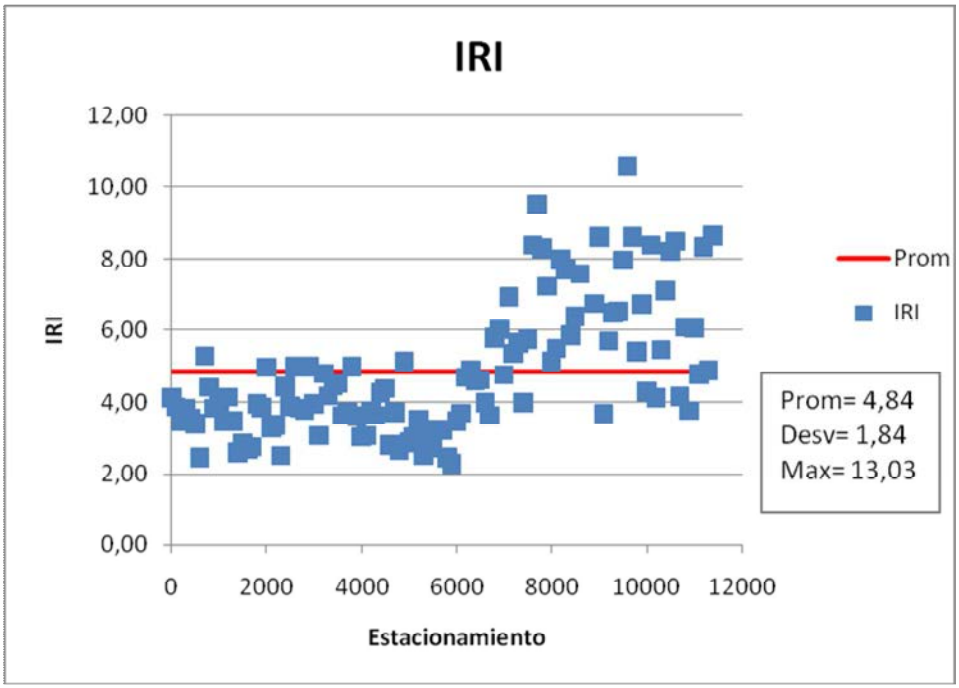




TIPO 5 (TPDA moderado-bajo- < 20 000, Tratamiento superficial + base granular)
TH-205a

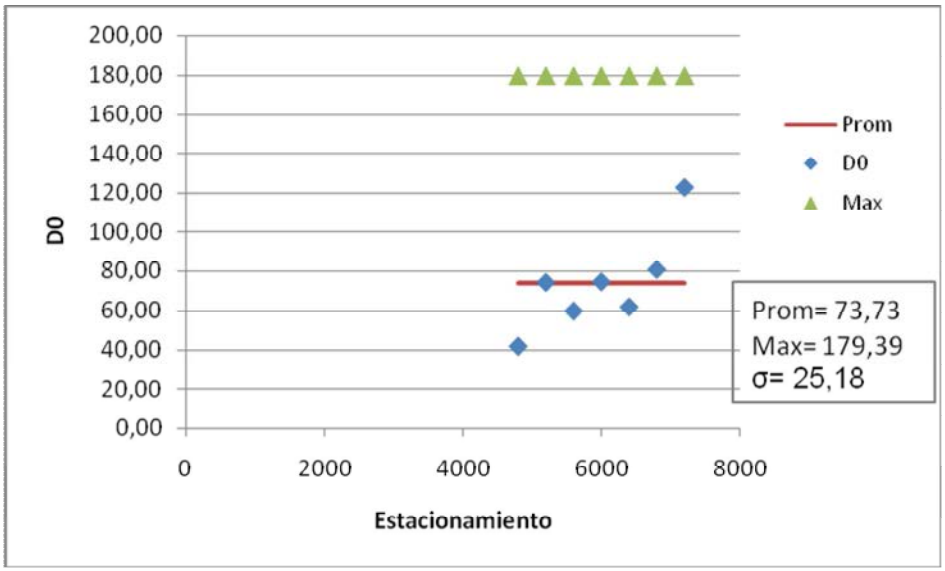
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
BG1	0.35	7.6 (3)	482.8 (70000)
BG2	0.35	7.6 (3)	117.2 (17000)
SBG	0.35	12.7 (5)	103.4 (15000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	109.0 (15800)

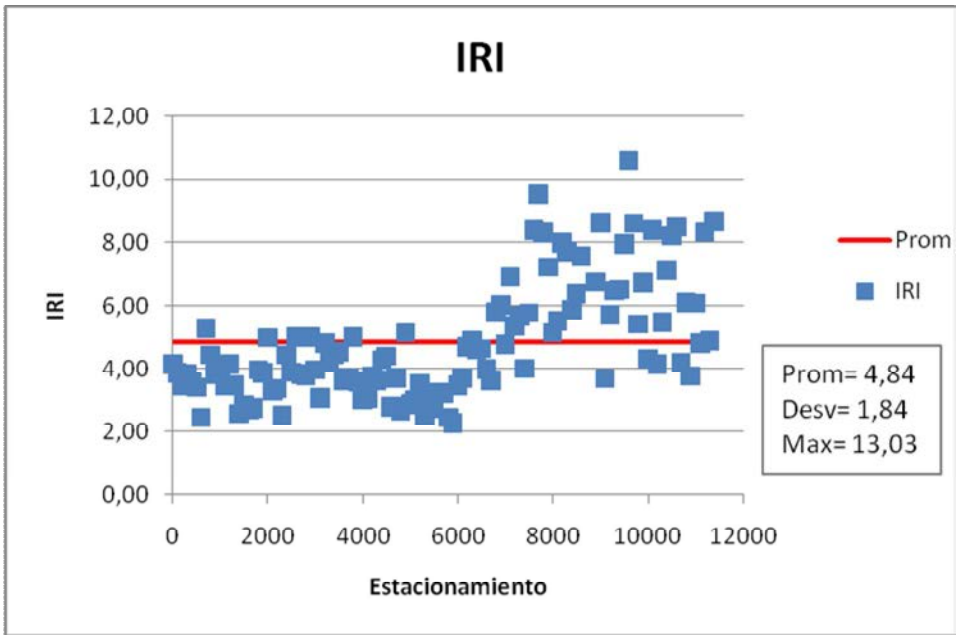




TH-205b

CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
BG1	0.35	10.2 (4)	241.4 (35000)
BG2	0.35	10.2 (4)	103.4 (15000)
SBG	0.35	5.1 (2)	89.7 (13000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	89.7 (13000)

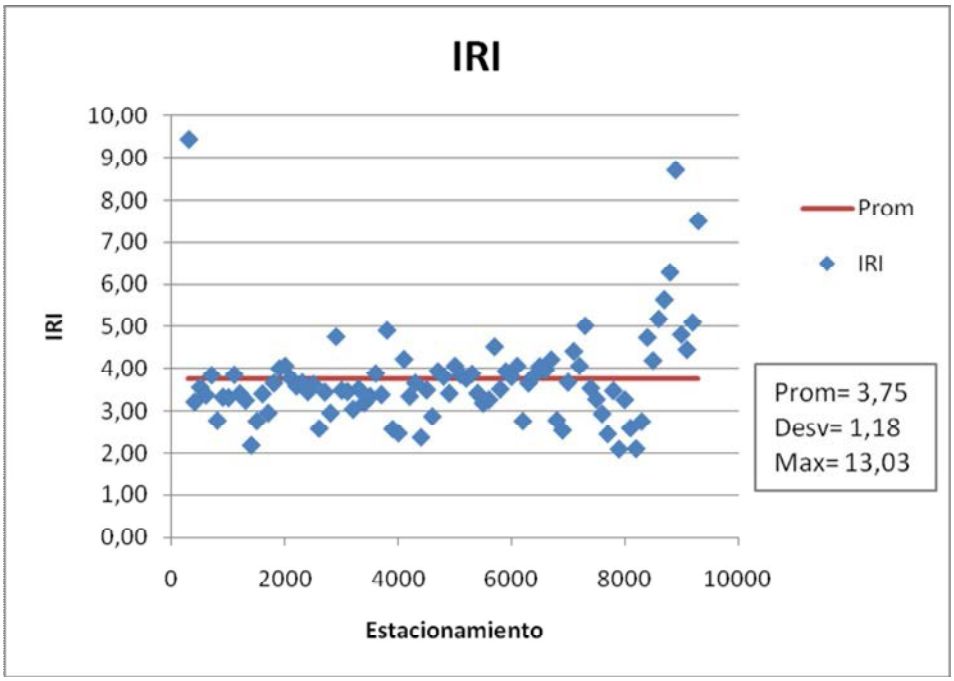




TH-206

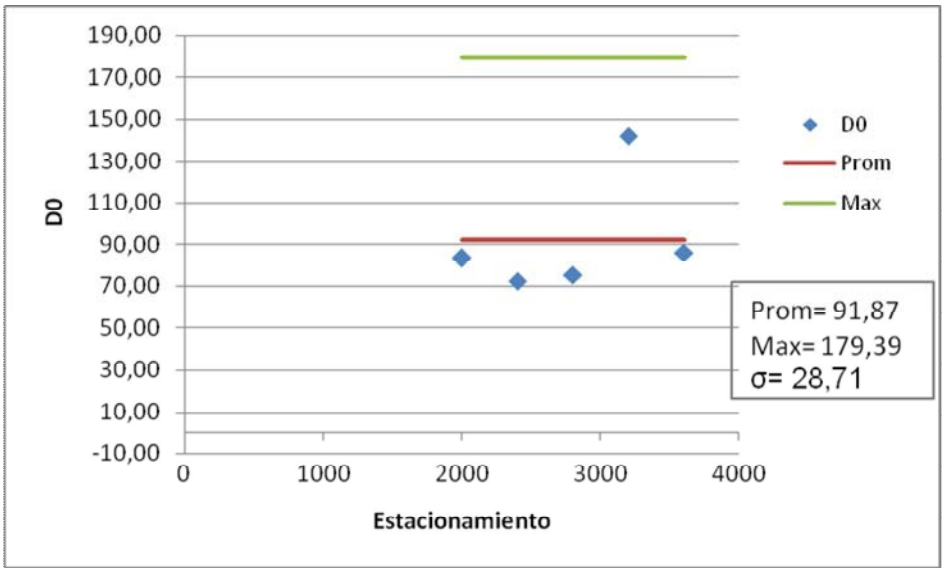
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
BG1	0.35	8.9 (3.5)	172.4 (25000)
BG2	0.35	8.9 (3.5)	82.8 (12000)
SBG	0.35	17.8 (7)	96.6 (14000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	79.3 (11500)

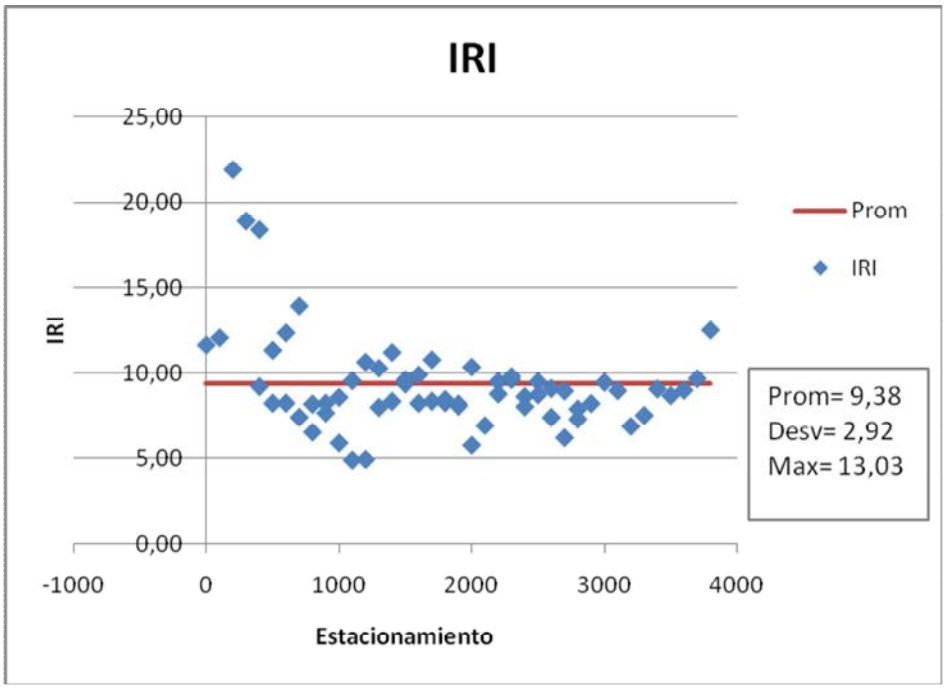
8



TH-220b

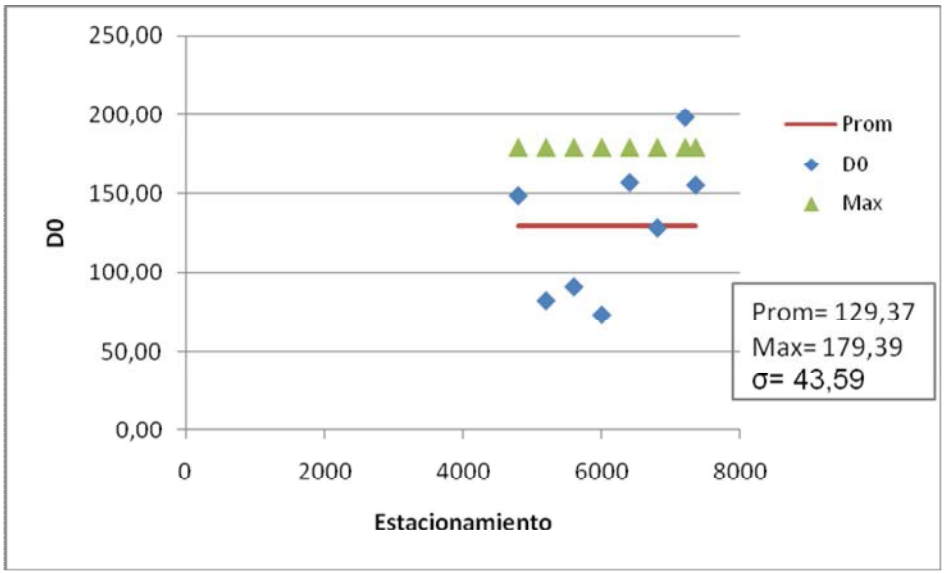
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	5.1 (2)	0 (0)
BG	0.35	10.2 (4)	131.0 (19000)
SBG	0.35	17.8 (7)	100.0 (14500)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	77.6 (11250)

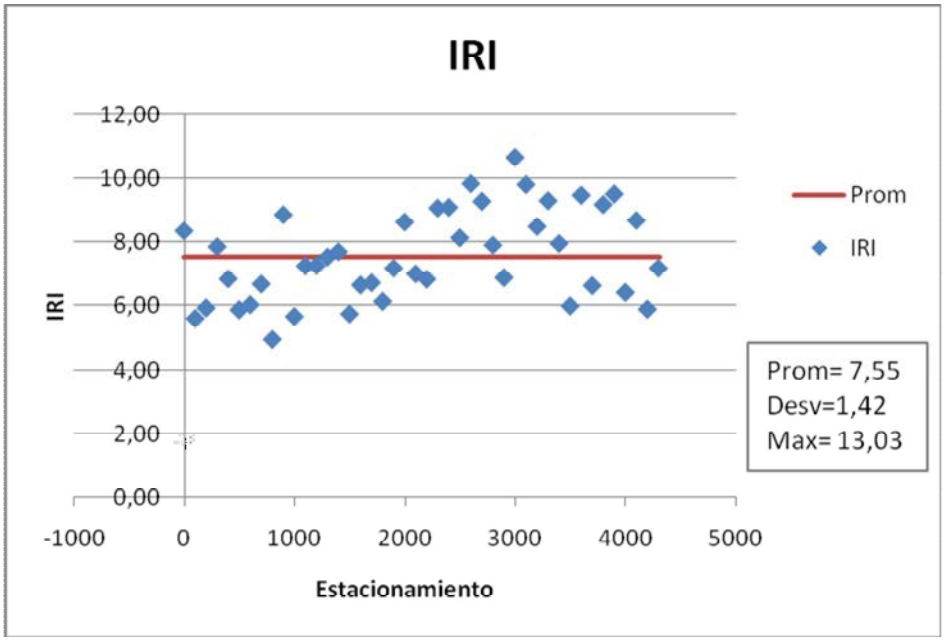




TH-348,TH-349

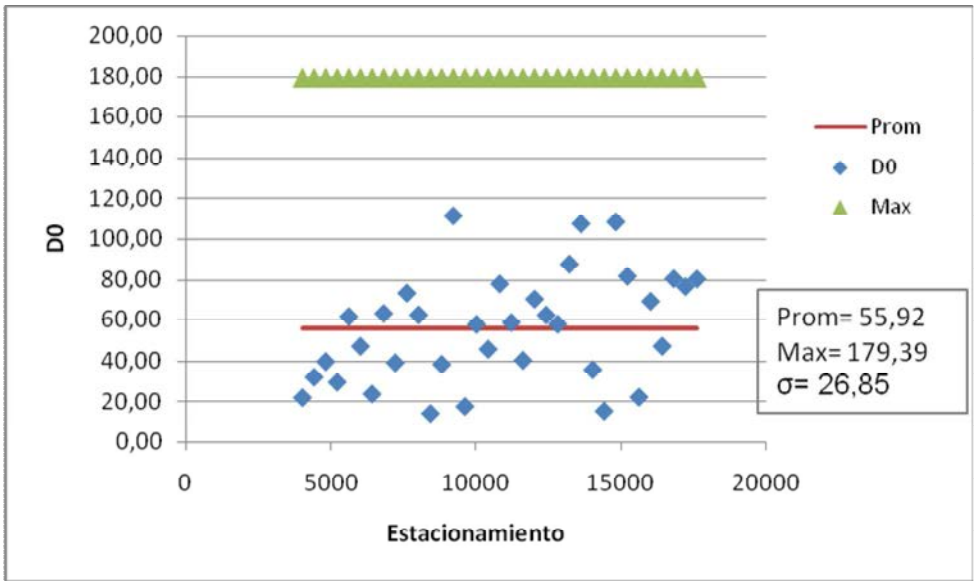
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
CA	0.35	3.5 (1.37)	0 (0)
BG	0.35	12.7 (5)	82.8 (12000)
SBG	0.35	7.6 (3)	75.9 (11000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	62.1 (9000)

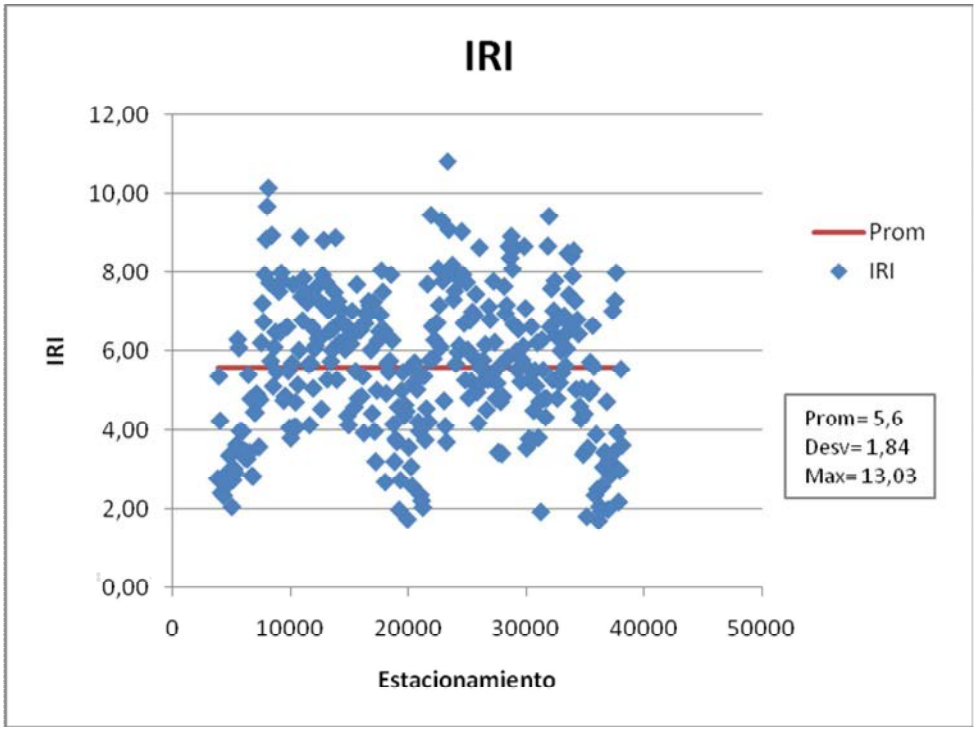




TH-30

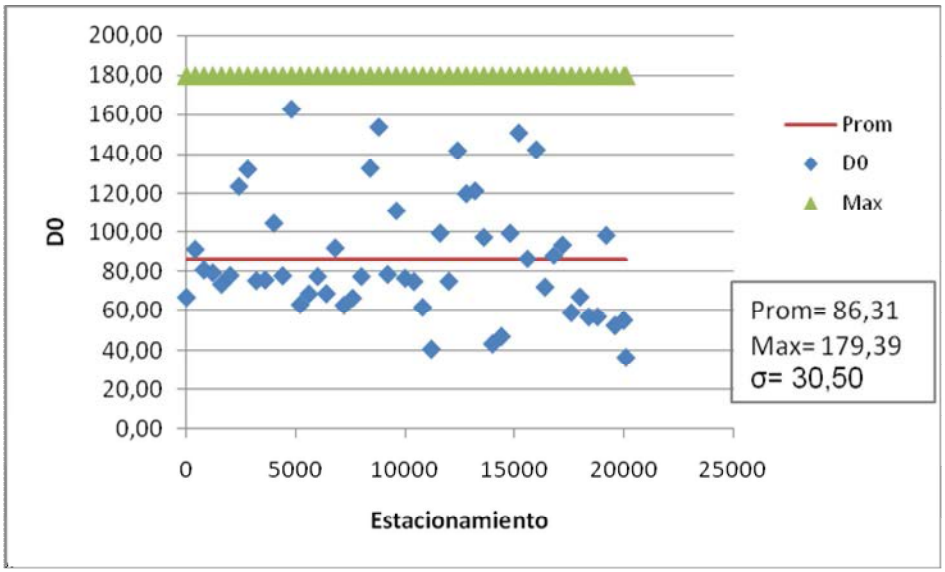
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	5.7 (2.23)	-
BG	0.35	25.0 (9.84)	186.2 (27000)
SBG	0.35	24.0 (9.45)	93.1 (13500)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	81.4 (11800)

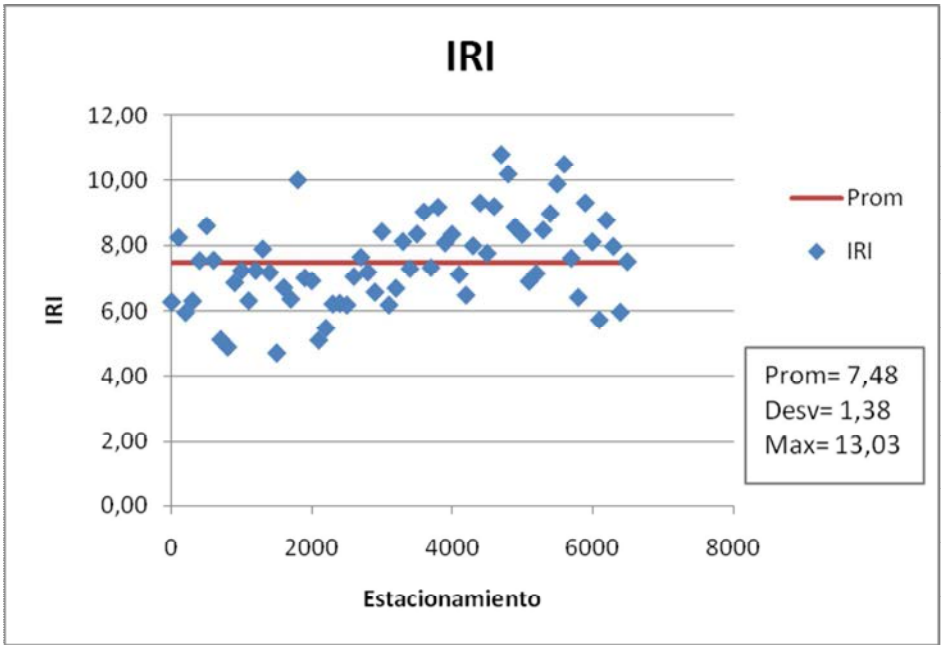




TH-366

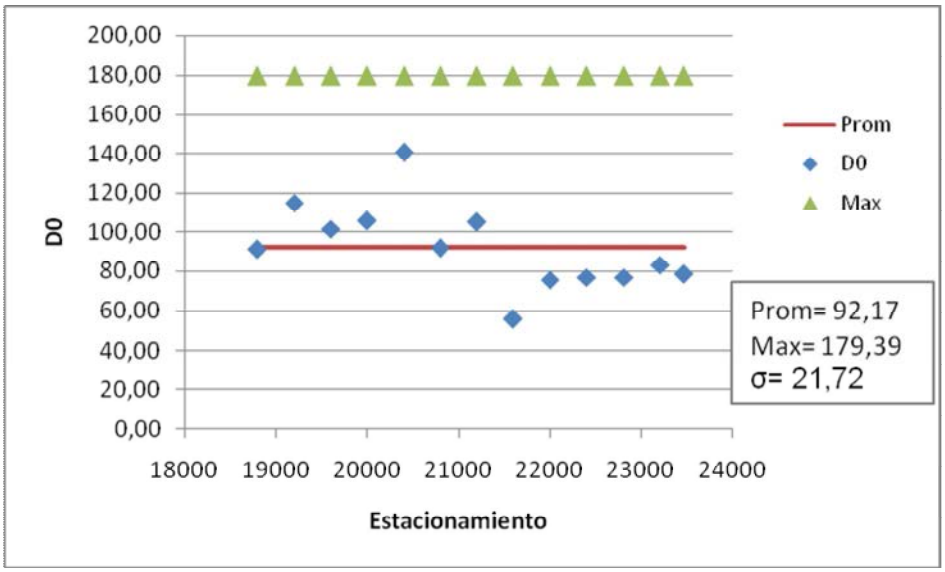
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	4. (1.82)	-
BG	0.35	15.0 (5.91)	241.4 (35000)
SBG	0.35	30.0 (11.81)	124.1 (18000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	28.3 (4100)

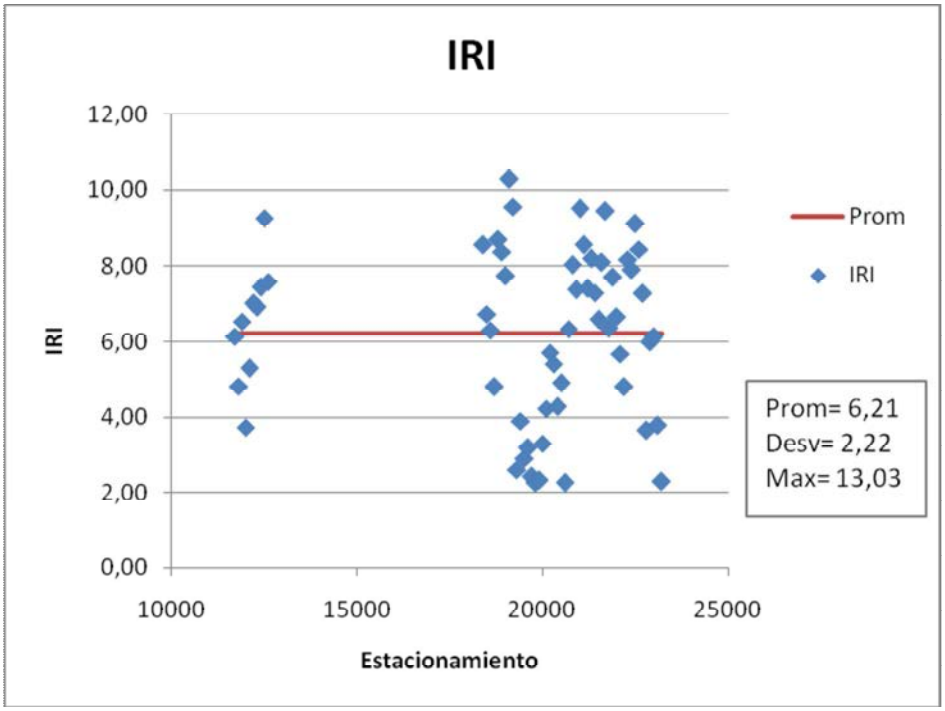




TH-137

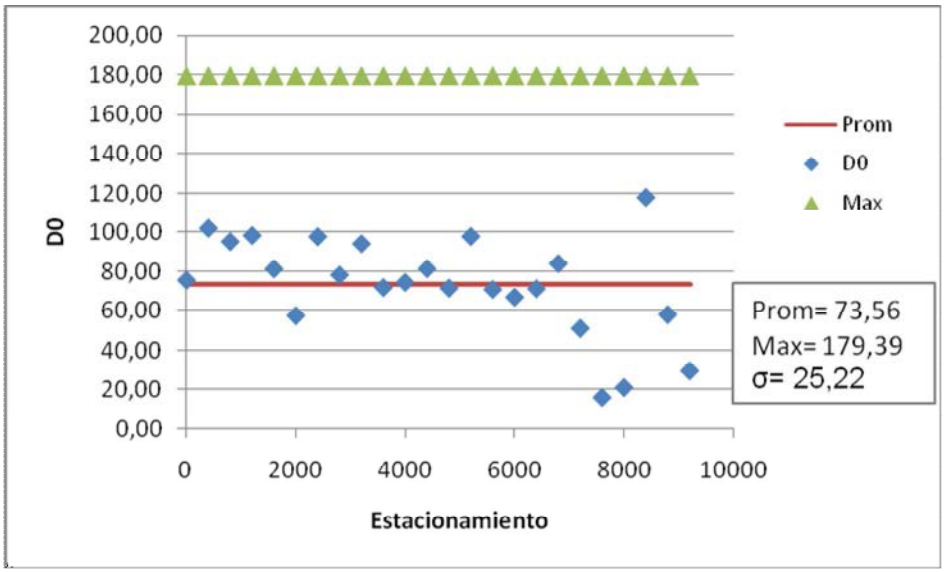
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	3.5 (1.38)	-
BG	0.35	26.0 (10.24)	120.7 (17500)
SBG	0.35	40.0 (15.75)	81.4 (11800)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	127.6 (18500)

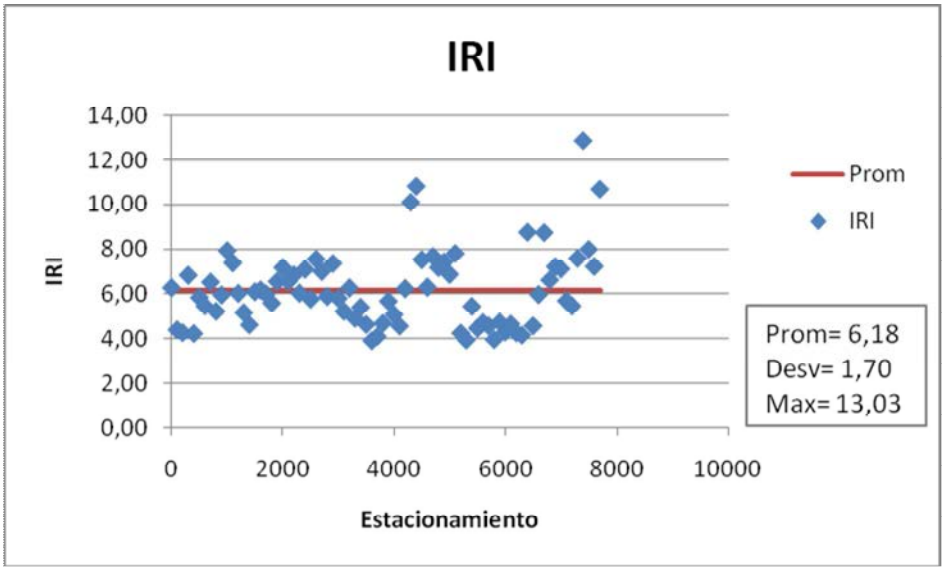




TH-460

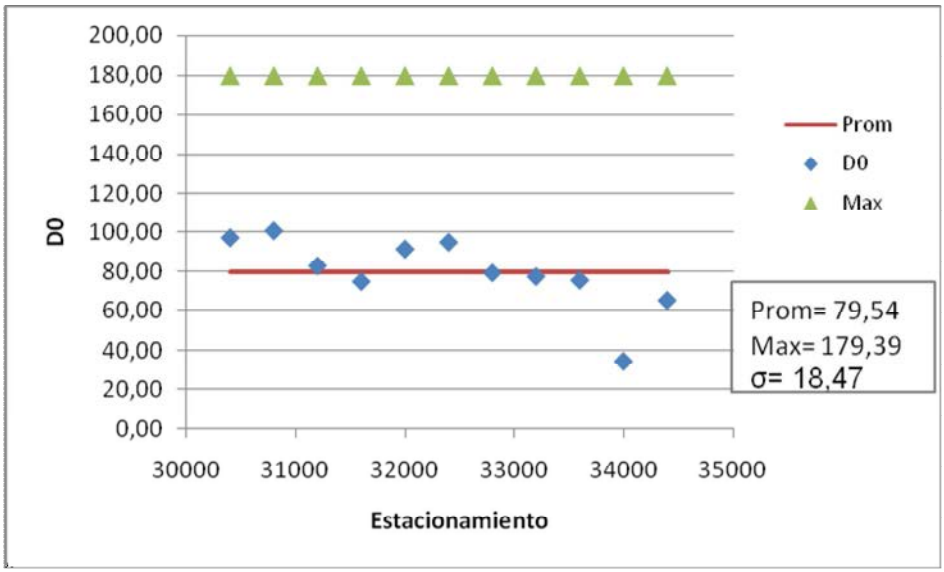
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	1.9 (0.74)	-
BG	0.35	16.0 (6.3)	241.4 (35000)
SBG	0.35	37.0 (14.57)	131.0 (19000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	43.3 (6300)

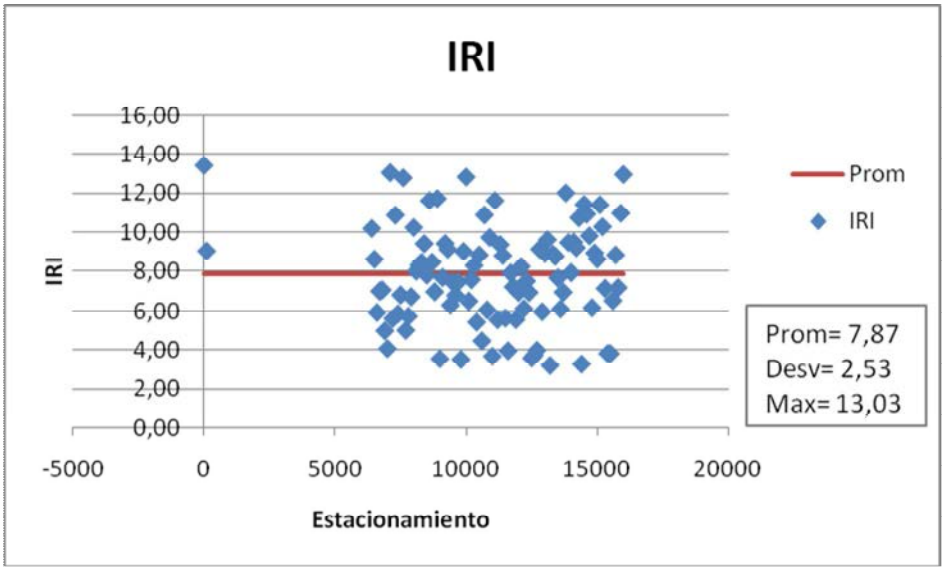




TH-379a

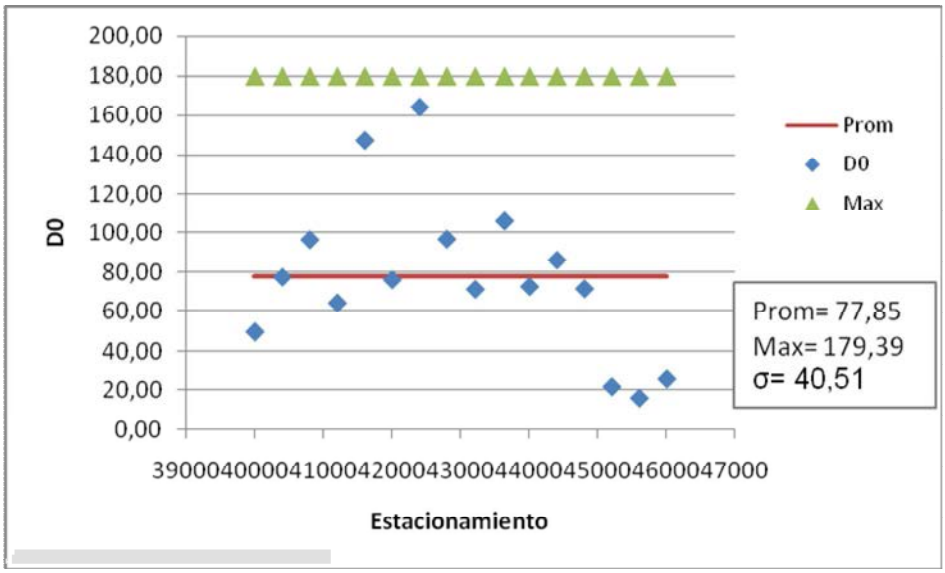
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	3.2 (1.27)	-
BG	0.35	20.0 (7.87)	172.4 (25000)
SBG	0.35	24.0 (9.45)	100.0 (14500)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	82.8 (12000)

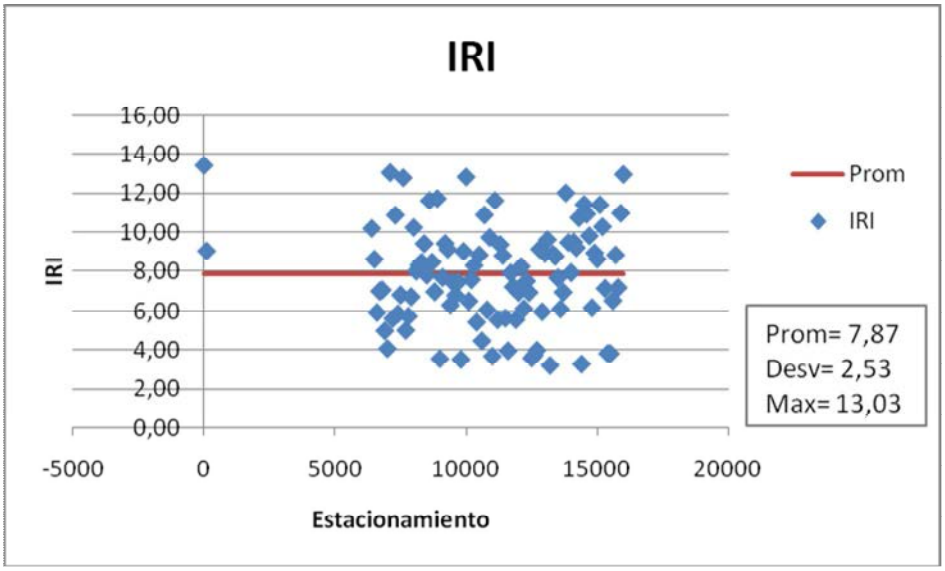




TH-379b

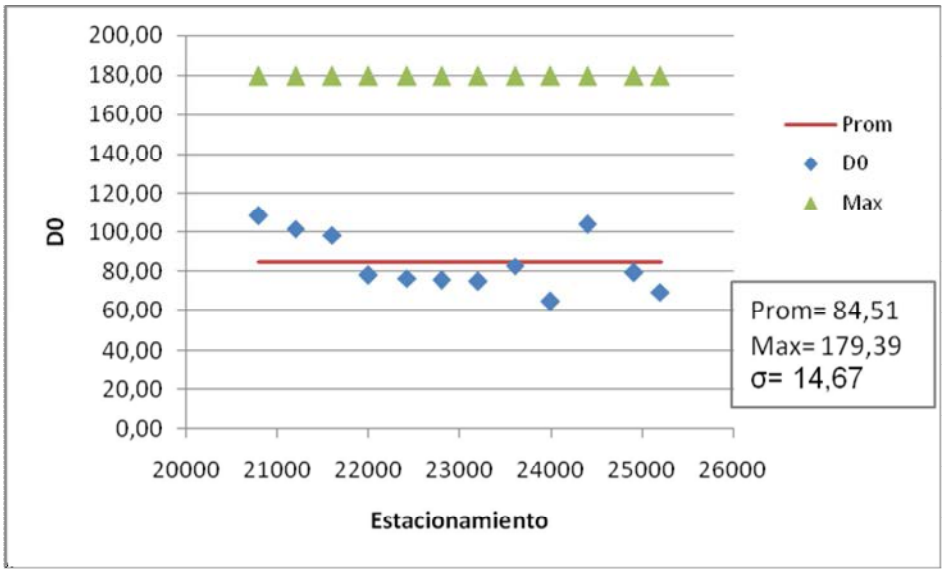
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	4.6 (1.83)	-
BG	0.35	16.0 (6.30)	158.6 (23000)
SBG	0.35	30.0 (11.81)	89.7 (13000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	51.7 (7500)

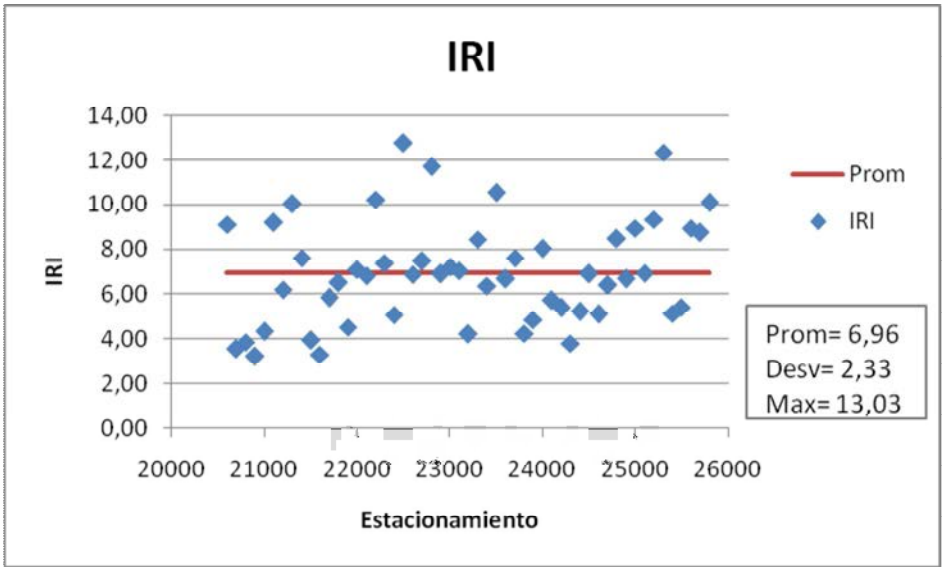




TH-377

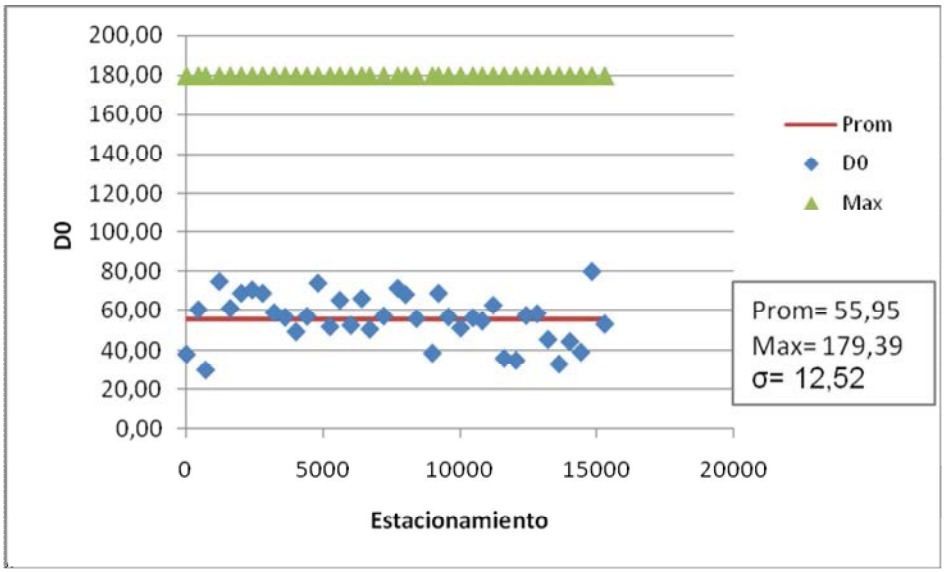
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	2.0 (0.78)	-
BG	0.35	25.0 (9.84)	217.2 (31500)
SBG	0.35	15.0 (5.91)	131.0 (19000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	60.7 (8800)

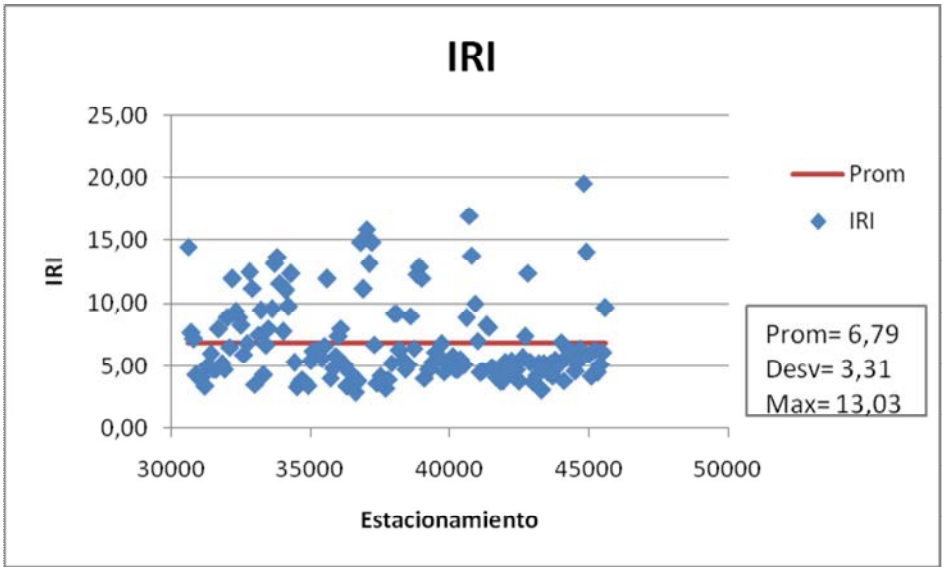




TH-375

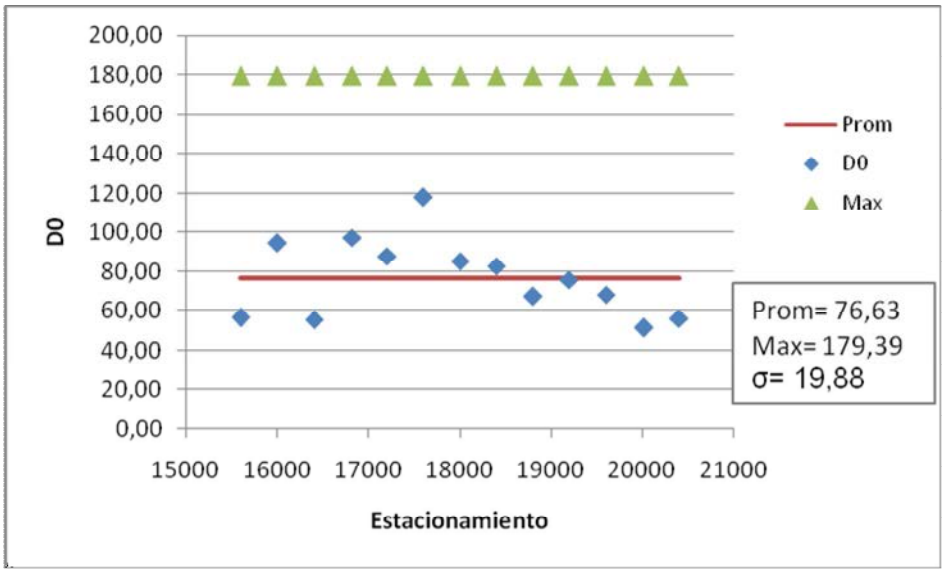
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	1.8 (0.71)	-
BG	0.35	26.0 (10.24)	251.7 (36500)
SBG	0.35	30.0 (11.81)	162.8 (23600)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	94.5 (13700)

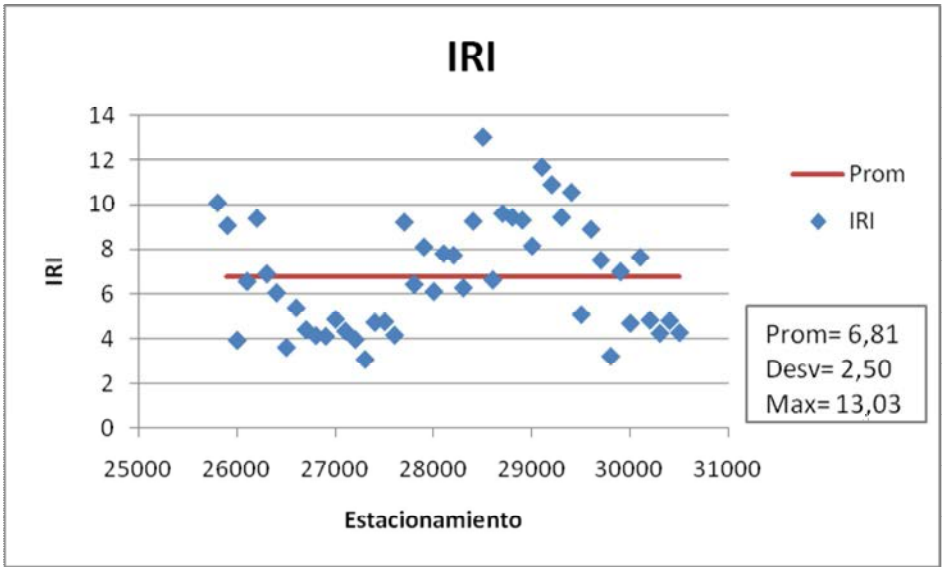




TH-376

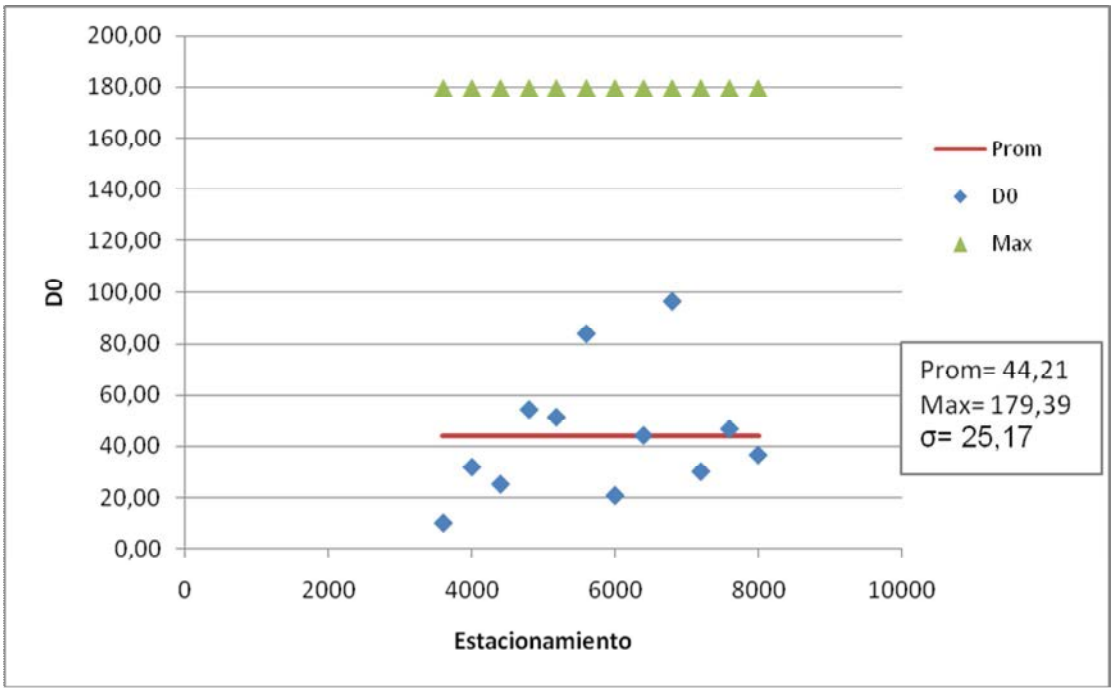
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	3.4 (1.32)	-
BG	0.35	26.0 (10.24)	165.5 (24000)
SBG	0.35	15.0 (5.91)	103.4 (5000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	82.8 (12000)

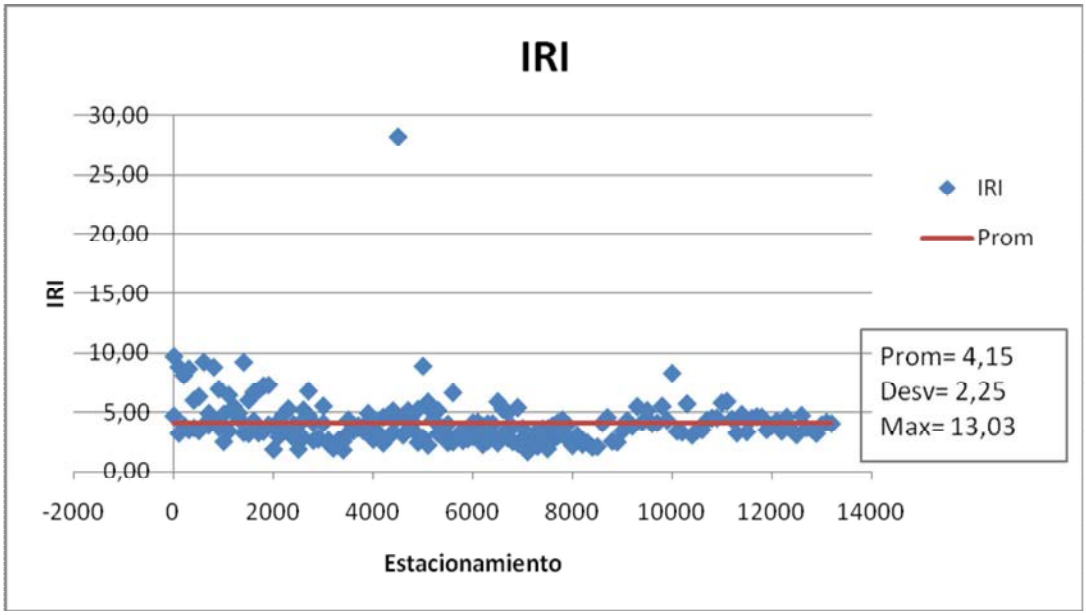




TIPO 6 (TPDA moderado-bajo- < 20 000, Trat. superficial + base estabilizada)
TH-346b

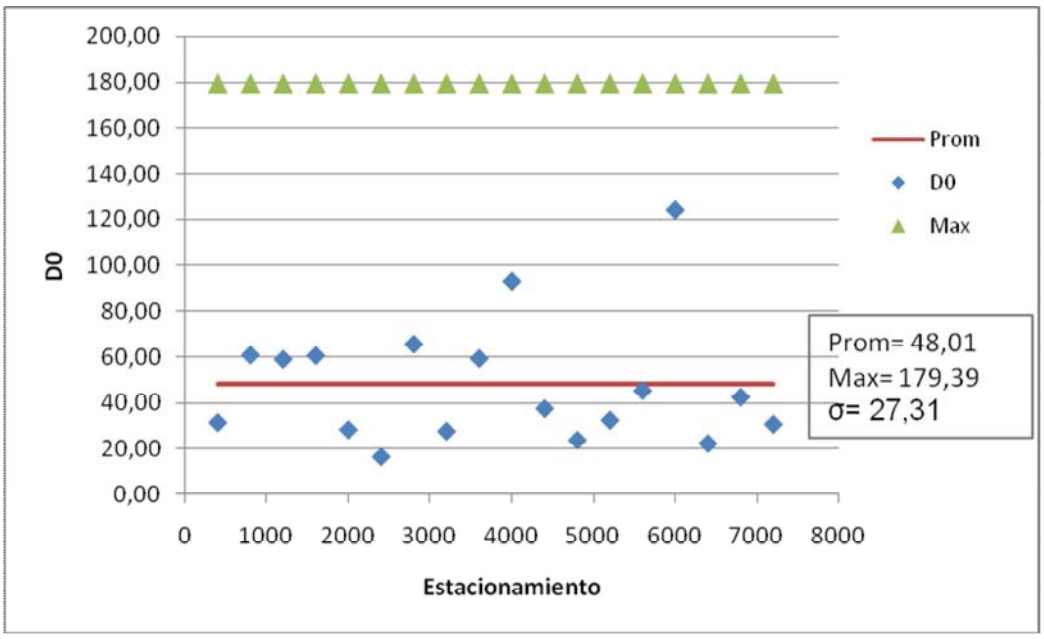
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	5.3 (2.09)	-
BE	0.35	13.0 (5.12)	1379.3 (200000)
SBG	0.35	42.0 (16.54)	75.9 (11000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	60.7 (8800)

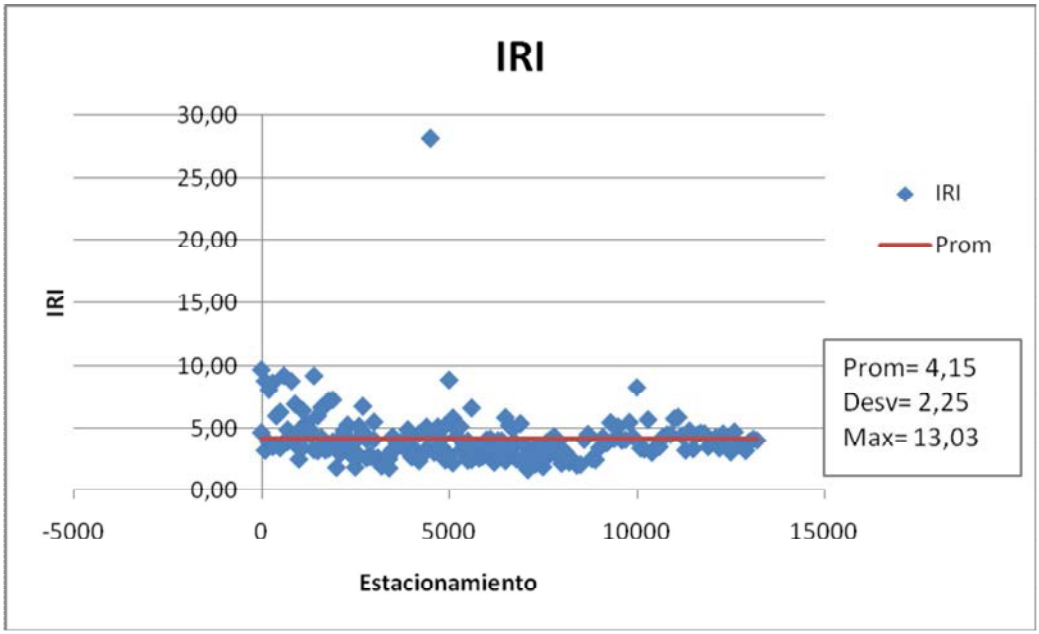




TH-346c

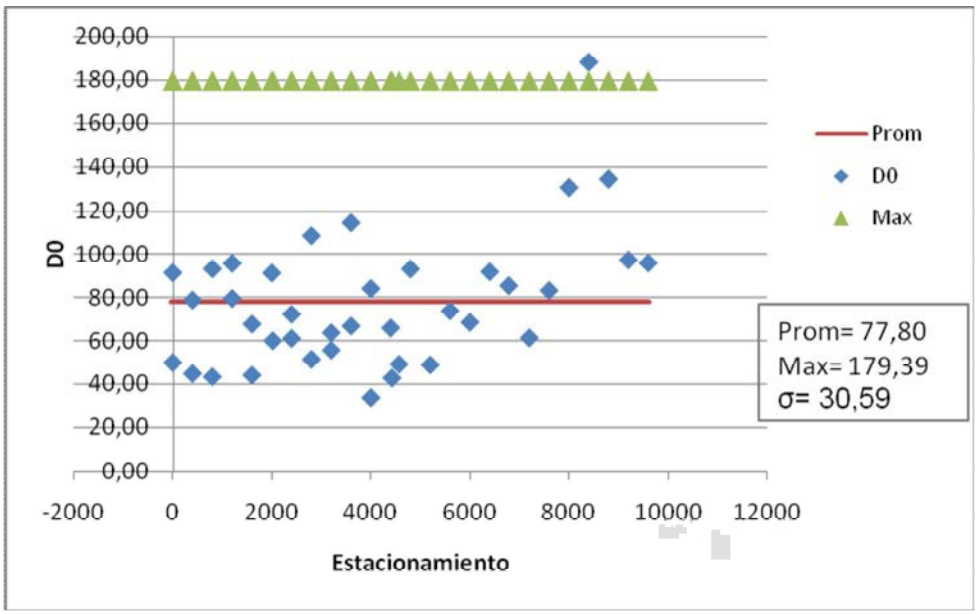
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	4.0 (1.56)	-
BE	0.35	11.3 (4.45)	3103.4 (450000)
SBG	0.35	15.0 (5.91)	103.4 (15000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	40.0 (5800)

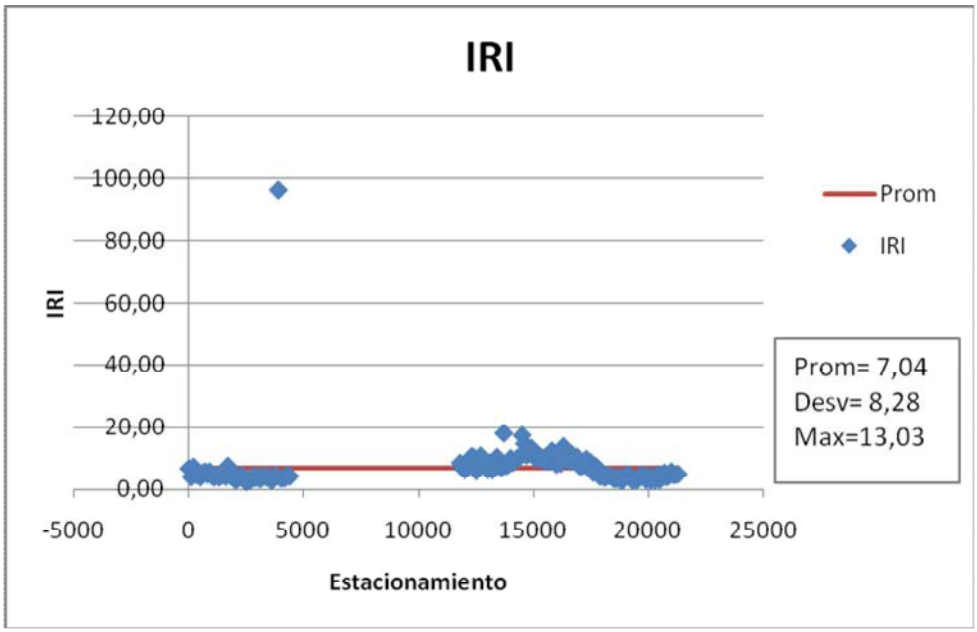




TH-365

CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	1.6 (0.62)	-
BE	0.18	19.0 (7.48)	227.6 (33000)
SBG	0.35	27.0 (10.63)	75.9 (11000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	55.9 (8100)

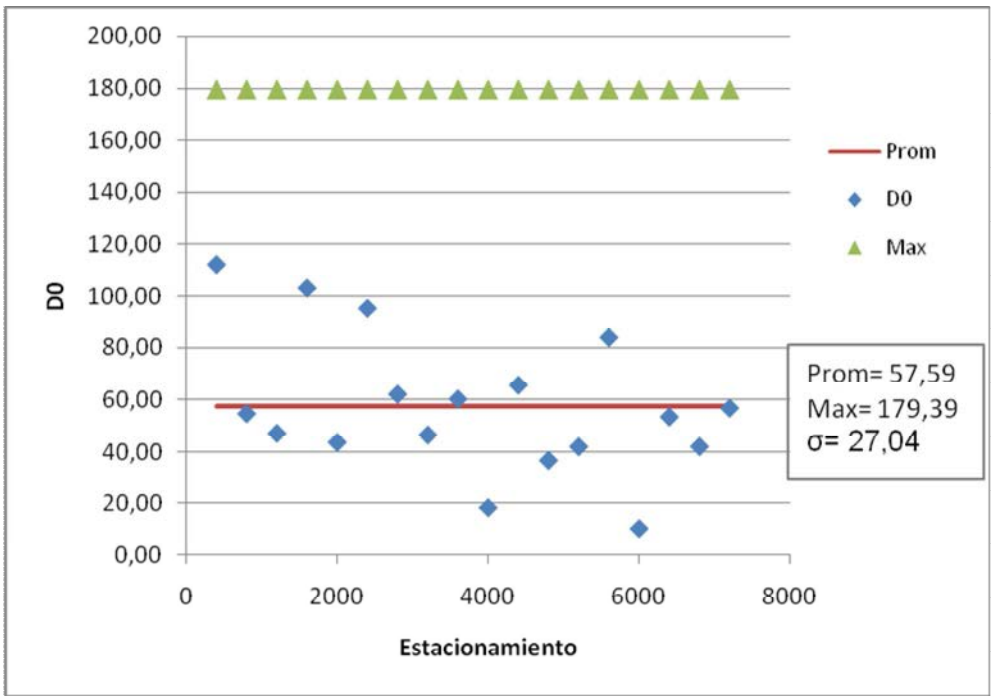


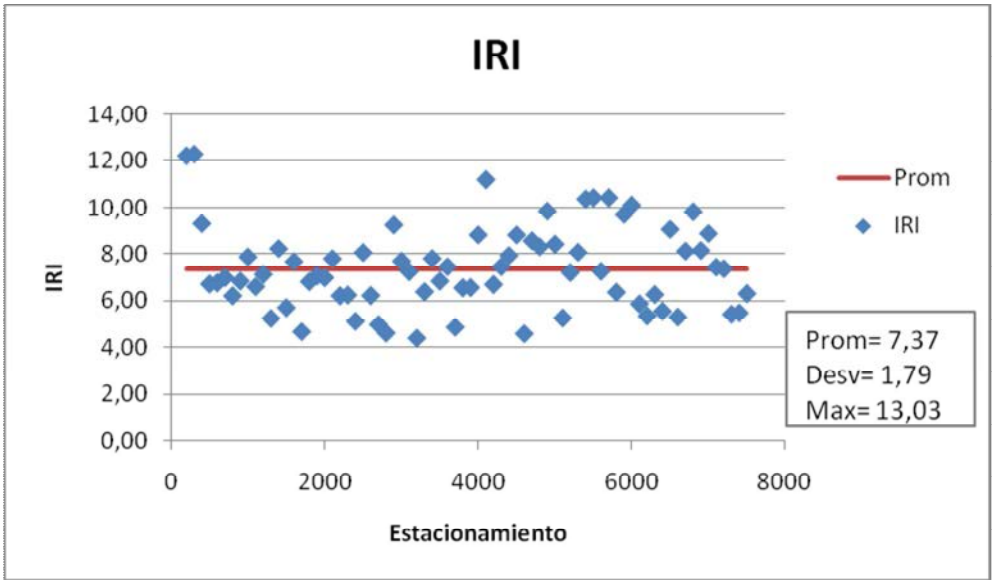


Promedio de 6,39 y desviación de 3,24 al eliminar el extremo.

TH-458

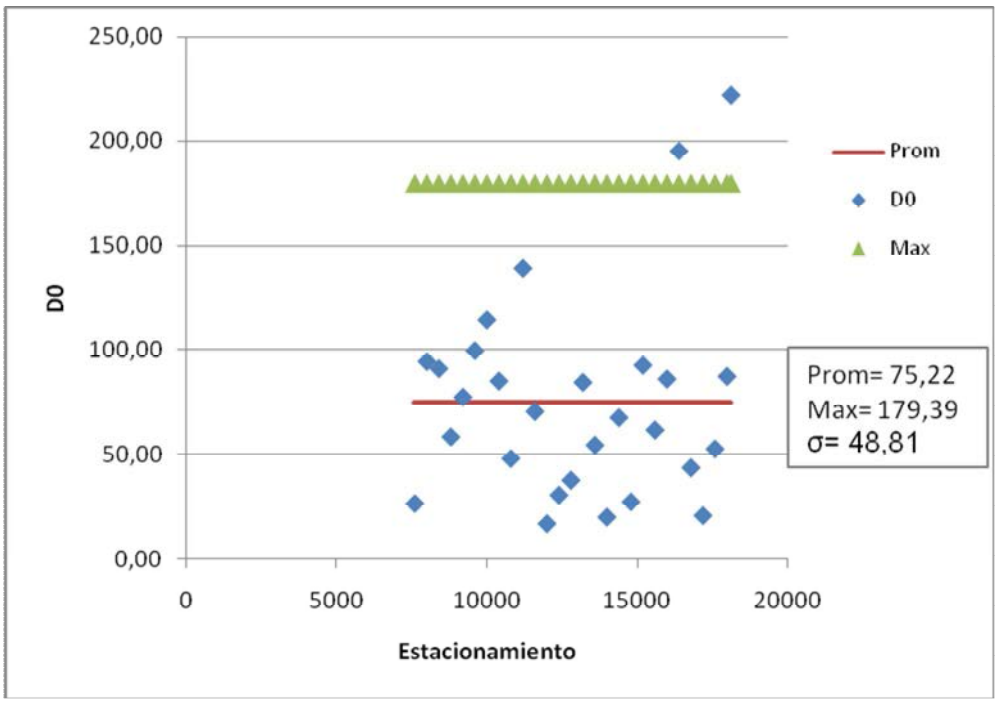
CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	1.2 (0.48)	-
BE	0.35	15.0 (5.91)	758.6 (110000)
SBG	0.35	39.0 (15.35)	75.9 (11000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	45.5 (6600)

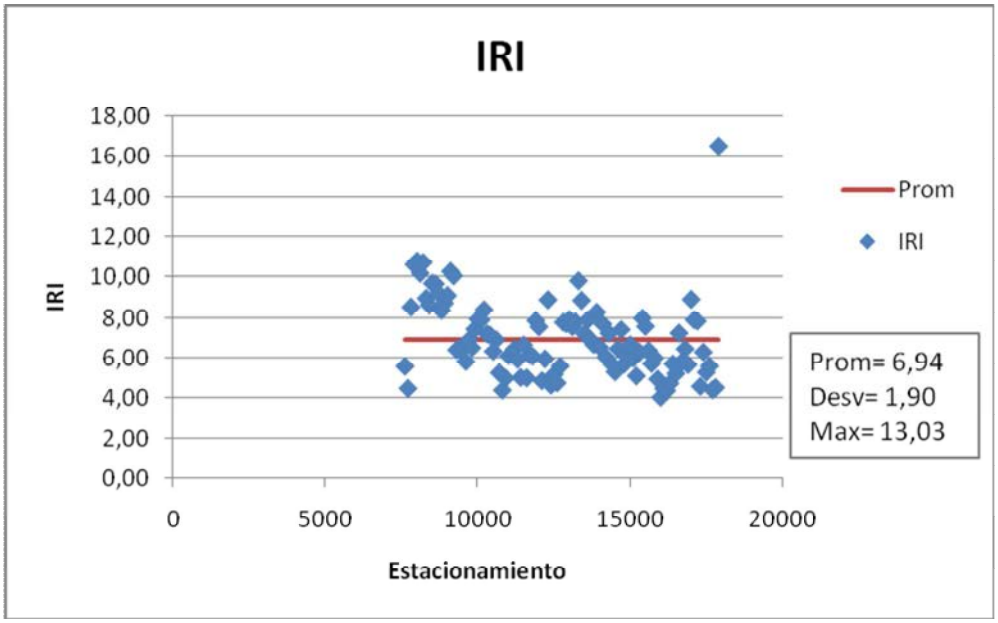




TH-459

CAPA	MÓDULO POISSONS	ESPESOR cm (in)	Módulo de rasante MPa (psi)
TS	0.35	5.6 (2.21)	-
BE	0.35	18.0 (7.09)	344.8 (50000)
SBG	0.35	15.0 (5.91)	75.9 (11000)
SR	0.45	SEMI-INFINITE	34.8 (5050)





9.5. ANEXO E. Gráficos de correlación para los índices estructurales, diferenciado por tipo de estructura.

Gráfico 15. Correlación SAI vs SN, tipo 1.

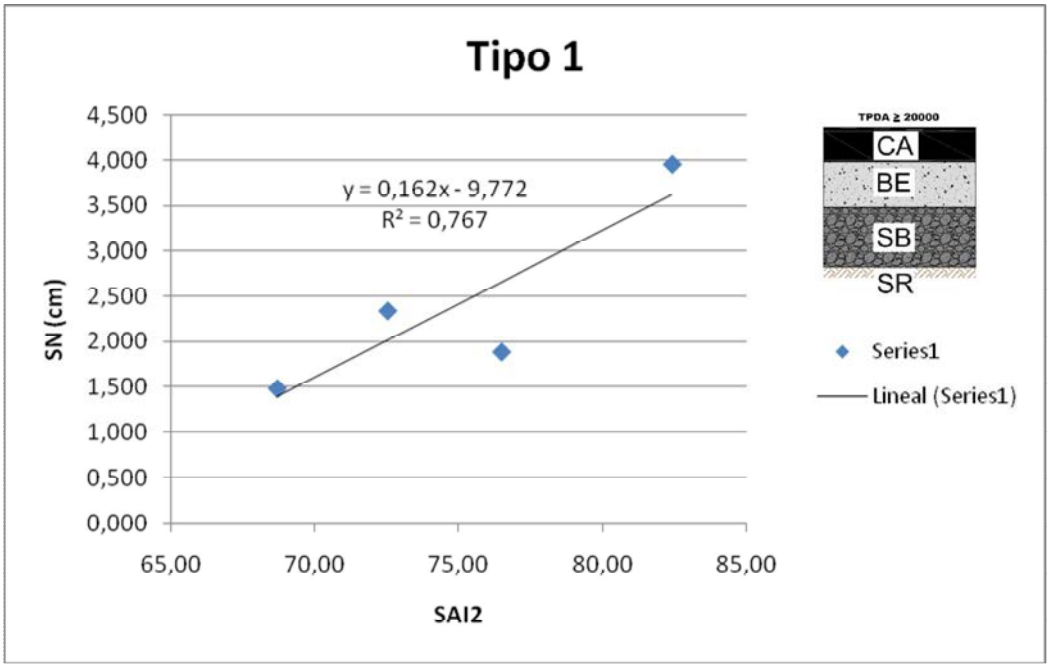


Gráfico 16. Correlación SAI vs SN, tipo 2.

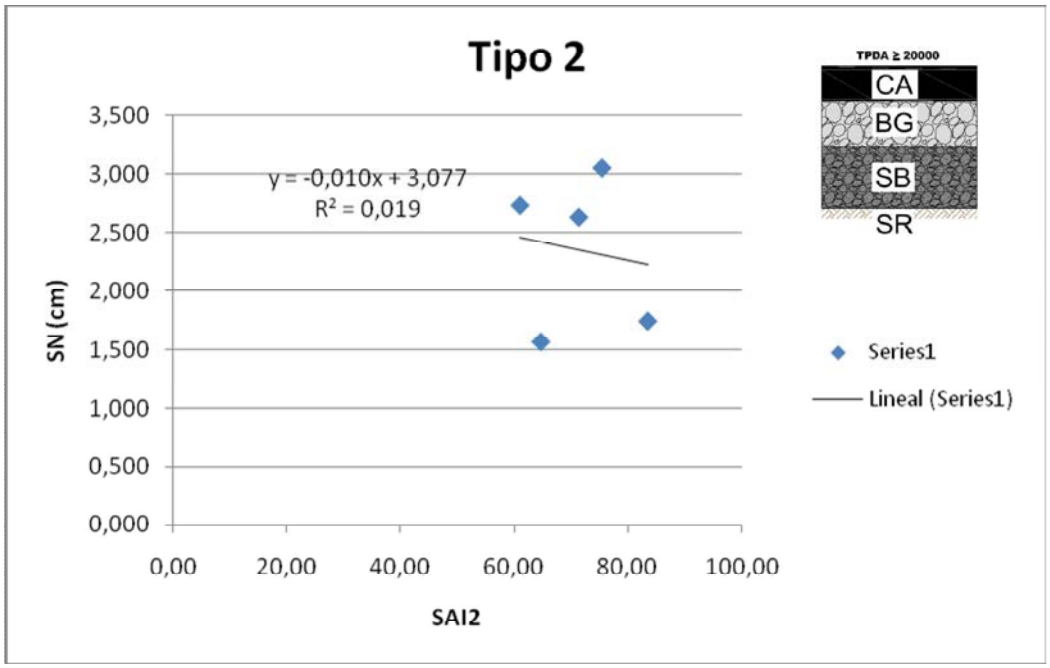


Gráfico 17. Correlación SAI vs SN, tipo 3.

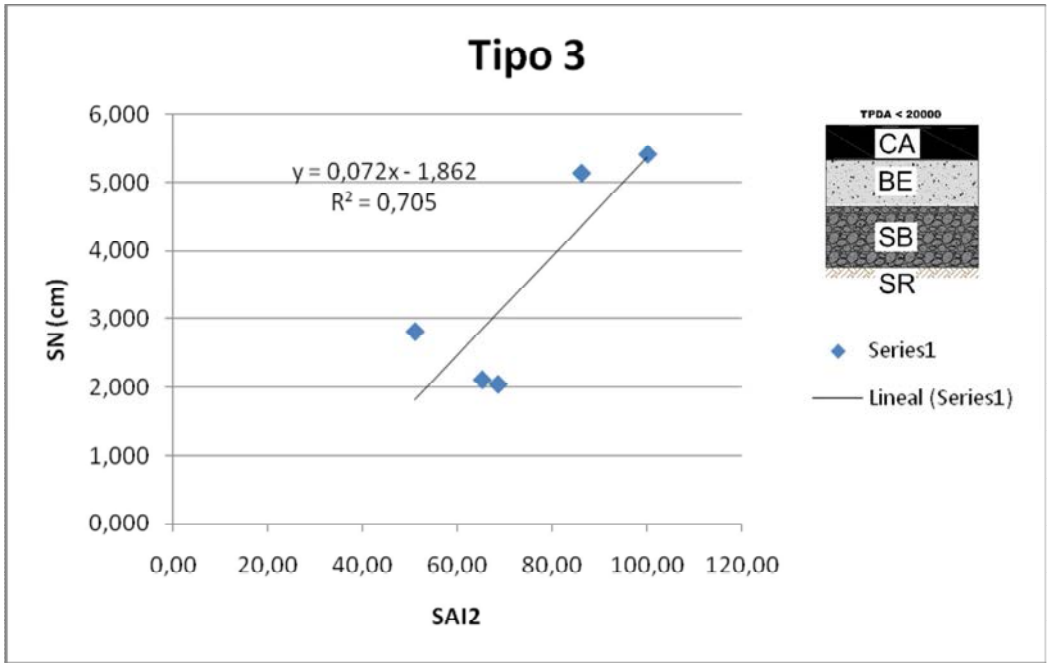


Gráfico 18. Correlación SAI vs SN, tipo 4.

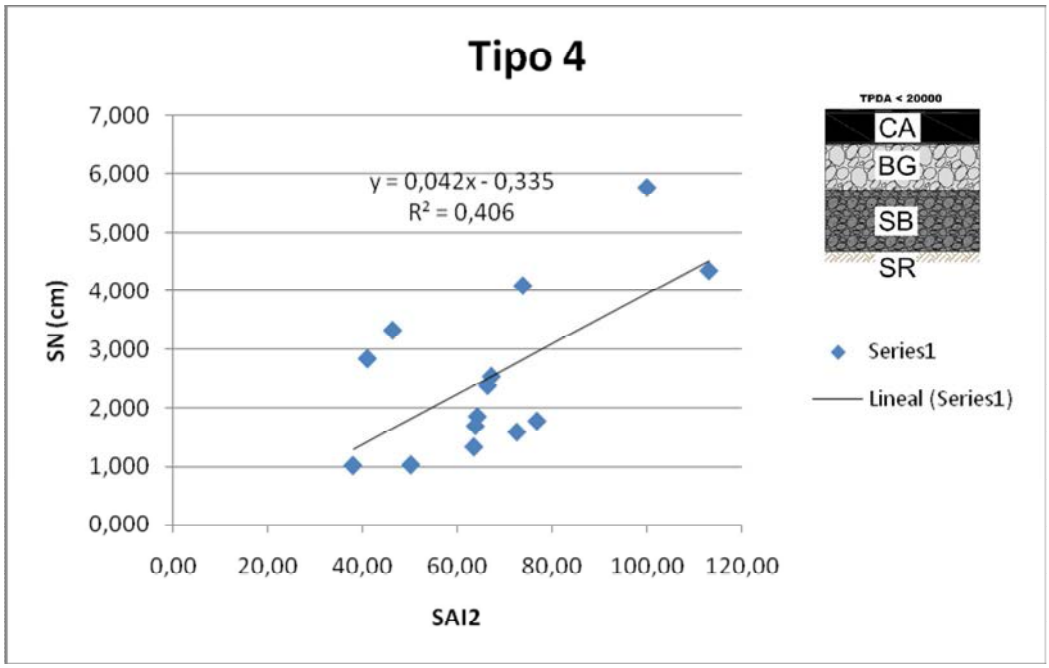


Gráfico 19. Correlación SAI vs SN, tipo 5.

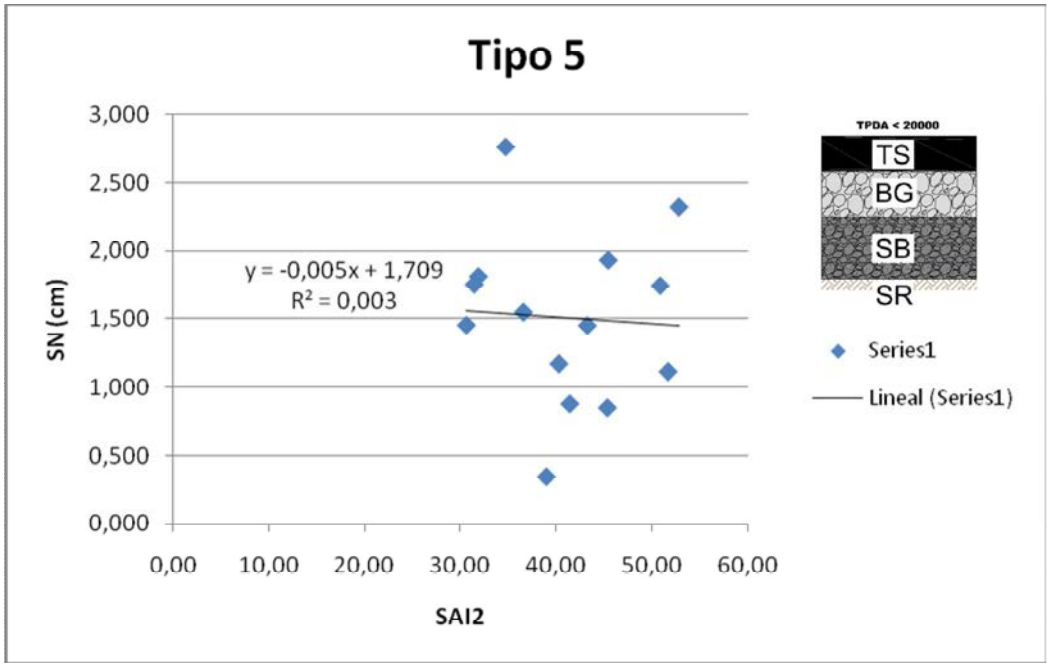


Gráfico 20. Correlación SAI vs SN, tipo 6.

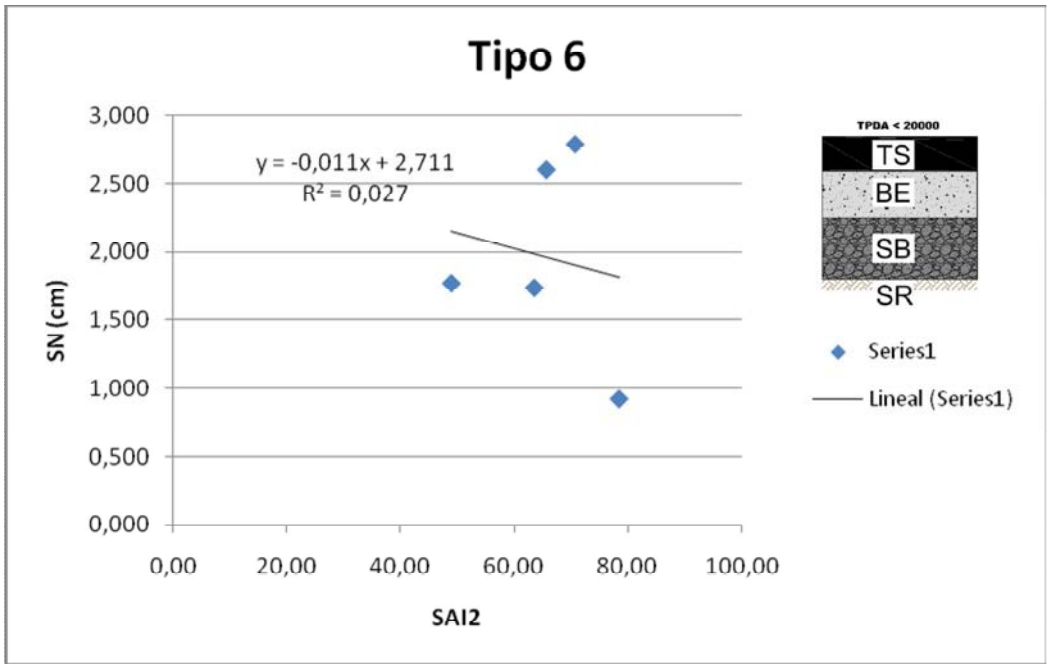


Gráfico 21. Correlación SAI vs ε_t, tipo 1.

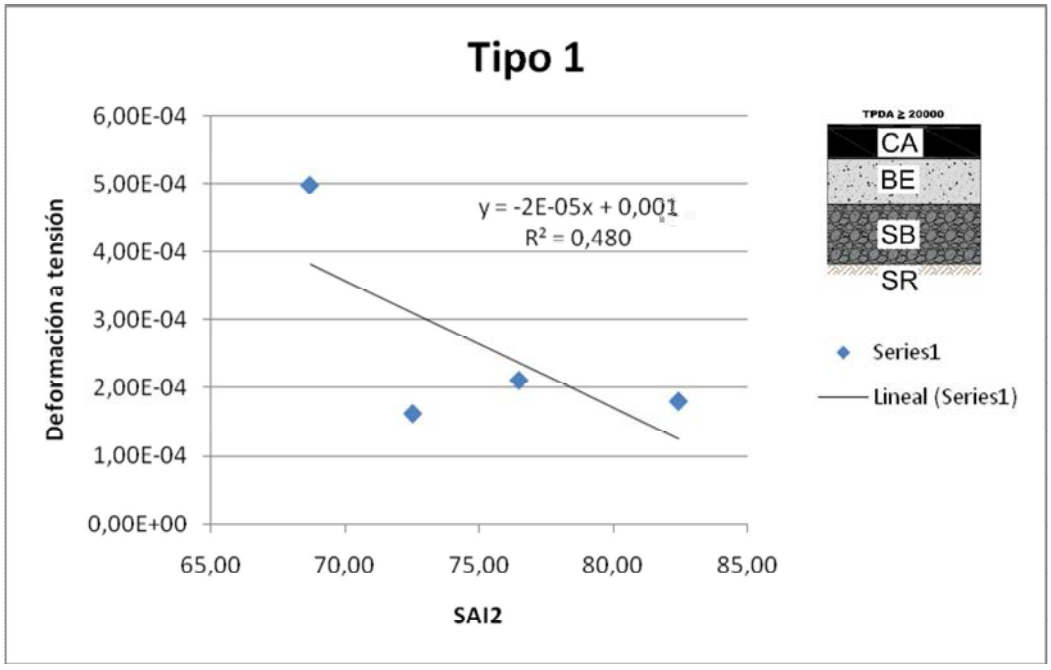


Gráfico 22. Correlación SAI vs ε_t, tipo 2.

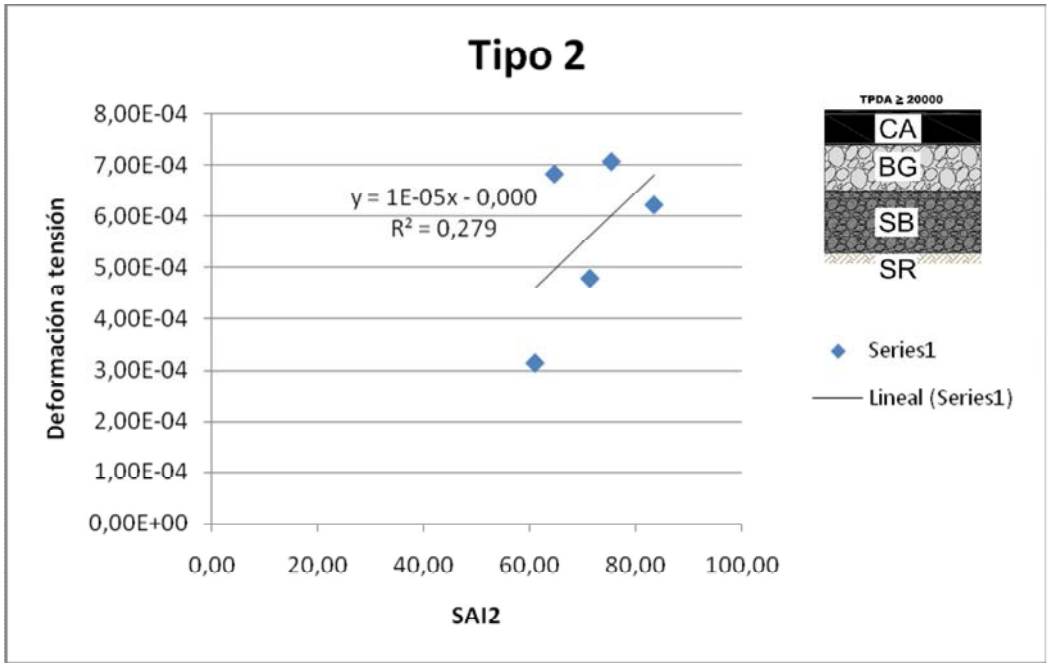


Gráfico 23. Correlación SAI vs ε_t, tipo 3.

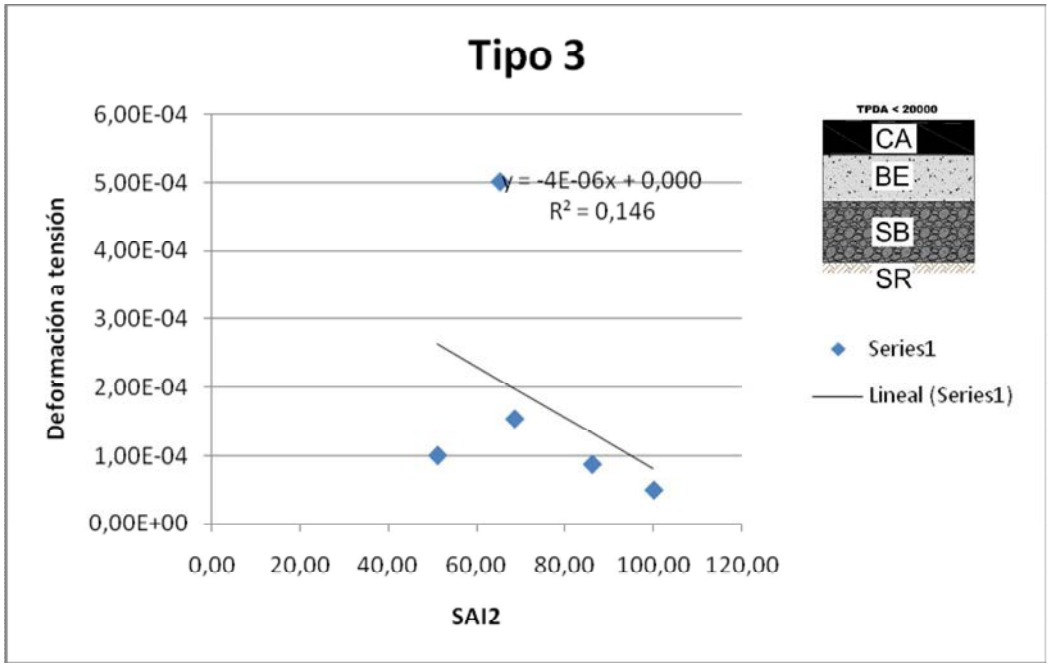


Gráfico 24. Correlación SAI vs ε_t, tipo 4.

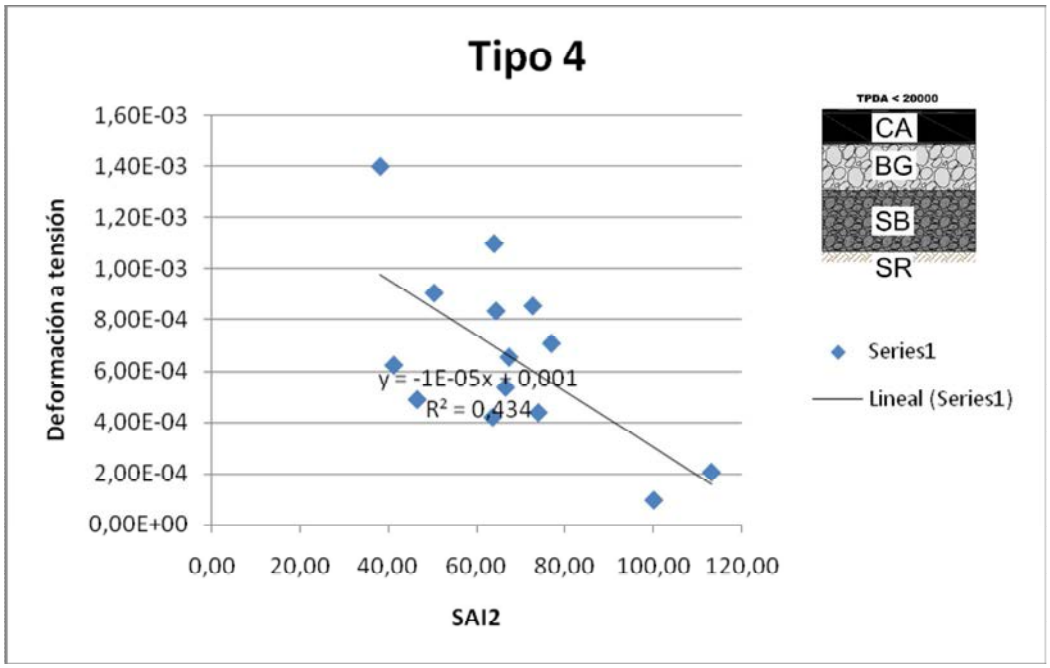


Gráfico 25. Correlación SAI vs ε_t, tipo 6.

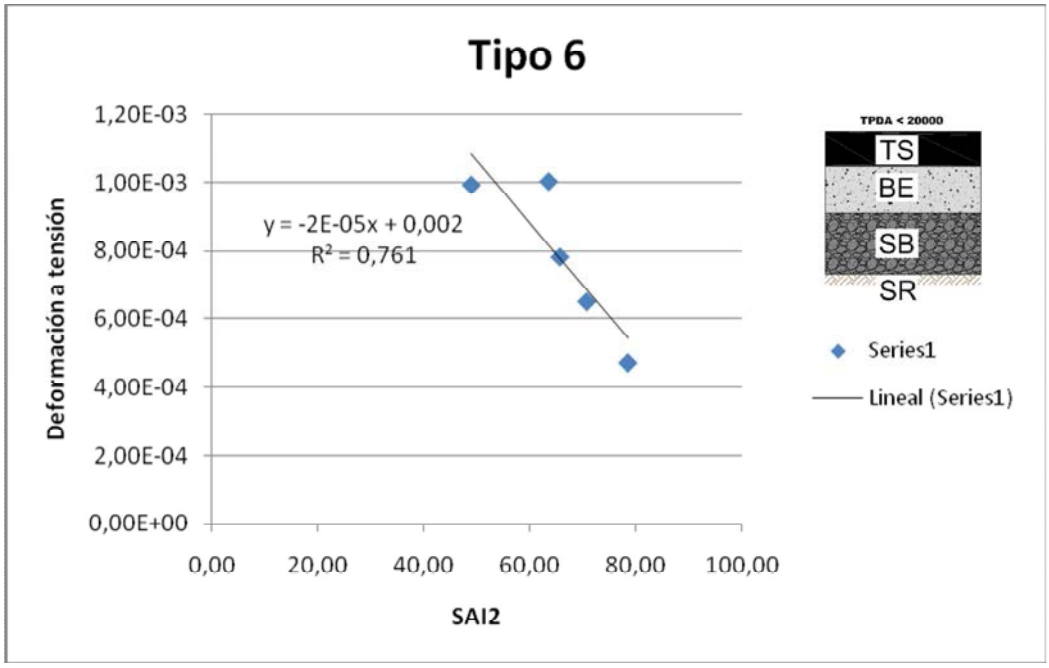


Gráfico 26. Correlación BCI vs Mr, tipo 1.

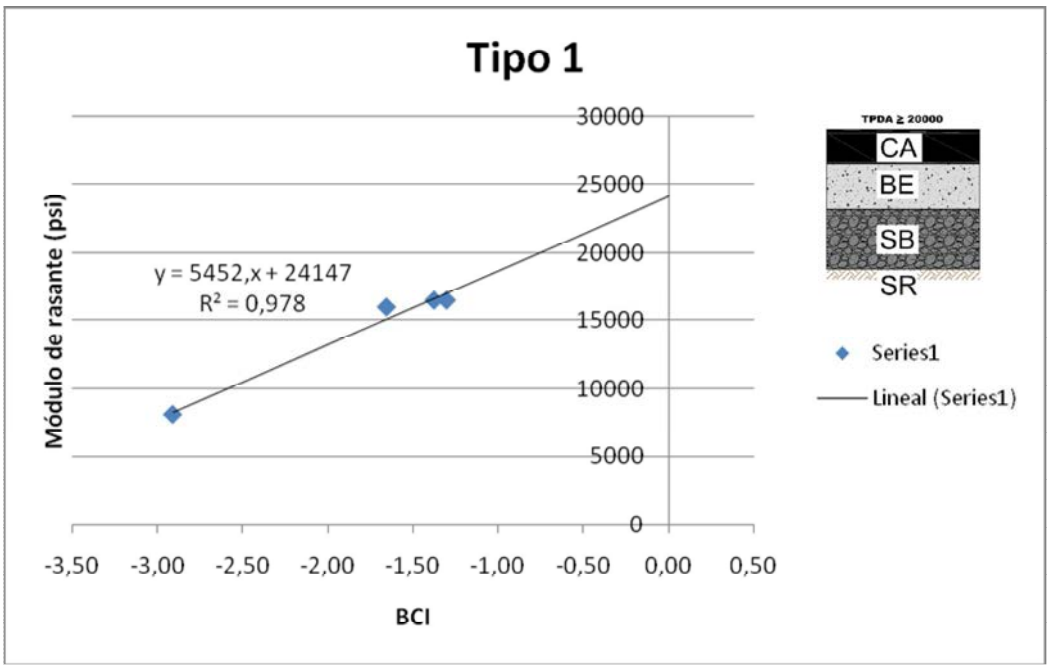


Gráfico 27. Correlación BCI vs Mr, tipo 2.

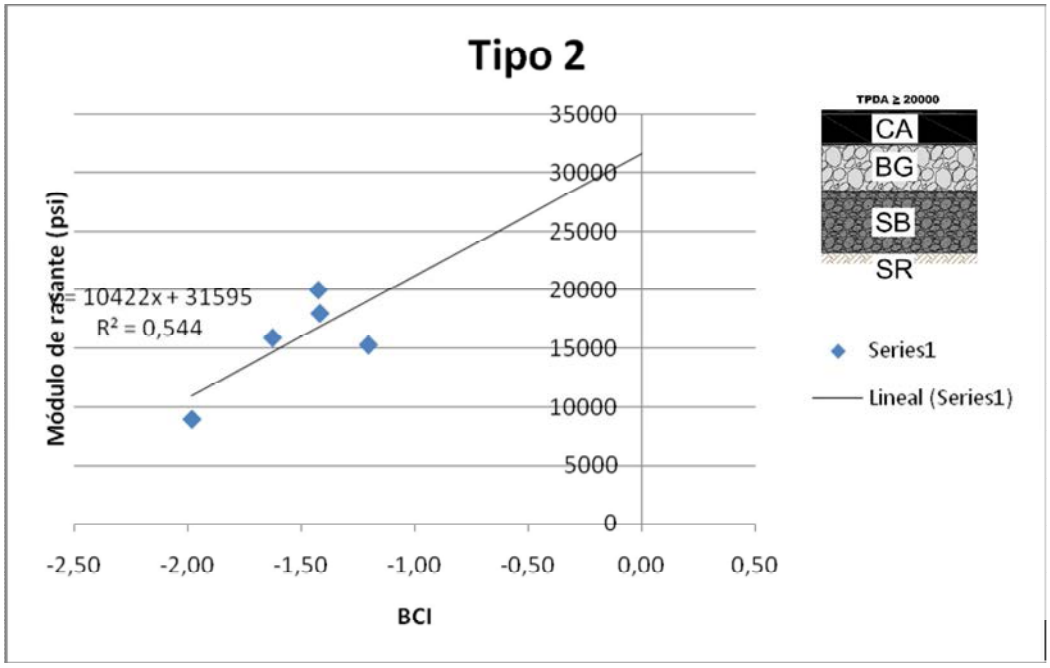


Gráfico 28. Correlación BCI vs Mr, tipo 3.

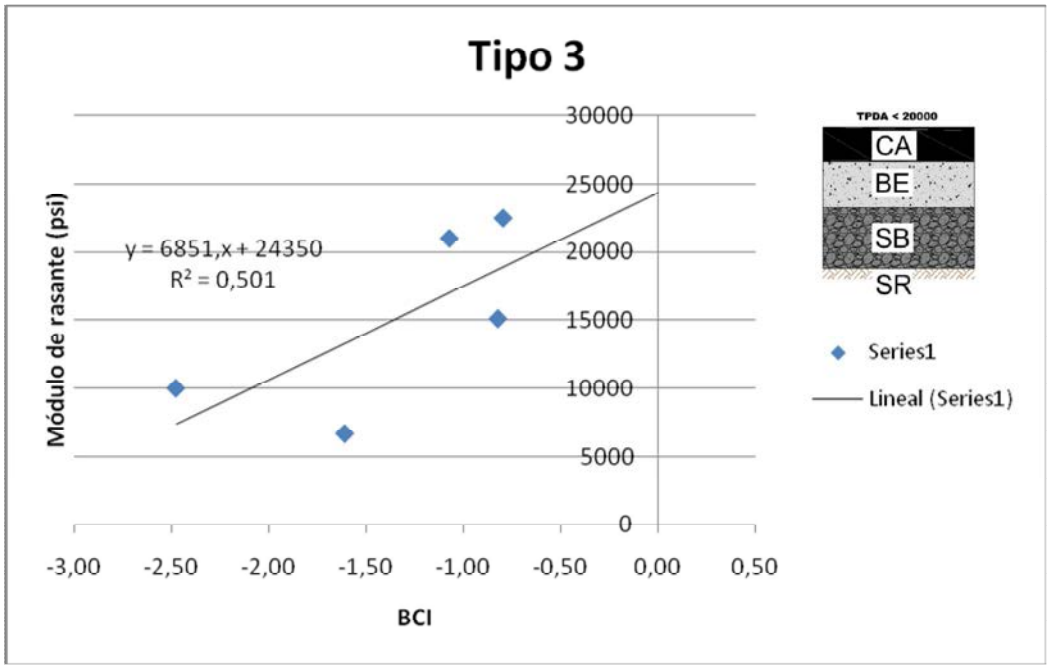


Gráfico 29. Correlación BCI vs Mr, tipo 4.

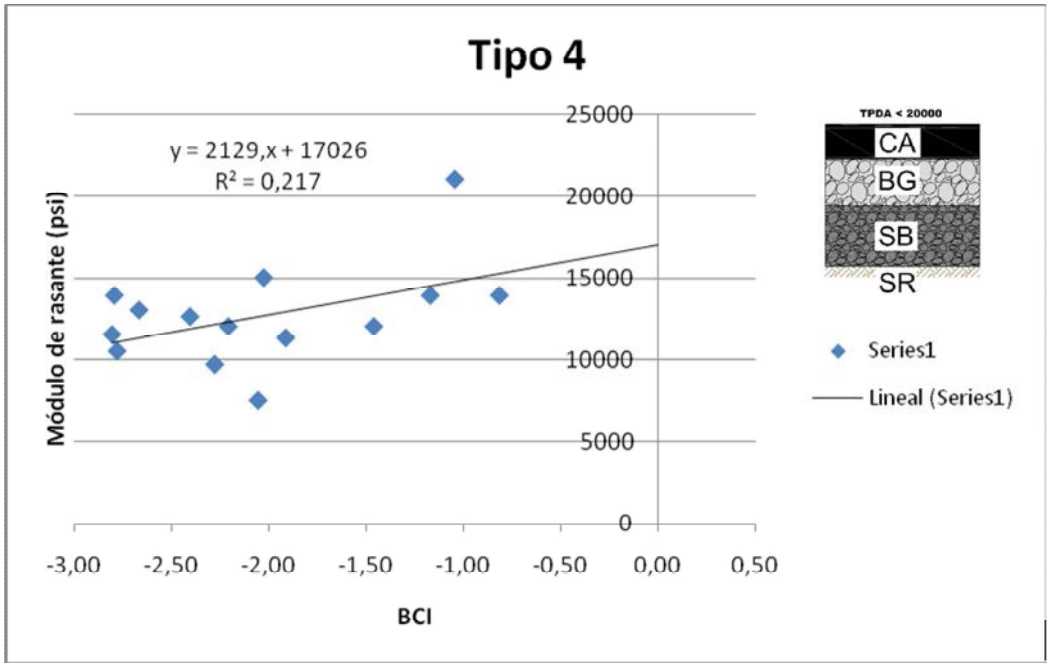


Gráfico 30. Correlación BCI vs Mr, tipo 5.

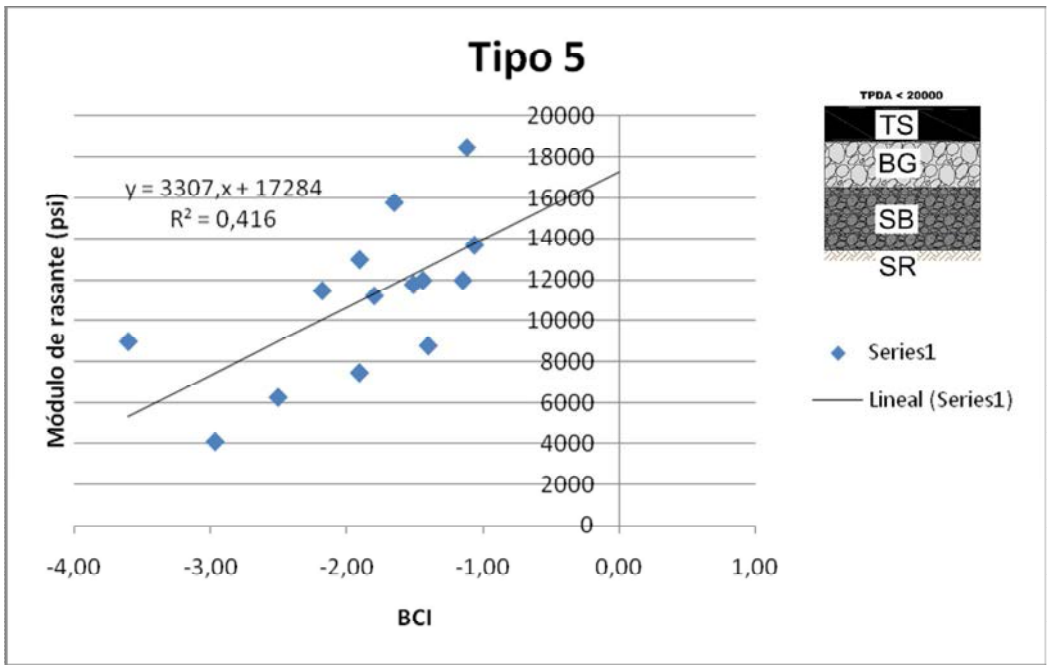


Gráfico 31. Correlación BCI vs Mr, tipo 6.

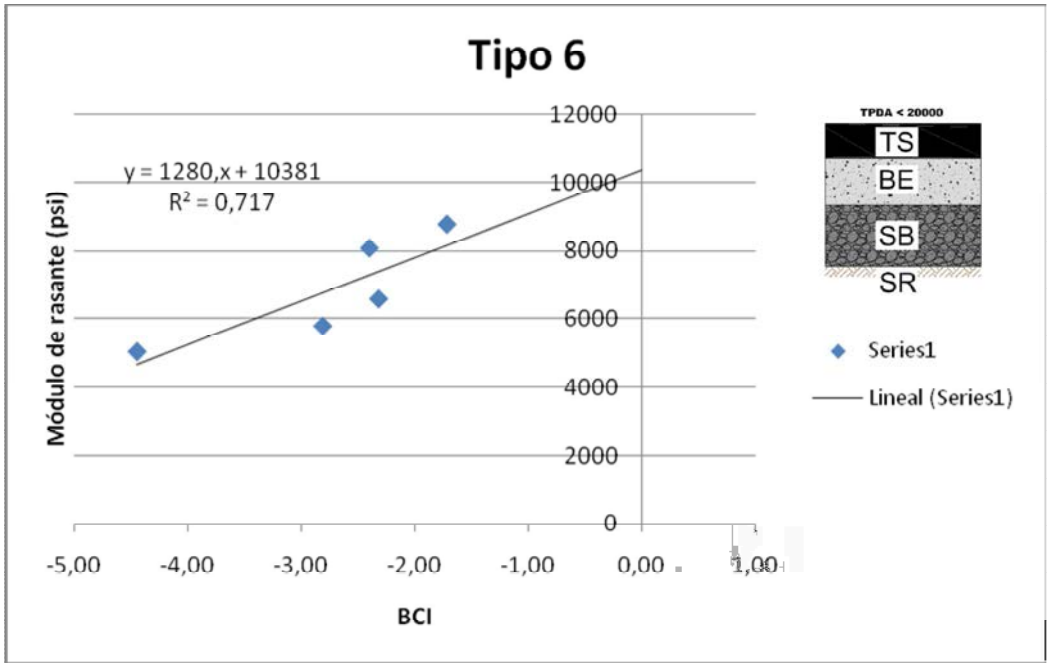


Gráfico 32. Correlación BCI vs ε_c, tipo 1.

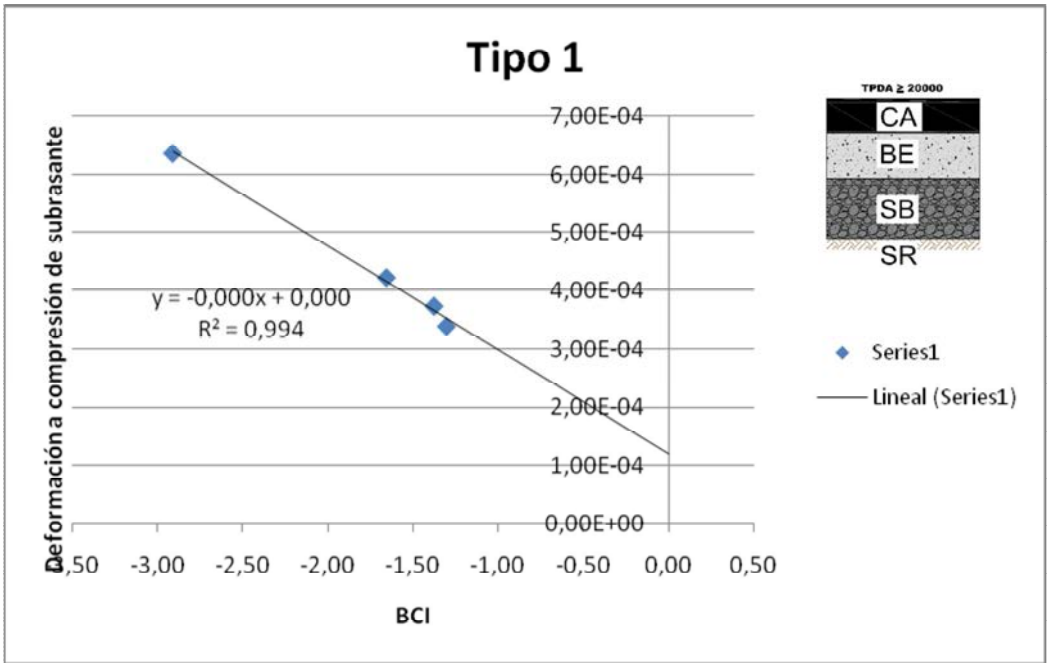


Gráfico 33. Correlación BCI vs ε_c, tipo 2.

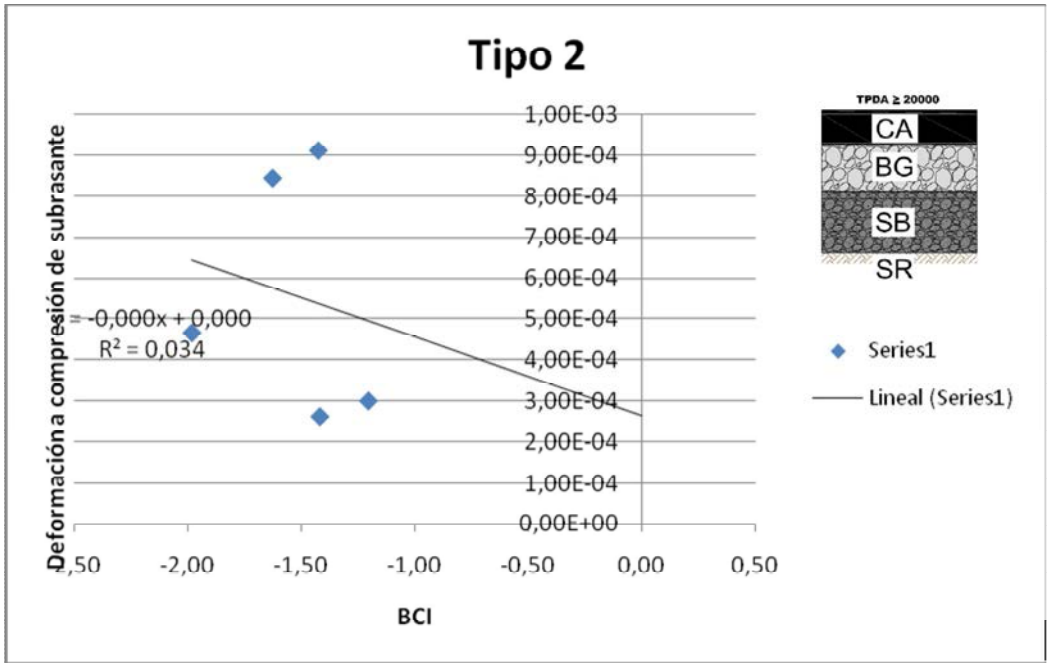


Gráfico 34. Correlación BCI vs ε_c, tipo 3.

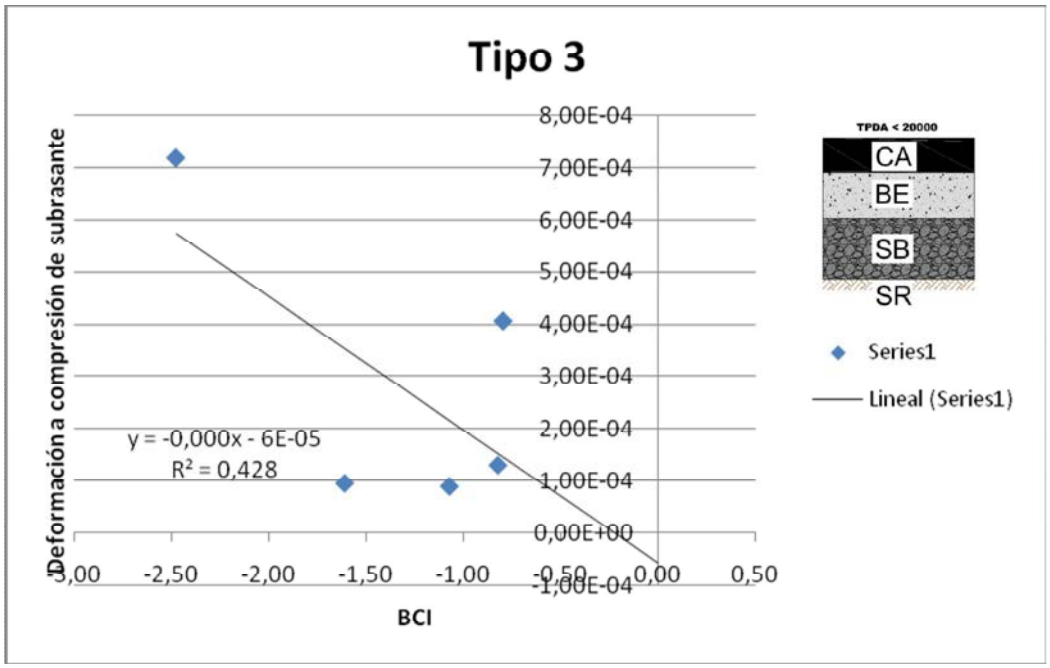


Gráfico 35. Correlación BCI vs ε_c, tipo 4.

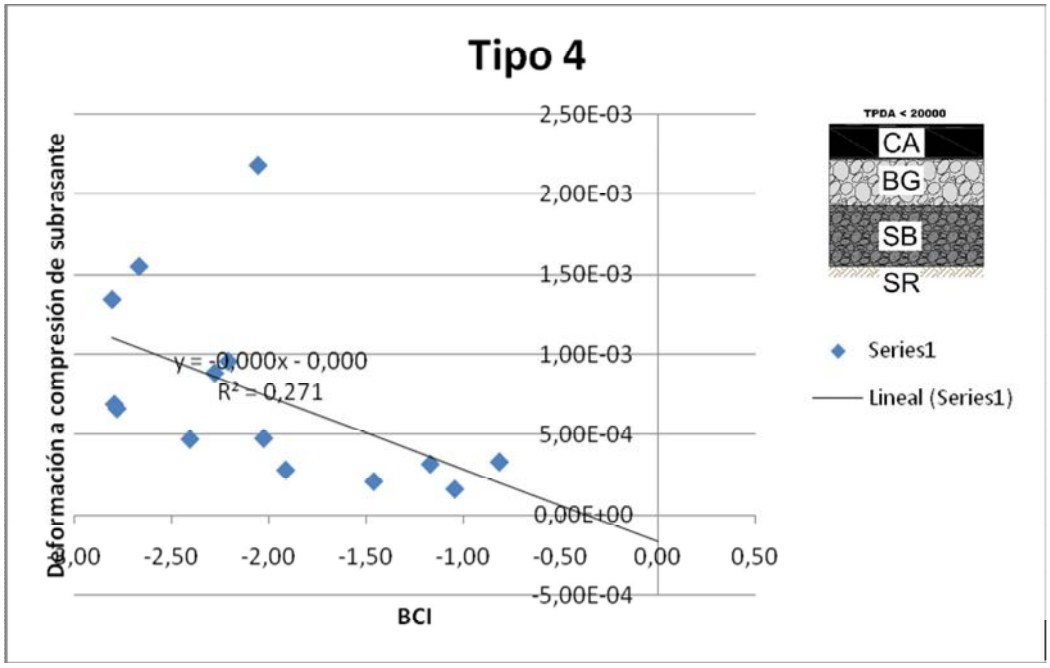


Gráfico 36. Correlación BCI vs ε_c, tipo 5.

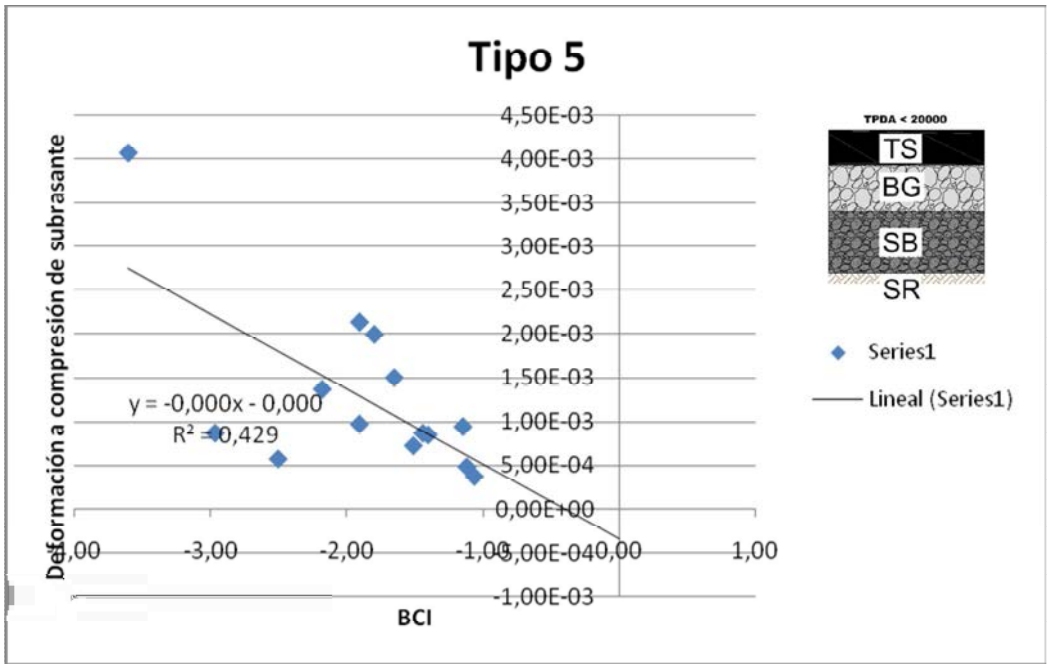
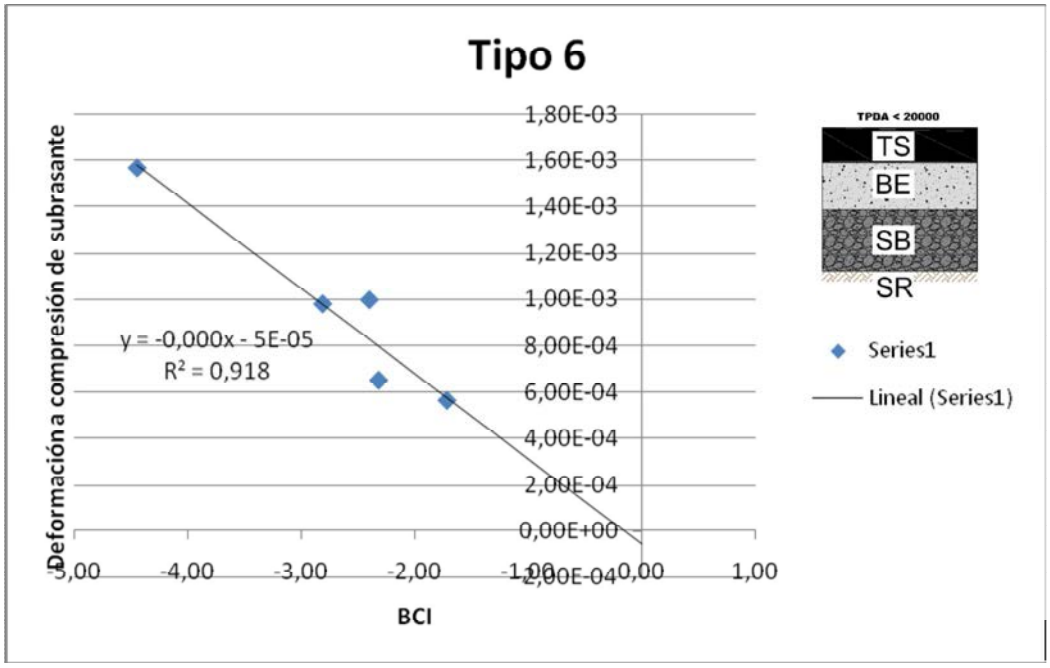


Gráfico 37. Correlación BCI vs ε_c, tipo 6.



9.6. ANEXO F. Resumen de la planificación estratégica para la zona de conservación del CONAVI 1-9 (Heredia). Resultados del software Woodstock de Remsoft Inc.

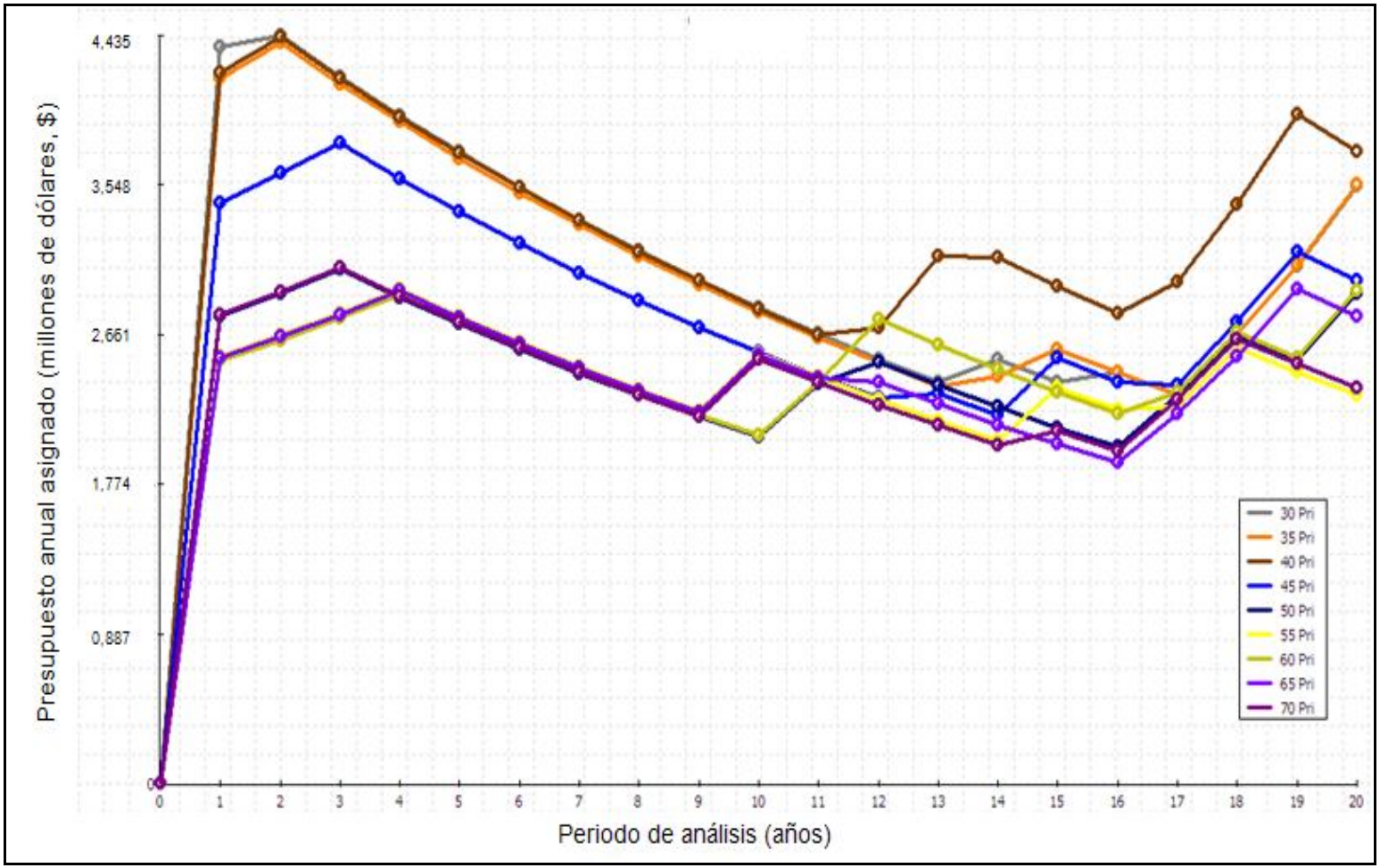


Figura 34. Costo total de la inversión.

Nota: en las leyendas “30 PRI” significa un valor de 0.30 para la constante k_{PRI} de la ecuación del PCI (ecuación 1).

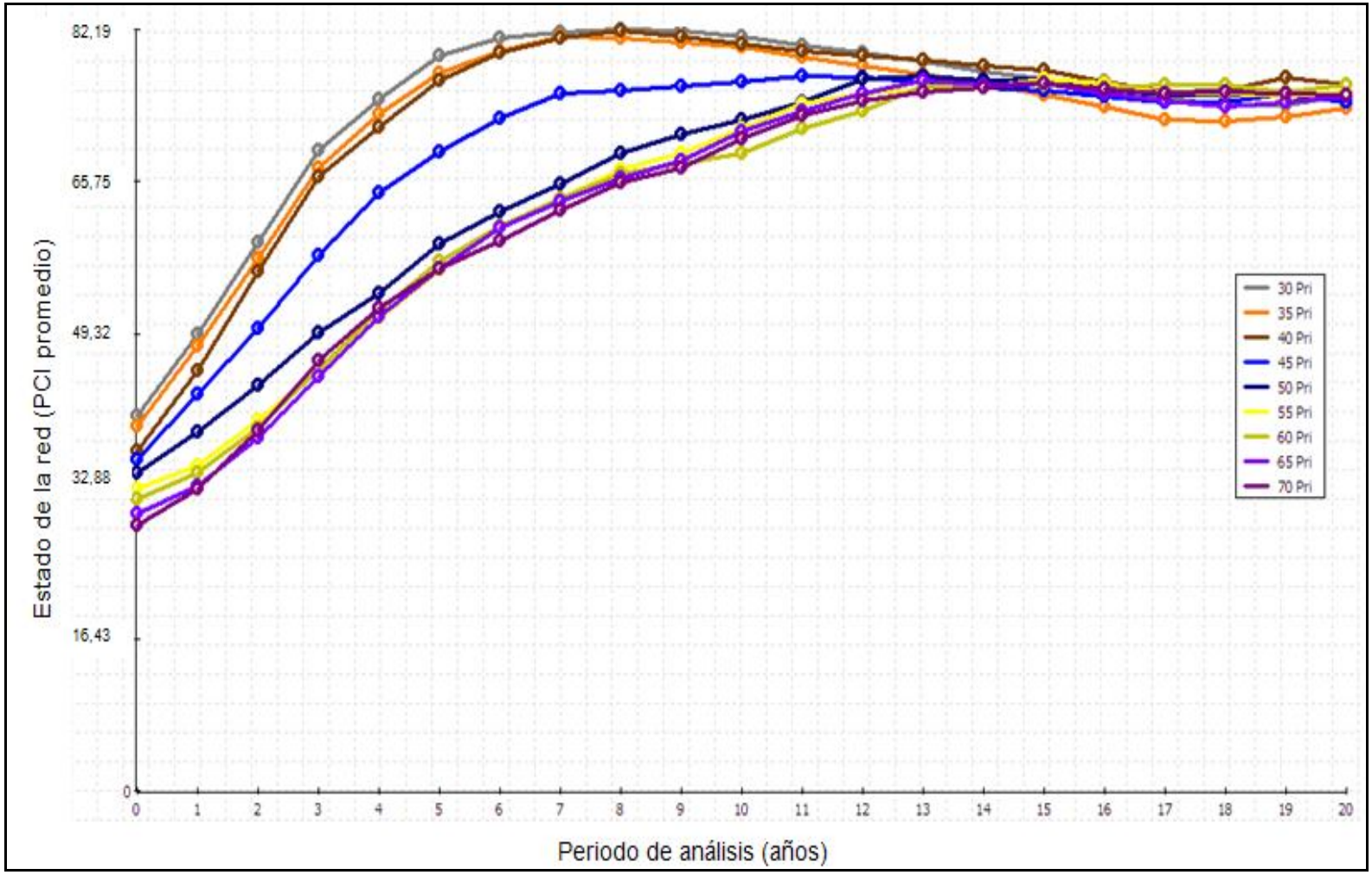


Figura 35. Estado de la red estudiada (ΣPCI).

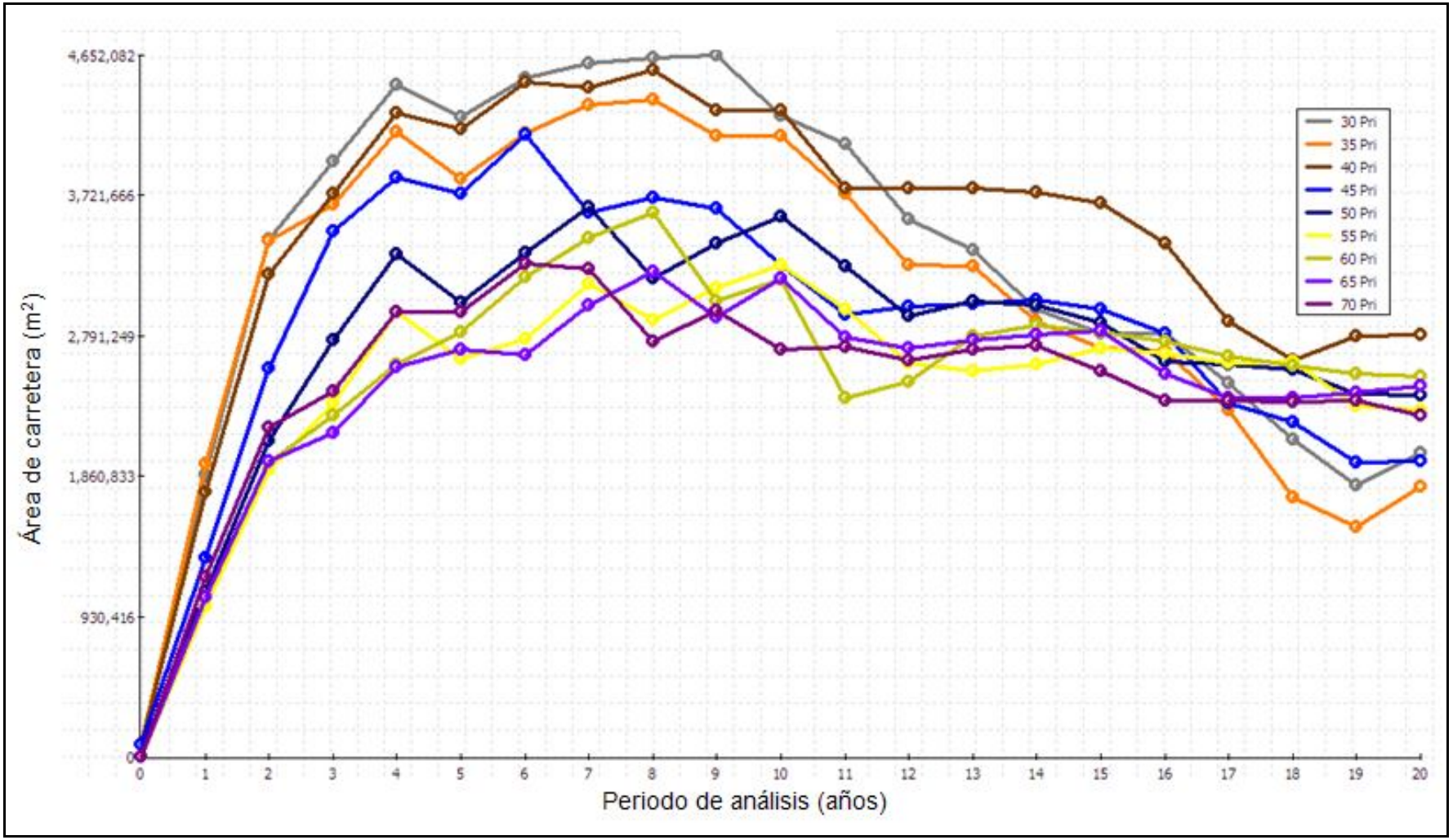


Figura 36. Comportamiento anual de la cantidad de carreteras en muy buen estado, en m^2.

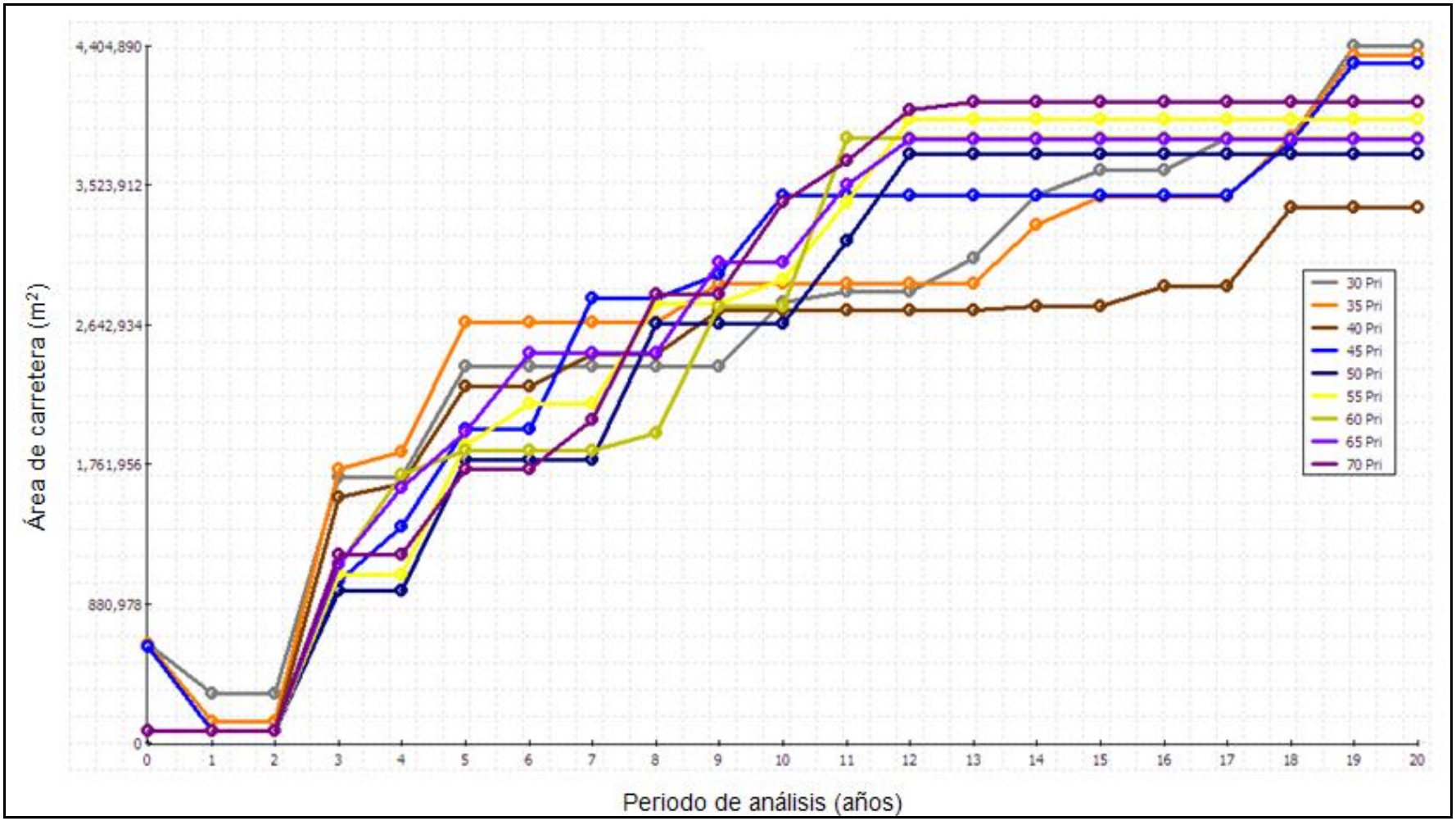


Figura 37. Comportamiento anual de la cantidad de carreteras en buen estado, en m^2.

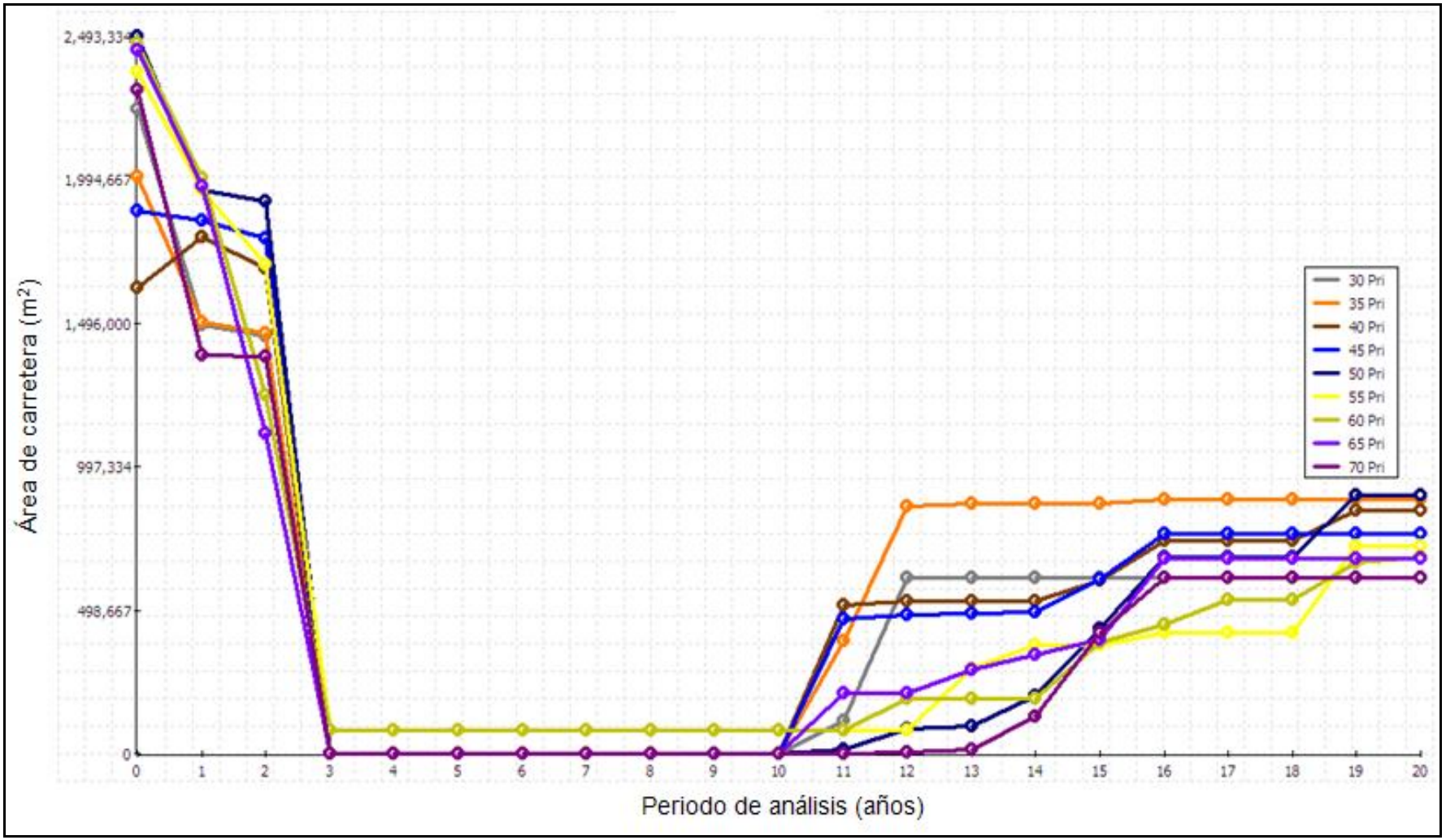


Figura 38. Comportamiento anual de la cantidad de carreteras en regular estado, en m^2.

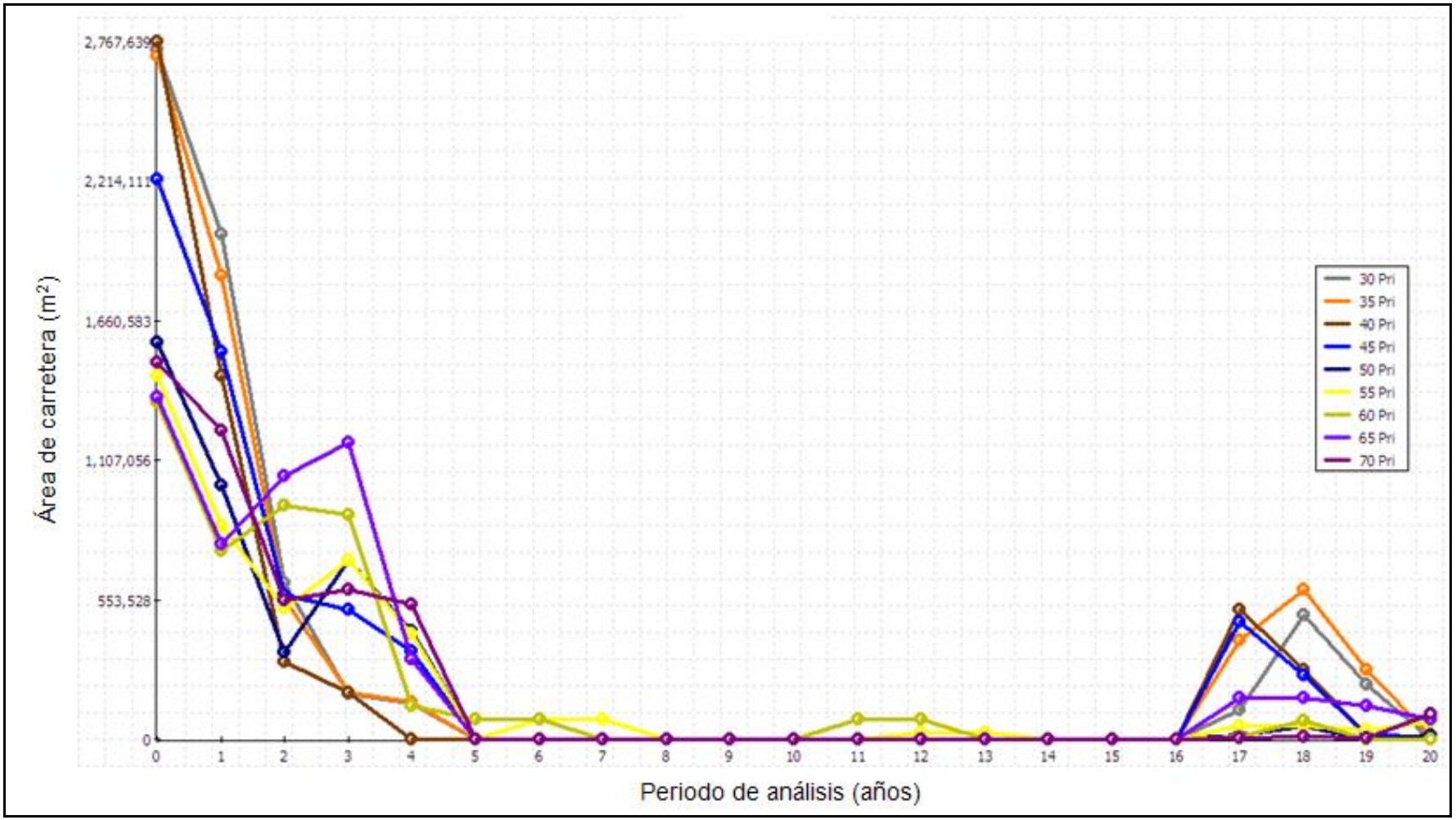


Figura 39. Comportamiento anual de la cantidad de carreteras en mal estado, en m^2.

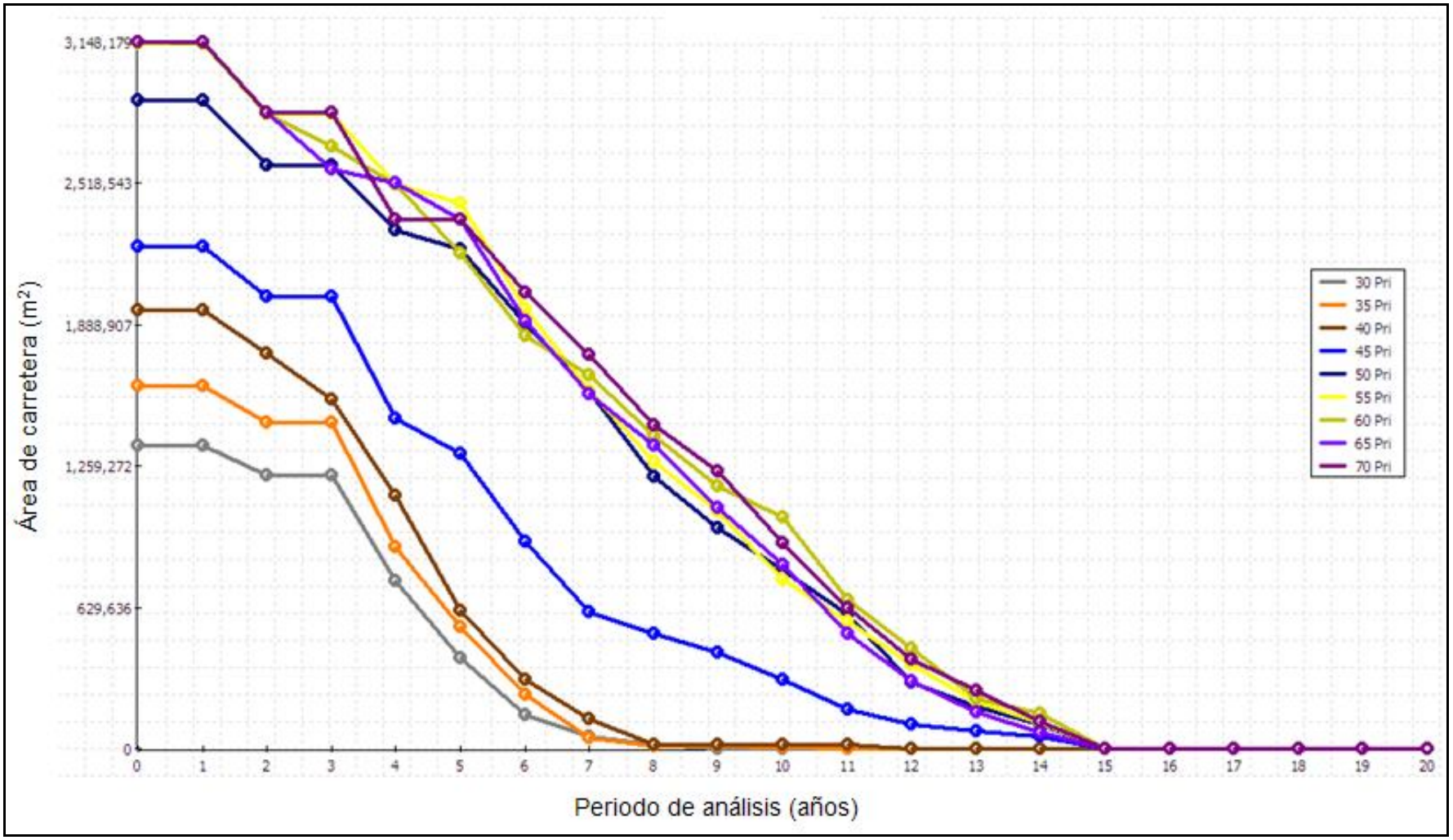


Figura 40. Comportamiento anual de la cantidad de carreteras en muy mal estado, en m^2.

Tabla 50. Variación anual de los costos totales de inversión para cada escenario.

K_{PRI} / Periodo	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0
1	$ 4.363.519	$ 4.182.404	$ 4.216.352	$ 3.444.207	$ 2.766.725	$ 2.529.771	$ 2.502.172	$ 2.522.137	$ 2.774.755
2	$ 4.435.036	$ 4.391.524	$ 4.427.169	$ 3.616.418	$ 2.905.062	$ 2.656.260	$ 2.627.280	$ 2.648.243	$ 2.913.492
3	$ 4.191.109	$ 4.149.991	$ 4.183.675	$ 3.797.239	$ 3.050.315	$ 2.789.073	$ 2.758.644	$ 2.780.656	$ 3.059.167
4	$ 3.960.598	$ 3.921.741	$ 3.953.573	$ 3.588.391	$ 2.882.547	$ 2.928.526	$ 2.896.577	$ 2.919.688	$ 2.890.913
5	$ 3.742.765	$ 3.706.045	$ 3.736.126	$ 3.391.029	$ 2.724.007	$ 2.767.457	$ 2.737.265	$ 2.759.105	$ 2.731.912
6	$ 3.536.913	$ 3.502.213	$ 3.530.639	$ 3.204.522	$ 2.574.187	$ 2.615.247	$ 2.586.715	$ 2.607.355	$ 2.581.657
7	$ 3.342.383	$ 3.309.591	$ 3.336.454	$ 3.028.274	$ 2.432.607	$ 2.471.409	$ 2.444.446	$ 2.463.950	$ 2.439.666
8	$ 3.158.552	$ 3.127.564	$ 3.152.949	$ 2.861.719	$ 2.298.813	$ 2.335.481	$ 2.310.001	$ 2.328.433	$ 2.305.485
9	$ 2.984.832	$ 2.955.547	$ 2.979.537	$ 2.704.324	$ 2.172.378	$ 2.207.030	$ 2.182.951	$ 2.200.369	$ 2.178.683
10	$ 2.820.666	$ 2.792.992	$ 2.815.662	$ 2.555.586	$ 2.052.898	$ 2.549.119	$ 2.062.889	$ 2.541.426	$ 2.516.379
11	$ 2.665.529	$ 2.639.378	$ 2.660.801	$ 2.415.029	$ 2.371.097	$ 2.408.918	$ 2.382.637	$ 2.401.648	$ 2.377.978
12	$ 2.518.925	$ 2.494.212	$ 2.703.404	$ 2.282.202	$ 2.500.444	$ 2.276.427	$ 2.751.945	$ 2.382.794	$ 2.247.189
13	$ 2.380.384	$ 2.357.030	$ 3.122.432	$ 2.310.220	$ 2.362.919	$ 2.151.224	$ 2.600.588	$ 2.251.740	$ 2.123.594
14	$ 2.515.460	$ 2.412.798	$ 3.117.708	$ 2.183.157	$ 2.232.959	$ 2.032.906	$ 2.457.556	$ 2.127.895	$ 2.006.796
15	$ 2.377.109	$ 2.578.455	$ 2.946.234	$ 2.521.547	$ 2.110.146	$ 2.348.007	$ 2.322.390	$ 2.010.860	$ 2.086.256
16	$ 2.434.450	$ 2.436.640	$ 2.784.191	$ 2.382.862	$ 1.994.088	$ 2.218.867	$ 2.194.659	$ 1.900.263	$ 1.971.512
17	$ 2.300.555	$ 2.302.625	$ 2.971.172	$ 2.365.664	$ 2.303.172	$ 2.234.299	$ 2.315.586	$ 2.194.804	$ 2.277.097
18	$ 2.657.141	$ 2.659.531	$ 3.431.704	$ 2.732.342	$ 2.660.163	$ 2.580.615	$ 2.674.502	$ 2.534.998	$ 2.630.046
19	$ 3.068.998	$ 3.071.759	$ 3.963.618	$ 3.155.855	$ 2.513.854	$ 2.438.681	$ 2.527.404	$ 2.927.923	$ 2.485.394
20	$ 3.544.693	$ 3.547.881	$ 3.745.619	$ 2.982.283	$ 2.903.502	$ 2.304.554	$ 2.919.152	$ 2.766.887	$ 2.348.697

Tabla 51. Variación anual de la condición total de la red para cada escenario (PCI promedio).

K_{PRI} / Periodo	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
0	40,53	39,32	36,76	35,69	34,29	32,60	31,47	29,93	28,59
1	49,28	48,00	45,37	42,77	38,69	35,05	34,37	32,92	32,53
2	59,27	57,54	56,10	49,92	43,82	40,01	39,24	38,12	38,86
3	69,07	67,22	66,31	57,86	49,48	45,55	45,46	44,77	46,38
4	74,60	73,07	71,63	64,51	53,72	51,04	51,85	51,14	52,16
5	79,30	77,42	76,72	68,96	59,01	56,18	57,19	56,39	56,41
6	81,24	79,80	79,69	72,55	62,46	60,83	60,95	60,70	59,39
7	81,94	81,44	81,18	75,31	65,53	63,97	63,87	63,68	62,66
8	82,19	81,26	81,98	75,57	68,81	67,13	66,59	66,14	65,62
9	81,98	80,83	81,44	75,98	70,85	68,81	67,66	68,07	67,31
10	81,40	80,34	80,66	76,49	72,35	71,48	68,77	71,24	70,40
11	80,48	79,24	79,87	77,19	74,32	74,09	71,55	73,40	72,87
12	79,74	78,25	79,41	77,07	76,80	75,20	73,44	75,25	74,50
13	78,79	77,33	78,96	76,56	77,15	75,77	75,99	76,70	75,49
14	77,68	76,31	78,29	75,96	76,71	75,89	76,09	76,19	75,87
15	76,80	75,15	77,73	75,66	76,90	76,77	76,14	76,43	76,41
16	75,76	73,89	76,60	74,96	75,68	76,33	75,91	75,34	75,66
17	74,74	72,36	75,40	74,39	75,07	75,30	76,18	74,44	75,25
18	74,02	72,21	75,63	74,31	75,05	75,28	76,17	73,85	75,40
19	74,02	72,67	77,05	75,32	75,00	75,01	75,40	74,40	75,24
20	75,11	73,68	76,17	74,33	74,97	75,36	76,17	75,03	75,13

9.7. ANEXO G. Gráficas para corrección por temperatura (fuente: AASHTO, 1993).

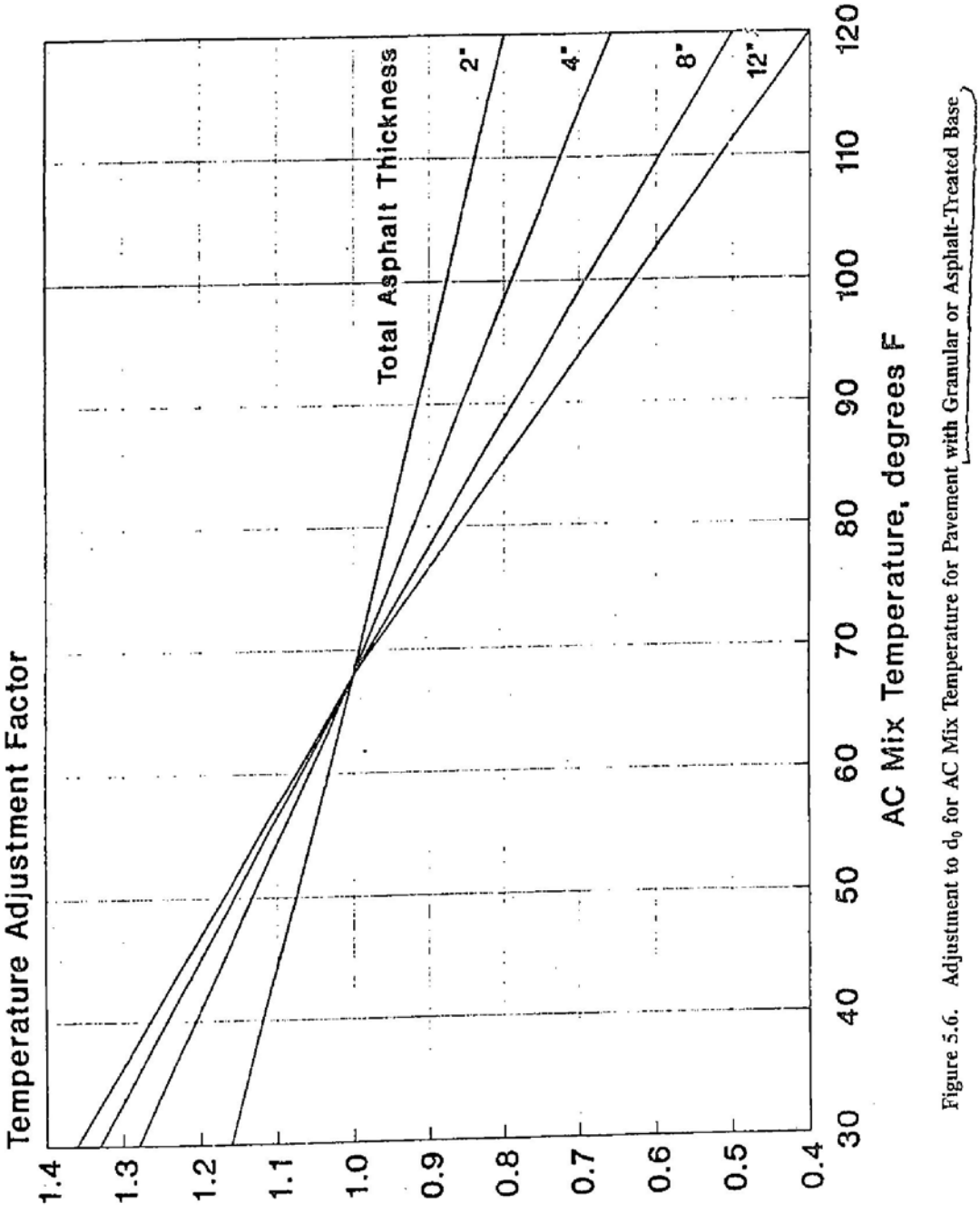


Figure 5.6. Adjustment to d_0 for AC Mix Temperature for Pavement with Granular or Asphalt-Treated Base

Figura 41[52]**.** Factor de corrección por temperatura para estructuras con bases granulares.

[52] Tomado de Guía de diseño AASHTO 93

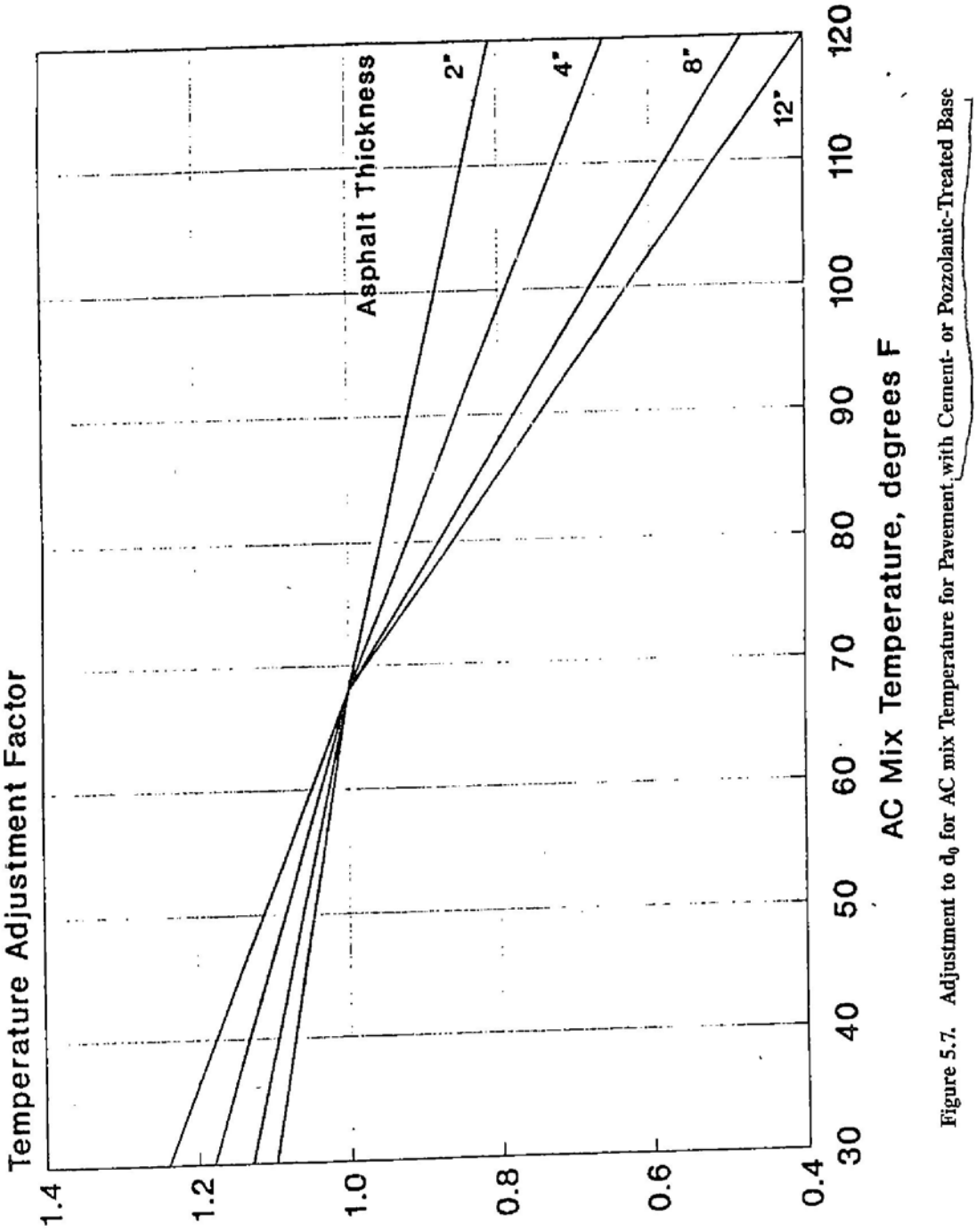


Figure 5.7. Adjustment to d_0 for AC mix Temperature for Pavement with Cement- or Pozzolanic-Treated Base

Figura 42[53]. Factor de corrección por temperatura para estructuras con bases estabilizadas.

[53] Tomado de Guía de diseño AASHTO 93