

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL



“Evaluación de las intervenciones de mantenimiento periódico en capas asfálticas delgadas mediante indicadores de desempeño en la ruta nacional No. 135, sección de control No. 20811 en el sector de Palmares de Alajuela, Costa Rica”

Proyecto de graduación para optar por el grado académico de
Maestría en Ingeniería Vial.

Realizado por:
Alfonso Quesada Solís

Profesor Tutor:
Ing. Adriana Vargas Nordbeck. MBA. PhD.

Cartago, Noviembre del 2015

DEDICATORIA

A mis padres, hermano y demás familiares y especialmente a mi novia quienes estuvieron a mi lado con su apoyo total.

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso quien por medio de mi salvador personal Cristo me ha dado la fortaleza de mantenerme en el camino de la verdad y finalizar esta meta.

EPÍGRAFE

Jehová es mi pastor; nada me faltará.

INDICE GENERAL

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1. ANTECEDENTES, JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1.1. Planteamiento del Problema	4
1.1.2. Antecedentes y Justificación del estudio	4
1.2. OBJETIVOS.....	8
1.2.1. Objetivo General.....	8
1.2.2. Objetivos Específicos	8
1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES.	8
1.3.1. Alcance.....	8
1.3.2. Limitaciones.....	9
2. CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
2.1. ANÁLISIS CONCEPTUAL	10
2.2. EL IRI EN LAS CARRETERAS	11
2.3. EL PCI EN LAS CARRETERAS	13
2.4. LAS DEFLEXIONES MEDIDAS CON EL FWD EN LAS CARRETERAS	14
2.5. ANÁLISIS A NIVEL NACIONAL	18
3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	23
3.1. IDENTIFICACIÓN DEL TRAMO DE INVESTIGACIÓN.	23
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN	25
3.3. FUENTES Y SUJETOS DE INFORMACIÓN	25
3.3.1. Fuentes	25
3.3.2. Sujetos de información	26
3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN	27
3.4.1. Revisión documental	27
3.4.2. Análisis del PCI.....	27
3.4.3. Equipo de laboratorio	29
3.4.4. Análisis de nota de calidad Q	32
3.4.5. Análisis de contenido	33
3.4.6. Análisis estadísticos prueba “T Pareada”, prueba “Anova” y prueba “Tukey”	33
3.4.7. Análisis económico	34
3.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	36
3.5.1. Objetivo 1. Evaluar la condición actual del tramo de investigación sobre la Ruta Nacional No. 135, mediante el cálculo del indicador PCI y la nota de calidad Q a partir de las mediciones del IRI y las deflexiones con el FWD.	36
3.5.2. Objetivo 2. Aplicar las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico en el tramo de investigación sobre la Ruta Nacional No. 135.	36
3.5.3. Objetivo 3. Evaluar la condición del tramo de investigación una vez se hayan aplicado las técnicas de mantenimiento sobre la Ruta Nacional No. 135, mediante el cálculo de la nota de calidad Q a partir de las mediciones del IRI y las deflexiones con el FWD.	37

3.5.4.	Objetivo 4. Comparar cada una de las técnicas de mantenimiento vial a partir de los índices de desempeño y su análisis costo beneficio	37
4.	CAPÍTULO IV: RESULTADOS	38
4.1.	Objetivo 1. Evaluar la condición actual del tramo de investigación sobre la Ruta Nacional No. 135, mediante el cálculo del indicador PCI y la nota de calidad Q a partir de las mediciones del IRI y las deflexiones con el FWD	38
4.1.1.	Identificación del tramo de investigación.	38
4.1.2.	Análisis inicial de tramo de investigación.	43
4.2.	Objetivo 2. Aplicar las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico en el tramo de investigación sobre la Ruta Nacional No. 135.	47
4.2.1.	Aplicación de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico.	47
4.3.	Objetivo 3. Evaluar la condición del tramo de investigación una vez se hayan aplicado las técnicas de mantenimiento sobre la Ruta Nacional No. 135, mediante el cálculo de la nota de calidad Q a partir de las mediciones del IRI y las deflexiones con el FWD. .	49
4.3.1.	Análisis post-aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico en el tramo de investigación.	49
4.3.2.	Corrección de deflectometría por efectos de la temperatura.	52
4.3.3.	Análisis estadístico prueba “t pareada” de los resultados obtenidos para la evaluación con el indicador del IRI.....	59
4.3.4.	Análisis estadístico prueba “t pareada” de los resultados obtenidos para la evaluación con el indicador del FWD.	61
4.3.5.	Análisis estadístico prueba “Anova y Tukey” de los resultados obtenidos para la evaluación con el indicador del IRI.	63
4.3.6.	Análisis estadístico prueba “Anova y Tukey” de los resultados obtenidos para la evaluación con el indicador del FWD.	65
4.4.	Objetivo 4. Comparar cada una de las técnicas de mantenimiento vial a partir de los índices de desempeño y su costo económico asociado.	67
4.4.1.	Determinación de costos de cada técnica de mantenimiento vial periódico en el tramo de investigación.....	67
4.4.2.	Estimación de los porcentajes de mejora en los indicadores de IRI y FWD para el tramo de investigación.	68
4.4.3.	Análisis técnico-económico de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación.	69
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
5.1.	Conclusiones	71
5.2.	Recomendaciones.....	71
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
7.	APÉNDICES	75

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1. Mapa de Costa Rica con división en 22 Zonas de Conservación Vial.	5
Figura 1.2. Distribución general de las categorías de deflectometría de la Red Vial Nacional Pavimentada.	7
Figura 2.1. Representación gráfica del impacto anual de técnicas de mantenimiento vial en el estado de Michigan de Estados Unidos de América.	10
Figura 2.2. Representación gráfica de la precepción vehicular con respecto a valores del IRI.	11
Figura 2.3. Representación gráfica del aumento de los costos de operación vehicular (COV) según el aumento en los valores del IRI.	12
Figura 2.4. Representación gráfica de la condición funcional (IRI) de la Red Vial Nacional de Costa Rica.	13
Figura 2.5. Ilustración del registro de campo para la evaluación de carreteras mediante el PCI. .	14
Figura 2.6. Ejemplificación de las pruebas destructivas y no destructivas aplicables a los pavimentos para la estimación de la capacidad estructural.	15
Figura 2.7. Ilustración de la Cuenca de Deflexiones producida en un pavimento ante el impacto del FWD.	16
Figura 2.8. Representación gráfica de la condición estructural (FWD de la Red Vial Nacional de Costa Rica.	17
Figura 2.9. Curva de deterioro del pavimento de una carretera en función del PSI.	20
Figura 2.10. Ilustración del enfoque del comportamiento de los pavimentos de Costa Rica acorde con sus necesidades funcionales y estructurales.	21
Figura 2.11. Curva de deterioro del pavimento de una carretera en función del PCI.	22
Figura 3.1. Esquema metodológico del proyecto de investigación.	23
Figura 3.2. Ubicación del tramo de investigación identificado en la Ruta Nacional No. 135, Sección de Control No. 20811.	24
Figura 3.3. Pasos básicos en la metodología de la norma ASTM D6433 para auscultación de pavimentos PCI.	27
Figura 3.4. Parte I del diagrama de flujo para la identificación de las unidades de muestreo (UM) para la auscultación de pavimentos PCI del tramo de investigación.	28
Figura 3.5. Parte II del diagrama de flujo para la identificación de las unidades de muestreo (UM) para la auscultación de pavimentos PCI del tramo de investigación.	28
Figura 3.6. Esquema representativo del funcionamiento del GPR del LANAMMEUCR.	29
Figura 3.7. Perfilómetro inercial láser del LANAMMEUCR.	30
Figura 3.8. Deflectómetro de impacto del LANAMMEUCR.	31
Figura 3.9. Esquema de evaluación para la obtención de la nota de calidad Q.	33
Figura 3.10. Distribución típica del estadístico “t pareada” para medias de dos muestras emparejadas en prueba de dos colas.	34
Figura 4.1. Imagen del GPR para la estructura de pavimento del tramo de investigación.	38
Figura 4.2. Imagen del GPR para la estructura de pavimento del tramo de investigación.	39
Figura 4.3. Comportamiento del IRI en el tramo homogéneo sobre la Ruta Nacional No. 135, Sección de Control No. 20811, previo a la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.	44
Figura 4.4. Comportamiento de las deflexiones en el tramo homogéneo sobre la Ruta Nacional No. 135, Sección de Control No. 20811, previo a la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.	45

Figura 4.5. Actividades de bacheo formal y sellado de grietas realizadas previo a la colocación de la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor.....	49
Figura 4.6. Actividades de perfilado de pavimentos y colocación de la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor.	49
Figura 4.7. Comportamiento del IRI en el tramo homogéneo sobre la Sección de Control No. 20811 de la Ruta Nacional No. 135, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.....	50
Figura 4.8. Comportamiento de las deflexiones en el tramo homogéneo sobre la Sección de Control No. 20811 de la Ruta Nacional No. 135, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.....	51
Figura 4.9. Temperatura en función del espesor de la capa asfáltica.	53
Figura 4.10. Nomograma empleado para el cálculo del factor de corrección para las deflexiones obtenidas con el FWD por efectos de la temperatura promedio del pavimento.	55
Figura 4.11. Comportamiento de las deflexiones en el tramo homogéneo sobre la Sección de Control No. 20811 de la Ruta Nacional No. 135, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico y con el factor de corrección por efectos de la temperatura promedio del pavimento.	58
Figura 4.12. Comparación estadística entre las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico ejecutadas en el tramo de investigación para los resultados del IRI.	65
Figura 4.13. Comparación estadística entre las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico ejecutadas en el tramo de investigación para los resultados de las deflexiones medidas con el FWD.	67

INDICE DE CUADROS.

Cuadro 3.1. Identificación del tramo de investigación del proyecto.	25
Cuadro 3.2. Clasificación de la calidad de un pavimento según análisis PCI.	29
Cuadro 3.3. Clasificación de la calidad de un pavimento según análisis IRI.	31
Cuadro 3.4. Clasificación de la calidad de un pavimento según análisis con el FWD para Costa Rica.	32
Cuadro 3.5. Costos de las actividades de mantenimiento vial utilizadas.	35
Cuadro 3.6. Ordenamiento de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico, en sentido Palmares–San Ramón.	36
Cuadro 4.1. Espesores aproximados del pavimento del tramo de investigación seleccionado.	39
Cuadro 4.2. Evaluación del tramo de investigación mediante la metodología del PCI, según norma ASTM D6433.	41
Cuadro 4.3. Evaluación de un tramo de 140 metros antes del tramo de investigación en el estacionamiento 5+070, mediante la metodología del PCI, según norma ASTM D6433.	42
Cuadro 4.4. Evaluación de un tramo de 140 metros después del tramo de investigación en el estacionamiento 6+950, mediante la metodología del PCI, según norma ASTM D6433.	42
Cuadro 4.5. Estimación y crecimiento del TPD para el tramo de investigación.	43
Cuadro 4.6. Promedios del IRI en cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, previo a la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.	44
Cuadro 4.7. Promedios de las deflexiones en cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, previo a la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.	46
Cuadro 4.8. Notas de Calidad Q para cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, previo a la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.	46
Cuadro 4.9. División del tramo de investigación seleccionado para la aplicación de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico.	47
Cuadro 4.10. Equipo utilizado para la aplicación de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación seleccionado.	48
Cuadro 4.11. Promedios del IRI en cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.	50
Cuadro 4.12. Promedios de las deflexiones en cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.	52
Cuadro 4.13. Valores de temperatura en la fibra inferior del pavimento existente $t_{inf.pav}$ y temperatura promedio del pavimento t_{pav} para el tramo de investigación seleccionado.	53
Cuadro 4.14. Resultados obtenidos para la corrección por efectos de temperatura de las deflexiones para el tramo de investigación seleccionado.	56
Cuadro 4.15. Promedios de las deflexiones en cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial y con el factor de corrección por efectos de la temperatura promedio del pavimento.	58
Cuadro 4.16. Notas de Calidad Q para cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.	59
Cuadro 4.17. Resultados del análisis estadístico con el criterio “t pareada” para cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado para el indicador IRI, en el sentido Palmares-San Ramón.	60

Cuadro 4.18. Resultados del análisis estadístico con el criterio “t pareada” para cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado para el indicador IRI, en el sentido San Ramón-Palmares.	61
Cuadro 4.19. Resultados del análisis estadístico con el criterio “t pareada” para cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado para las deflexiones con el FWD, en el sentido Palmares-San Ramón.....	62
Cuadro 4.20. Resultados del análisis estadístico con el criterio “t pareada” para cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado para las deflexiones con el FWD, en el sentido San Ramón-Palmares.....	63
Cuadro 4.21. Resultados obtenidos para el análisis “Anova” para los resultados del IRI de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación seleccionado. ...	64
Cuadro 4.22. Resultados obtenidos para el análisis “Anova” para los resultados de las deflexiones obtenidas con el FWD de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación seleccionado.....	66
Cuadro 4.23. Costos globales calculados para cada una de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación seleccionado.	68
Cuadro 4.24. Porcentajes de mejora en el IRI para el tramo de investigación seleccionado.	68
Cuadro 4.25. Porcentajes de mejora en las deflexiones para el tramo de investigación seleccionado.	69
Cuadro 4.26. Relaciones Costo-Beneficio, con datos del IRI, para cada una de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación seleccionado.	70
Cuadro 4.27. Relaciones Costo-Beneficio, con datos de las deflexiones, para cada una de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación seleccionado. ...	70

ABREVIATURAS

ASTM: American Society for Testing and Materials.

BM: Banco Mundial.

CONAVI: Consejo Nacional de Vialidad.

FWD: Falling Weight Deflectometer (Deflectómetro de impacto).

GPR: GeoRadar de Penetración.

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad.

IRI: Índice de Regularidad Superficial.

LANAMMEUCR: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.

LCA: Ley de Contratación Administrativa.

LGCP: Ley General de Caminos Públicos.

LOS: Nivel de Servicio de una carretera.

MAC: Mezcla asfáltica en caliente.

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

PCI: Índice de Condición del Pavimento.

PSI: Índice de Serviciabilidad Presente

PSR: Clasificación de Serviciabilidad Presente

TRB: Transportation Research Board.

TPD: Tránsito Promedio Diario.

GLOSARIO

Análisis estadístico “t pareada”: Cualquier prueba estadística en la que el estadístico utilizado tiene una distribución t de student si la hipótesis nula es cierta.

Análisis estadístico “Anova”: Colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, en el cual la varianza está particionada en ciertos componentes debidos a diferentes variables explicativas.

Análisis estadístico “Tukey”: Tratamiento estadístico al que se someten las muestras recogidas durante un proceso de investigación en cualquier campo científico.

American Society for Testing and Materials (ASTM): Entidad internacional especializada en normativas de calidad para la evaluación de carreteras.

Asamblea Legislativa: Órgano unicameral encargado de la aprobación de las leyes en Costa Rica.

Back-Hoe: Equipo mecánico usado para la excavación.

Banco Mundial: Organismo especializado en la asistencia financiera y técnica para países en desarrollo.

Clasificación de Serviciabilidad Presente (PSR): Relación entre la opinión de los conductores, que al transitar tramos de las pistas de ensayo emplearon una escala de calificación del 1 al 5, donde 1 representa una condición muy mala y 5 una condición excelente.

Conservación vial: Conjunto de actividades destinadas a preservar, en forma continua y sostenida, el buen estado de las vías, de modo que se garantice un servicio óptimo al usuario. La conservación comprende actividades tales como; el mantenimiento rutinario y periódico, la rehabilitación y el refuerzo de la superficie de ruedo, así como el mantenimiento y la rehabilitación de las estructuras de puentes. La conservación vial no comprende la construcción de vías nuevas ni partes de ellas; tampoco, la reconstrucción ni el mejoramiento de vías. La restauración de vías provocada por emergencias no forma parte de la conservación vial, salvo lo dispuesto en la ley 7798 como excepción.

Compactadora: Equipo mecánico utilizado para obtener la compactación de diseño para las carpetas asfálticas.

Deflectómetro de Impacto (FWD): Indicador vial que permite medir las deflexiones superficiales obtenidas al someter al pavimento a una fuerza que simula cargas de tránsito, lo que permite inferir la capacidad soportante de dicho pavimento, y con ello, la vida útil remanente en dicha estructura.

Dirección regional: Región geográfica formada por distintas zonas de conservación vial.

Director regional: Persona a cargo de una región de conservación vial.

Gaceta: Periódico oficial de Costa Rica.

GeoRadar de Penetración (GPR): Técnica no destructiva que permite detectar y aproximar espesores de las capas subyacentes de una carretera.

Índice de Condición del Pavimento (PCI): Auscultación visual del estado de un pavimento.

Índice de Regularidad Internacional (IRI): Indicador vial que permite cuantificar la regularidad o rugosidad de una carretera y se define como la suma de las irregularidades de la superficie por unidad una de longitud, lo que es percibido por el usuario como el confort de marcha.

Índice de Serviciabilidad Presente (PSI): Combinación matemática de valores obtenidos de las evaluaciones de campo, para predecir el PSR de los pavimentos

Inspector de campo: Persona encargada de supervisar y fiscalizar la ejecución de una actividad en lugar donde se ejecuta.

Ley 7798: Ley de creación del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI).

Ley de Contratación Administrativa: Régimen jurídico que establece las condiciones legales para ejecutar las obras y servicios públicos en Costa Rica.

Ley General de Caminos Públicos (LGCP): Ley que regula la administración de los caminos públicos de Costa Rica.

Mantenimiento rutinario: Conjunto de labores de limpieza de drenajes, control de vegetación, reparaciones menores y localizadas del pavimento y la restitución de la demarcación, que deben efectuarse de manera continua y sostenida a través del tiempo, para preservar la condición operativa el nivel de servicio y seguridad de las vías. Incluye también la limpieza y las reparaciones menores y localizadas, de las estructuras de los puentes.

Mantenimiento periódico: Conjunto de actividades programables cada cierto período, tendientes a renovar la condición original de los pavimentos, mediante la aplicación de capas adicionales de lastre, grava, tratamientos superficiales o recarpeteos asfálticos o de secciones de concreto, según el caso, sin alterar la estructura de las capas del pavimento subyacente. El mantenimiento periódico de los puentes incluye la limpieza, pintura y reparación o cambio de elementos estructurales dañados.

Mejoramiento: Mejoras o modificaciones de estándar, horizontal o vertical, de los caminos, relacionadas con el ancho, el alineamiento, la curvatura o la pendiente longitudinal; a fin de incrementar la capacidad de la vía, la velocidad de circulación y aumentar la seguridad de los vehículos. También se incluyen dentro de esta categoría, la ampliación de la calzada, la elevación del estándar del tipo de superficie de tierra a lastre o de lastre a asfalto, entre otros; y la construcción de estructuras tales como alcantarillas grandes, puentes o intersecciones.

Nivel de Servicio de una carretera (LOS): Medida cualitativa utilizada para calificar los servicios de tránsito de una carretera.

Obras nuevas: Construcción de todas las obras viales que se incorporen a la red nacional existente, de acuerdo con la ley 7798.

Oficina regional: Corresponde a cualquiera de las Direcciones Regionales, en las cuales está dividida las áreas de conservación vial del país.

Pavimentadora (Finisher): Equipo mecánico especial usado para la colocación de carpetas asfálticas en carreteras.

Perfiladora de pavimentos: Equipo mecánico especial utilizado para la escarificación de carreteras de asfalto.

Perfilómetro Láser: Equipo de última generación que permite evaluar la condición de regularidad superficial de las carreteras, mediante un índice de estado estandarizado internacionalmente, denominado IRI.

Programa: Grupo de proyectos relacionados cuya gestión se realiza de manera coordinada para obtener beneficios y control, que no se obtendrían si se gestionaran de forma individual.

Proyecto: Esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único.

Radars de penetración en tierra o GeoRadar: Sistema electromagnético para el estudio no destructivo e identificación de una estructura de pavimento.

Reconstrucción: Renovación completa de la estructura del camino, con previa demolición parcial o total de la estructura del pavimento o las estructuras del puente.

Red vial nacional: Conjunto de carreteras nacionales determinadas por el Consejo Nacional de Vialidad, la cual está compuesta de rutas primarias, secundarias, terciarias y de travesía.

Rehabilitación: Reparación selectiva y refuerzo del pavimento de la calzada, previa demolición parcial de la estructura existente, con el objeto de restablecer la solidez estructural y la calidad de ruedo originales. Además, por una sola vez, podrá incluir la construcción o reconstrucción del sistema de drenaje, que no implique construir puentes o alcantarillas mayores. Antes de cualquier actividad de rehabilitación en la superficie de ruedo, deberá verificarse que el sistema de drenaje funcione bien. La rehabilitación de puentes se refiere a reparaciones mayores, tales como el cambio de elementos o componentes estructurales principales o el cambio de la losa del piso.

Rutas primarias: Red de rutas troncales, para servir de corredores, caracterizados por volúmenes de tránsito relativamente altos y con una alta proporción de viajes internacionales, interprovinciales o de larga distancia.

Rutas secundarias: Rutas que conecten cabeceras cantonales importantes no servidas por carreteras primarias, así como otros centros de población, producción o turismo, que generen una cantidad considerable de viajes interregionales o intercantonales.

Rutas terciarias: Rutas que sirven de colectoras del tránsito para las carreteras primarias y secundarias, y que constituyen las vías principales para los viajes dentro de una región, o entre distritos importantes.

Rutas de travesía: Conjunto de carreteras públicas nacionales que atraviesan el cuadrante de un área urbana o de calles que unen dos secciones de carretera nacional en el área referida, de conformidad con el artículo 3 de la Ley General de Caminos Públicos (LGCP).

Tránsito Promedio Diario (TPD): Tránsito vehicular promedio que circula por una ruta en un día.

Transportation Research Board: Ente estadounidense especializado en la investigación en materia de ingeniería de transporte y vías.

RESUMEN

El presente proyecto presenta una valoración técnica, económica y estadística de cuatro actividades típicas de mantenimiento vial periódico usadas en Costa Rica, acorde con lo definido en la Ley No. 7798, las cuales se aplicaron para sobrecapas asfálticas de espesor delgado. La primera actividad consistió en un bacheo previo a la colocación de una sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor, la segunda se compuso de un sellado de grietas previo a una sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor, la tercera consistió solamente en una sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor y para la última se realizó un perfilado de 5 cm más una sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor. Todas se ejecutaron sobre un tramo homogéneo ubicado en la Sección de Control No. 20811 de la Ruta Nacional No. 135, entre el estacionamiento 5+210 al 6+810, elegido por presentar, acorde con el GeoRadar de Penetración (GPR), una tipología técnica similar como espesores de la estructura de pavimento y un estado de deterioro homogéneo, acorde con la evaluación visual del Índice de Condición del Pavimento (PCI, por sus siglas en inglés).

El problema radicó en que, en Costa Rica, no existe una definición técnica que permita optimizar los tipos de intervención de mantenimiento vial periódico que se aplican para mejorar el estado estructural y funcional de los pavimentos de las rutas nacionales, lo que repercute en una deficiencia en la inversión en obra pública.

La valoración técnica y económica consistió en medir los valores de la regularidad superficial o confort que sienten los usuarios, definido mediante el indicador vial IRI y de las deflexiones que presenta el pavimento, medido mediante el deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés), en conjunto con la Nota de calidad “Q”, la cual representa una calificación de la calidad del pavimento. Esta labor se realizó antes y después de aplicadas las cuatro actividades de mantenimiento vial periódico, con la finalidad de obtener el beneficio asignado a cada una de ellas, utilizando los porcentajes de mejora en los indicadores viales en conjunto con el costo asignado a cada actividad.

La valoración estadística se concentró en el análisis “Anova + Tukey” y la prueba “t pareada”, con la intención de determinar la consistencia y validez de los datos de los resultados de las mediciones de los indicadores viales.

Se evidenció que la colocación de sobrecapas asfálticas delgadas no mostró una mejora en las condiciones estructurales (deflexiones) de la sección de investigación, lo cual se reflejó en que las relaciones Costo-Beneficio no superaron el 0,35 para las cuatro actividades, donde a partir de valores de 1,00 se pueden considerar resultados positivos.

Sin embargo, se demostró que la colocación de sobrecapas asfálticas delgadas sí reveló una mejora en las condiciones funcionales (IRI) de la sección de investigación, lo cual se reflejó en que las relaciones Costo-Beneficio superaron el 1,25 e incluso para el perfilado y sobrecapa asfáltica alcanzó el 1,91, siendo ésta la actividad más eficiente en comparación con las otras tres actividades de mantenimiento vial periódico.

Finalmente, estos hallazgos permiten establecer que el perfilado de pavimentos con sobrecapas asfálticas delgadas otorga la mejor opción para la inversión de fondos estatales en obras públicas en materia de mantenimiento vial periódico.

Palabras clave

Pavimentos, IRI, FWD, técnicas de mantenimiento vial, sobrecapa asfáltica.

ABSTRACT

This project presents a technical, economic and statistical analysis of four typical periodic road maintenance activities used in Costa Rica, as defined in Law No. 7798, which were applied for thin asphalt overlays. The first activity consisted in patching before placing a 5 cm asphalt overlay. The second consisted of sealing cracks prior to a 5 cm asphalt overlay, the third consisted of a 5 cm asphalt overlay over the existing pavement and the last one implied milling 5 cm and placing a 5 cm asphalt overlay

Every technique was applied on a homogeneous section located in the Control Section No. 20811 of National Road No. 135, between kilometers 5 + 210 to 6 + 810, chosen because, according to the ge-penetrating radar (GPR), it presented a similar typology type such as thickness of the pavement structure and a consistent state of the pavement surface, according to the Pavement Index Condition (PCI) analysis.

The problem was that, in Costa Rica, there is no technical definition for optimizing periodic road maintenance interventions used to improve the structural and functional state of the national routes, which results in a deficiency investment in public works.

The technical and economic assessment was to measure the values of evenness or comfort felt by users, defined by IRI indicator, and deflections of the pavement measured by the Falling Weight Deflectometer (FWD), together with the quality note "Q", which represents a rating of the quality of the pavement. This work was performed before and after applied the four periodic road maintenance activities, in order to get the benefit assigned to each of them, using the percentage of improvement in road indicators along with the cost assigned to each activity.

The statistical evaluation was concentrated on analysis "ANOVA + Tukey" and the test "paired t", with the intention of determining the consistency and validity of the data resulted of the vials indicators.

It was evident that placing thin asphalt overlays showed no improvement in the structural conditions (deflection) of the section of research, because the cost-benefit ratios did not exceed 0,35 for the four activities, where from values of 1,00 can be considered positive results.

However, it was shown that placing thin asphalt overlays did reveal an improvement in the operating conditions (IRI) of the section of research, because the cost-benefit ratios exceeded 1,25 and for the milling and asphalt overlay it reached 1,91, which demonstrate that it is the most efficient one in comparison with the other three periodic road maintenance activities.

Finally, these findings establish that the milling pavement plus the thin asphalt overlay provide the best option for investment the state funds in periodic road maintenance in public works.

Keywords

Pavements, IRI, FWD, road maintenance techniques, overlay.

INTRODUCCIÓN.

Alrededor del mundo, el mantenimiento y preservación de carreteras es una práctica constante para muchos sistemas de administración de carreteras (Wang, Wang, & Ahn, 2012).

En el año 2006, el Transportation Research Board (TRB) publicó en su manual de mantenimiento (Transportation Research Board, 2006), la curva de deterioro de pavimentos, la cual se utiliza como base para determinar las vías pavimentadas que son aptas para intervenciones de preservación.

Actualmente, existen diversas técnicas para la conservación de carreteras asfaltadas, tales como bacheo seleccionado con mezcla asfáltica en caliente (MAC), escarificación de vías, ruteo y sellado de grietas, sobrecapas asfálticas, entre otras (Transportation Research Board, 2012). Sin embargo, la forma de elegir la mejor alternativa de mantenimiento aún permanece siendo una incógnita (Wang et al., 2012).

Adicionalmente, desde hace más de dos décadas, diversos estudios evidencian que la regularidad superficial de las carreteras, la cual está ligada a la efectividad de las técnicas de conservación antes citadas, provee un confort para los usuarios, lo que permite economizar en el consumo de los combustibles y alargar la vida útil de los pavimentos (Smith, 2014). Desde este punto de vista, el hecho de no seleccionar adecuadamente el tipo de alternativa de mantenimiento hace que se incurra en dos tipos de costos económicos principales (Costello, Bargh, Henning, & Hendry, 2013):

- El costo básico de funcionamiento, el cual consiste en el consumo de combustible, el desgaste de los neumáticos de las llantas, el consumo de aceite lubricante, las partes de los vehículos, el mantenimiento y la depreciación de los automotores a través del tiempo.
- Los costos adicionales, los cuales incluyen los efectos de la rugosidad, comúnmente reconocidas como un factor clave que afecta los costos de operación de los vehículos y dependen de la categoría de la vía, ya sea urbana o rural, la clase de vehículo y la regularidad medida mediante el IRI.

Debido a lo expuesto anteriormente, la medición del Índice de Regularidad Superficial (IRI, por sus siglas en inglés) es una medida muy efectiva para determinar el buen estado de las carreteras (Smith, 2014). Adicionalmente, existen cierto tipo de pruebas no destructivas como el ensayo del deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés), que se utiliza para aproximar la capacidad estructural de los pavimentos, lo cual resulta útil para procesos de toma de decisiones relacionadas con la conservación de carreteras (Beltrán & Romo, 2012).

Es por ello que el paso fundamental para asignar las acciones de conservación más adecuadas es reconocer el estado que presente la vía, tanto desde el punto de vista de condición funcional (IRI) como de condición estructural (FWD) (Thenoux & Gaete, 1995).

El presente proyecto corresponde a una valoración técnica, estadística y económica de cuatro actividades de conservación vial utilizadas en Costa Rica para el mantenimiento periódico de rutas nacionales pavimentadas, específicamente sobre la Ruta Nacional No. 135 en el sector de Palmares de Alajuela.

El tema se desarrolló mediante un diagnóstico en el que se realizaron pruebas de campo con equipos especializados del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LANAMMEUCR) para medir los indicadores viales internacionales de calidad del pavimento, el Índice de Regularidad Superficial (IRI) medido con el perfilómetro inercial láser, el cual refleja el estado funcional de las vías; y las deflexiones en el pavimento medidas con el FWD, las cuales se asocian con el estado estructural de las carreteras.

Los resultados obtenidos con el perfilómetro inercial láser y con el FWD permiten identificar la Nota de calidad Q, que representa la calidad del pavimento de la carretera, la cual se evalúa antes y después de la aplicación de las cuatro actividades de conservación vial, donde los resultados obtenidos se analizan estadísticamente para determinar su confiabilidad y validez.

La importancia del proyecto radica en que los proyectos de conservación vial son de interés público, cuya ejecución posee un impacto importante a nivel socio-económico, y además podría permitir generar procesos de mejora continua, de forma que se puedan aprovechar los recursos económicos de la mejor manera.

La finalidad de la investigación es recopilar información valiosa para realizar una propuesta práctica y confiable para ejecutar proyectos de conservación vial por parte del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI). Por tal razón, se pretende identificar la técnica de mantenimiento vial periódico que presente los mejores resultados desde el punto de vista funcional y estructural, es decir, aquella técnica que permita obtener la relación Costo-Beneficio más alta, en aras de optimizar la inversión de fondos públicos en los proyectos de obra pública nacional.

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación se presentan las principales características del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), así como la definición del problema a tratar por medio de los objetivos propuestos.

1.1. ANTECEDENTES, JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Planteamiento del Problema

A nivel mundial, se ha establecido que el adecuado mantenimiento vial de una red de carreteras es vital para el desarrollo de los países, tanto así, que distintas investigaciones muestran la relevancia de optimizar la inversión económica con técnicas de conservación vial eficaces desde el punto de vista costo beneficio.

Dentro del marco de Costa Rica, se ha evidenciado, mediante los informes de fiscalización del LANAMMEUCR, que en Costa Rica existen debilidades en los procesos de mantenimiento y conservación vial, ya que, no se encuentra establecida una definición técnica de la alternativa más eficiente para el mantenimiento periódico de las rutas nacionales pavimentadas del país, provocando de esta manera situaciones que ponen en riesgo la eficiencia y eficacia en la inversión de los fondos públicos de la Nación.

A raíz de esto, se origina la necesidad de identificar la técnica de mantenimiento periódico más eficiente para la intervención de la red vial nacional pavimentada para los programas de mantenimiento y preservación vial de la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del CONAVI.

1.1.2. Antecedentes y Justificación del estudio

En el mes de Setiembre del año 1997 se presentó un proyecto de ley para crear el Consejo Nacional de Conservación Vial, después de pasar por la Asamblea Legislativa se le dio el nombre de Consejo Nacional de Vialidad; este cambio de nomenclatura fue producto de las funciones asignadas, ya que, este consejo no sólo velaría por la conservación vial sino que también asumiría la responsabilidad de definir, ejecutar y supervisar los proyectos nuevos de infraestructura vial que demandara el país.

Posteriormente, el 29 de Mayo de 1998 se publicó, en el Alcance No. 20 del Diario Oficial La Gaceta 103, la Ley No. 7798 de "Creación del Consejo Nacional de Vialidad", como un órgano de desconcentración máxima, adscrito al Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), con personería jurídica instrumental y presupuestaria para administrar el Fondo Vial, al que se le encarga la conservación y construcción de las carreteras, calles de travesía y puentes de la Red Vial Nacional; permitiéndole suscribir los contratos y empréstitos necesarios para el ejercicio de sus funciones. Dentro de esta ley se declara la conservación vial como actividad ordinaria de servicio público e interés nacional

De acuerdo al artículo 4 de la Ley No. 7798, uno de los objetivos principales del CONAVI se centra en el desarrollo de programas de mantenimiento vial, basado en actividades de mantenimiento rutinario, periódico y proyectos de rehabilitación de pavimentos. El financiamiento de esta entidad proviene del fondo vial, constituido por impuestos al combustible, a la propiedad de vehículos, los peajes de las carreteras, entre otros.

El CONAVI posee políticas de intervención para la red vial nacional pavimentada, orientadas acorde con el Plan Nacional de Desarrollo 2006 – 2010, donde destacan la atención de la seguridad vial y la transitabilidad en carreteras, las cuales son atendidas mediante los proyectos de conservación vial ejecutados por la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del CONAVI. Esta gerencia está facultada legalmente para la ejecución de proyectos de índole de mantenimiento rutinario, periódico y rehabilitación de pavimentos, atendiendo toda la red vial nacional en 22 zonas geográficas de conservación vial (CONAVI, 2015). En la Figura 1.1 se muestra la división territorial para la atención de las actividades de mantenimiento vial alrededor del país.

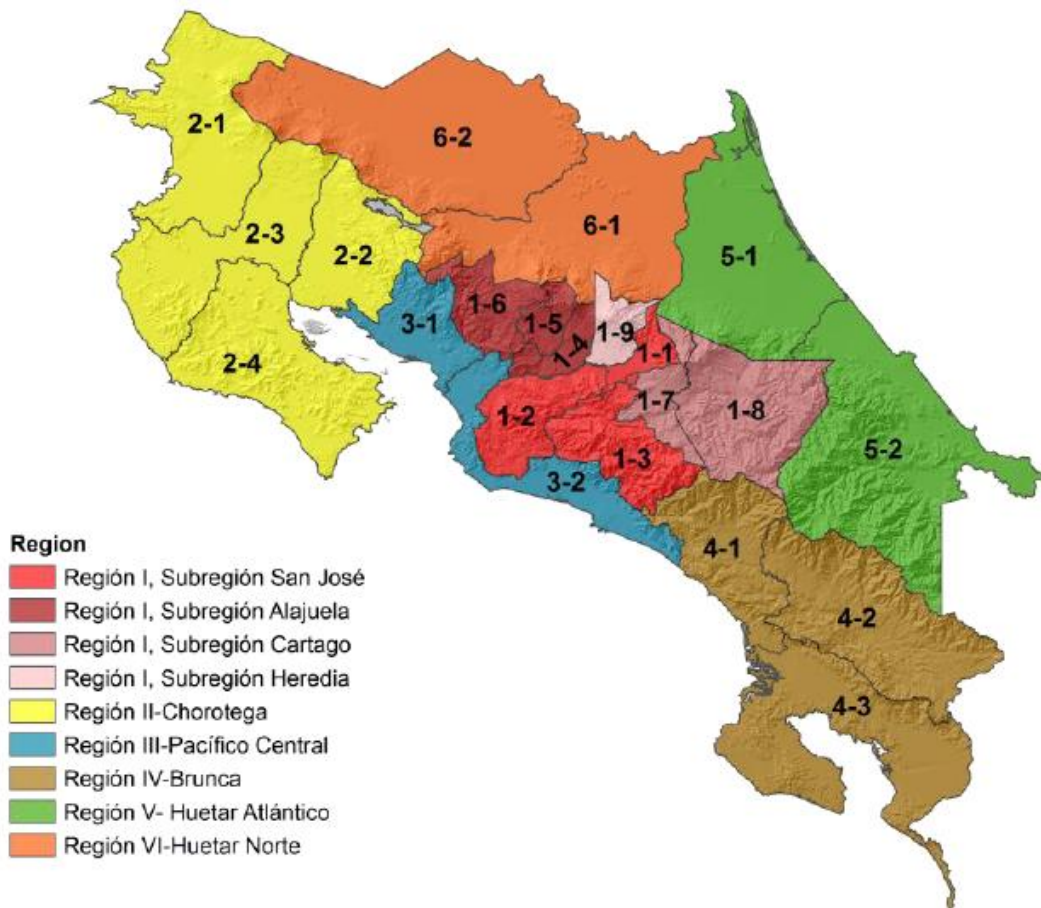


Figura 1.1. Mapa de Costa Rica con división en 22 Zonas de Conservación Vial.

Fuente: Adaptado del LANAMMEUCR, 2015. Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2014-2015 de la Universidad de Costa Rica.

La Ley No. 7798 determinó el marco legal que permite realizar el mantenimiento y conservación de las carreteras, dentro del cual, se definió la intervención de tipo mantenimiento periódico. Específicamente, en el país, a pesar de que existe más variedad de métodos para el mantenimiento vial periódico, las cuatro técnicas más comunes son:

- Realizar un bacheo formal para preparar la superficie de ruedo y luego colocar una capa de MAC de 5 cm de espesor.

- Realizar un sellado de grietas y encima colocar la capa de MAC de 5 cm.
- Colocar una capa de MAC de 5 cm de espesor.
- Incluir la actividad de perfilado de 5 cm y la colocación de una capa de MAC de 5 cm.

Cabe denotar que existen estudios técnicos para la evaluación de la red vial nacional pavimentada, realizados por el LANAMMEUCR en la ciudad de San José desde el año 2004, siendo el más reciente en el año 2015 (INF-PITRA-001-2015), en los cuales se publicaron los resultados obtenidos para los indicadores del IRI y FWD para las rutas nacionales pavimentadas del país. En las versiones más recientes de estos informes se determinaron notas de calificación Q para cada vía en específico basados en los resultados de las mediciones del IRI y las deflexiones. Estas notas de calificación otorgan una evaluación técnica que permite identificar el estado de la red vial nacional, donde se destacan niveles buenos, moderados y malos.

Sin embargo, el país aún no cuenta con una investigación que determine cuál alternativa de mantenimiento periódico es la más eficiente para la conservación vial de las carreteras nacionales pavimentadas.

A diferencia del Informe INF-PITRA-001-2015, donde solamente se miden los parámetros del IRI, deflexiones y Nota Q en las rutas nacionales pavimentadas, sin presentar una evaluación equitativa entre técnicas de mantenimiento de un mismo tipo, ya que, el LANAMMEUCR se especializa en documentar las mediciones de campo, de acuerdo a lo estipulado en la Ley No. 8114 Ley de Simplificación y Eficiencia Tributarias, este estudio permitirá, entre otras cosas, no solo determinar una técnica de preservación óptima para el mantenimiento de las vías del país, sino que posiblemente, se podrán utilizar estos resultados para las demás rutas nacionales pavimentadas que califiquen para intervenciones de preservación y valorar a su vez, si las rutas en estado de preservación se pueden estandarizar para ser intervenidas con una misma técnica, de acuerdo con los programas de mantenimiento y preservación de la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del CONAVI.

Aunado a lo anterior, los sectores productivos del país, tanto económicos como sociales, dependen del estado de la red vial nacional, la cual está constituida por las principales vías de comunicación a los puntos de desarrollo como puertos, aeropuertos, centros de educación, puestos fronterizos, hospitales y centros de salud, transporte internacional e interprovincial, además de ser utilizadas para el transporte de productos a lo largo de todo el territorio nacional.

Así las cosas, la red vial nacional se fracciona, acorde con su importancia, en rutas primarias, rutas secundarias, rutas terciarias y rutas de travesía. Actualmente, esta red se compone de 7.474,9 km, de los cuales el 63 % se encuentran pavimentados y el 37% restante presentan una superficie de ruedo expuesta en lastre o tierra (LANAMMEUCR, 2011).

Como parte del Informe INF-PITRA-001-2015, se estimó que un 90,22 % de la red vial nacional presenta características estructurales “Buenas”, un 4,31 % posee deflexiones “Moderadas”, un 4,17 % de la red tiene deflexiones “Altas” y un 1,30 % se caracteriza por tener deflexiones “Muy Altas”. Basado en estos datos, se puede concluir que para la mayor parte de la red vial nacional se deben realizar intervenciones de tipo mantenimiento periódico y para los casos con deflexiones “Moderadas” o “Altas” se deben ejecutar proyectos de tipo rehabilitación del pavimento y para la restante red vial nacional pavimentada se necesitan obras de reconstrucción total de la carretera. A continuación, en la Figura 1.4 se ejemplifica lo mencionado anteriormente.

Distribución General de las Categorías de Deflectometría Evaluación de la Red Vial Nacional 2014-2015

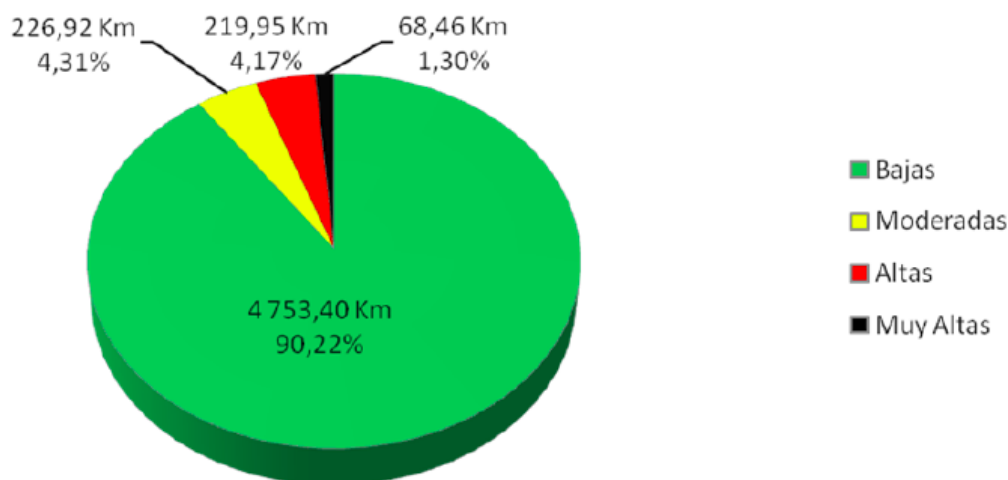


Figura 1.2. Distribución general de las categorías de deflectometría de la Red Vial Nacional Pavimentada.

Fuente: Adaptado del LANAMMEUCR, 2015. Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2014-2015 de la Universidad de Costa Rica.

Ahora bien, acorde con lo estipulado en la Ley No. 7798, la priorización en la asignación de recursos presupuestarios obedece al siguiente orden:

1. Conservación vial (mantenimiento rutinario, periódico y rehabilitación de la superficie de ruedo).
2. Mejoramiento.
3. Rehabilitación/reconstrucción.
4. Construcción.

La Gerencia de Conservación de Vías y Puentes tiene a su cargo únicamente lo relacionado con el punto 1 anterior, por esta razón esta propuesta se enfoca específicamente en esta gerencia.

Evidentemente, urge determinar una opción eficiente para el mantenimiento periódico de las rutas nacionales, ya que, esto permitirá optimizar la inversión pública, desde un punto de vista técnico – económico y beneficio social para el país.

En el marco del contexto en mención, este proyecto determinó la opción más eficiente, desde el punto de vista técnico y económico, para el mantenimiento periódico de carreteras de la red vial nacional pavimentada, al realizar una evaluación de técnicas de mantenimiento periódico entre bacheos previos, perfilados previos, ruteo y sellado de grietas previos, a la colocación de sobrecapas de MAC, a través de los resultados de los parámetros del IRI y las deflexiones medidas con el FWD y la nota de calificación Q para las técnicas de mantenimiento periódico antes mencionadas para un tramo específico de la Ruta Nacional No. 135.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Identificar la técnica de mantenimiento vial periódico más eficiente para el tramo de estudio sobre la Ruta Nacional No. 135, utilizando los programas de mantenimiento de preservación de la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del CONAVI.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a. Evaluar la condición actual del tramo de investigación sobre la Ruta Nacional No. 135, mediante el cálculo del indicador PCI y la nota de calidad Q a partir de las mediciones del IRI y las deflexiones con el FWD.
- b. Aplicar las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico en el tramo de investigación sobre la Ruta Nacional No. 135.
- c. Evaluar la condición del tramo de investigación una vez se hayan aplicado las técnicas de mantenimiento sobre la Ruta Nacional No. 135, mediante el cálculo de la nota de calidad Q a partir de las mediciones del IRI y las deflexiones con el FWD.
- d. Comparar cada una de las técnicas de mantenimiento vial a partir de los índices de desempeño y su costo económico asociado.

1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES.

1.3.1. Alcance

- Este proyecto contempla la identificación de una técnica de mantenimiento vial periódico para las rutas nacionales pavimentadas, por lo que está centrado únicamente en las actividades de conservación vial de la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del CONAVI para vías en estado de preservación.
- El proyecto no es representativo para rutas candidatas a intervenciones de tipo rehabilitación o reconstrucción total.
- El proyecto involucra la ejecución de cada una de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico más comunes en Costa Rica.
- El proyecto se basa en la evaluación técnica mediante los indicadores internacionales del IRI y FWD.
- El proyecto se basa en una evaluación técnica económica a corto plazo (inversión inicial), es decir, no se contempla dentro del análisis el comportamiento a través del tiempo y de la vida útil de cada técnica de mantenimiento vial periódico.

1.3.2.Limitaciones

Se debe indicar que los resultados expuestos en este proyecto aplican a situaciones con características similares a las mostradas en el tramo de investigación y para los materiales utilizados en este caso.

- Las mediciones de los indicadores internacionales del IRI y las deflexiones medidas con el FWD se basan en los equipos técnicos de laboratorio del LANAMMEUCR.
- Debido a razones económicas, el proyecto se basa en una muestra representativa de carretera de 1,6 km solamente.
- La aplicación del ruteo y sellado de grietas no representa una técnica que produzca mejoras significativas en las mediciones del IRI y FWD. Sin embargo, formó parte de este proyecto ya que puede ser utilizado en un posible proyecto futuro para evaluación de las vidas útiles de cada técnica aplicada, donde efectivamente la técnica de sellado de grietas podría presentar un efecto importante en el desempeño de la estructura de pavimento.

2. CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA

En este apartado se establece los conceptos técnicos base en el desarrollo del proyecto.

2.1. ANÁLISIS CONCEPTUAL

Una adecuada administración de pavimentos requiere de la aplicación oportuna de técnicas de mantenimiento y conservación vial, con la finalidad de impedir el deterioro acelerado de las carreteras. Estas técnicas ayudan a mejorar el nivel de servicio de los pavimentos y a la vez reducir costos, al evitar un deterioro mayor del paquete estructural, evitando que se incurran en grandes inversiones en proyectos de rehabilitación o reconstrucción total de las vías.

Actualmente, existen varias alternativas de mantenimiento, tales como fresado y recapado con MAC, el bacheo formal previo a una recapa delgada o simplemente una recapa sobre la carpeta existente. (Shuler & Schmidt, 2008; Thenoux & Gaete, 1995). Asimismo, en los últimos años ha evolucionado el uso de técnicas de preservación de carreteras para el mantenimiento vial, tales como los “Chip Seal”, los “Slurry Seal” y los “Microsurfacing”. Estas técnicas se caracterizan principalmente por ser sellos asfálticos que optimizan su uso en aquellas carreteras de recién construcción, aproximadamente 3 años después de la finalización del proyecto. La diferencia entre ellas radica especialmente en los agregados utilizados, así como en los espesores de capa colocados.

Dentro de las ventajas de las sobrecapas delgadas con MAC o “Thin Overlays”, se puede citar que permiten mejorar la condición funcional de la superficie de ruedo de los pavimentos, maximizar el costo-beneficio de las intervenciones de mantenimiento de las distintas agencias estatales de carreteras (SHAs, por sus siglas en inglés), así como alargar la vida útil de las vías.

En la Figura 2.1 se refleja el impacto económico anual, en el estado de Michigan de los Estados Unidos de América, que presentan distintas técnicas de mantenimiento vial, tales como las sobrecapas asfálticas delgadas.

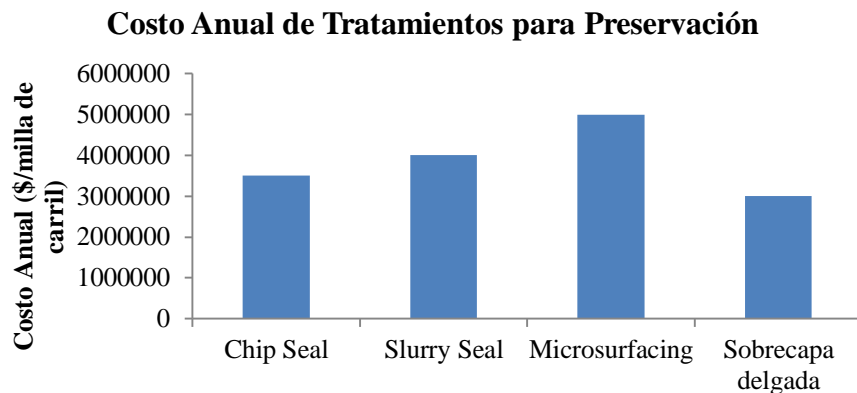


Figura 2.1. Representación gráfica del impacto anual de técnicas de mantenimiento vial en el estado de Michigan de Estados Unidos de América.

Fuente: Adaptado de Chou, Datta & Pulugurta, 2008. *Effectiveness of Thin Hot Mix Asphalt Overlay on Pavement Ride and Condition Performance* Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Toledo.

Sin embargo, dentro de las limitaciones, se tiene que estas técnicas de intervención dependen del presupuesto disponible para tal fin (Dawson et al., 2012). Igualmente, la aplicación de capas de MAC sobre pavimentos existentes, establece un porcentaje significativo de las actividades de mantenimiento vial para restablecer la condición de los pavimentos de asfalto. Se está prestando cada vez más atención a la mejora de la regularidad superficial en las sobrecapas de MAC, porque estas probablemente otorgarán vidas útiles más largas, debido a la disminución de la carga dinámica, así como proporcionar beneficios de economía en el consumo de combustible y una mayor comodidad a los usuarios de las carreteras. (Hung, Rezaei, & Harvey, 2014).

2.2. EL IRI EN LAS CARRETERAS

En muchos países, incluido el caso de Costa Rica, se conoce que los costos de operación de los vehículos (COV) dependen de las irregularidades superficiales del pavimento, afectando la velocidad de circulación de los usuarios, el deterioro de los automotores, el desgaste de las llantas y el consumo de combustible. Por estos motivos, determinar la regularidad superficial del pavimento desde el inicio de su periodo de servicio o en cualquier momento de la vida útil, permitirá definir las acciones de conservación o rehabilitación necesarias en el momento pertinente, con la finalidad de optimizar costos para el país. (Badilla, 2011; Costello et al., 2013).

La regularidad superficial de las carreteras se mide mediante un evaluador vial internacional conocido como el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), el cual refleja las imperfecciones de los pavimentos a tal grado que otorga mediciones con un equipo de laboratorio constituido por un perfilómetro láser, el cual brinda una valoración del IRI, representando de esta forma la condición de confort de las vías.

En la Figura 2.2 se ilustra el reflejo de valores del IRI en las carreteras.

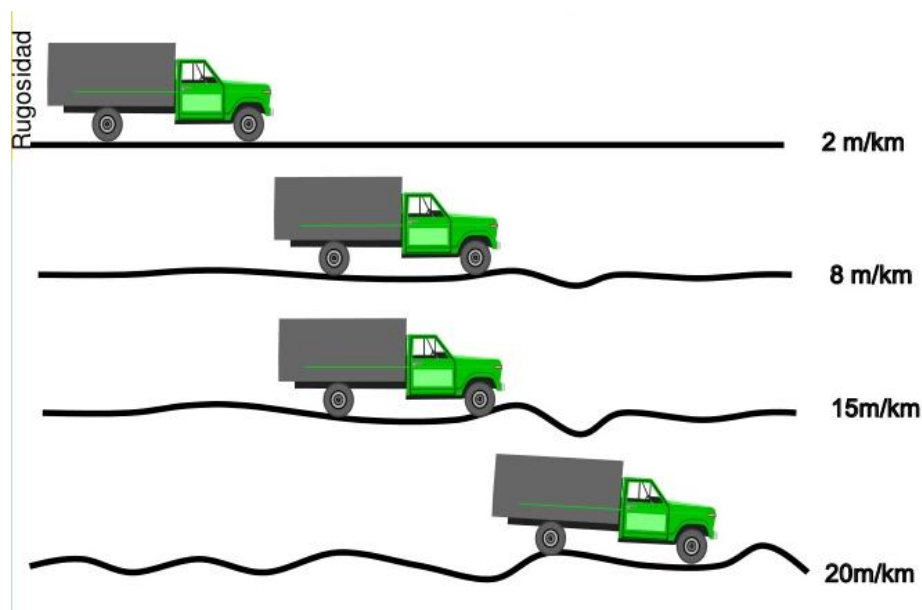


Figura 2.2. Representación gráfica de la precepción vehicular con respecto a valores del IRI.

Fuente: Adaptado de Velasco, 2011. *Gestión de caminos no pavimentados* de la Universidad de Piura de Perú.

En la Figura 2.3 se enseña el comportamiento típico de los efectos del IRI en los COV para distintos tipos de vehículos.

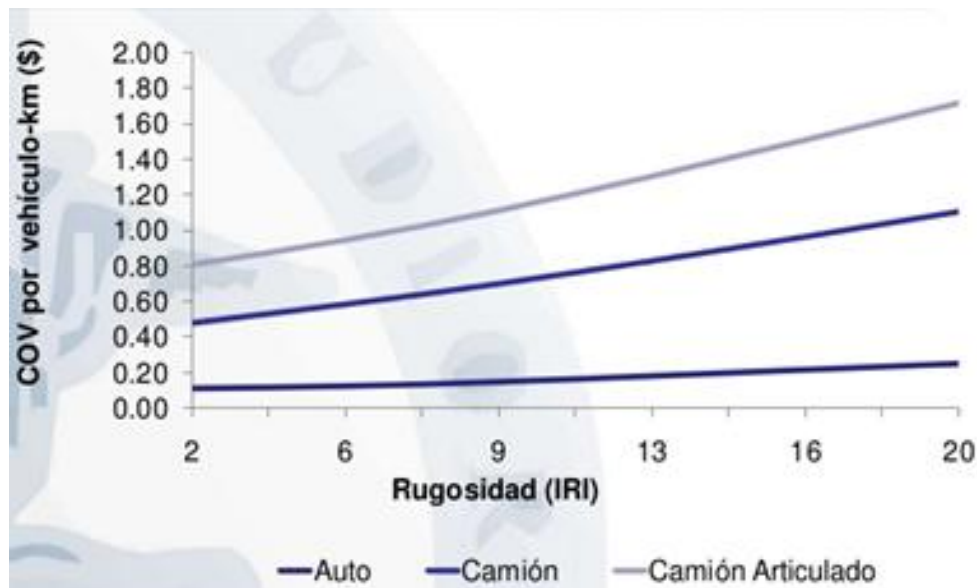


Figura 2.3. Representación gráfica del aumento de los costos de operación vehicular (COV) según el aumento en los valores del IRI.

Fuente: Adaptado de Velazco, 2011. *Gestión de caminos no pavimentados de la Universidad de Piura de Perú.*

De la misma forma, la medición del índice de regularidad de la superficie de los pavimentos asfálticos es un indicador del confort, la percepción y de la suavidad de la capa de rodamiento. Diversos estudios han mostrado que el público en general desea obtener confort en las carreteras, reflejando que el 85 % de la población se siente cómoda con niveles de IRI de 2,7 m/km o menores. (Pierce, Sivanewaran, Willoughby, & Mahoney, 2004).

Para el caso de Costa Rica, el informe de evaluación de la red vial nacional publicado por el LANAMMEUCR en el 2015 muestra rangos del IRI entre 1,9 y 3,6 para el 33,44 % de las carreteras nacionales, lo cual se puede definir como un confort regular para los usuarios de las vías. Otro 4,51% de la red vial presenta valores de IRI entre 1,0 y 1,9, lo que se identifica como un buen estado de confort de las vías. El restante 62,05 % de la red vial nacional pavimentada muestra valores de IRI superiores a 3,6, a tal grado que el 20,88% de esos datos exhiben valores de IRI superiores al 6,4, lo cual se equipara a un estado de confort muy deficiente.

En la figura 2.4 se enseñan los datos del IRI para la red vial nacional pavimentada de Costa Rica para el año 2015.

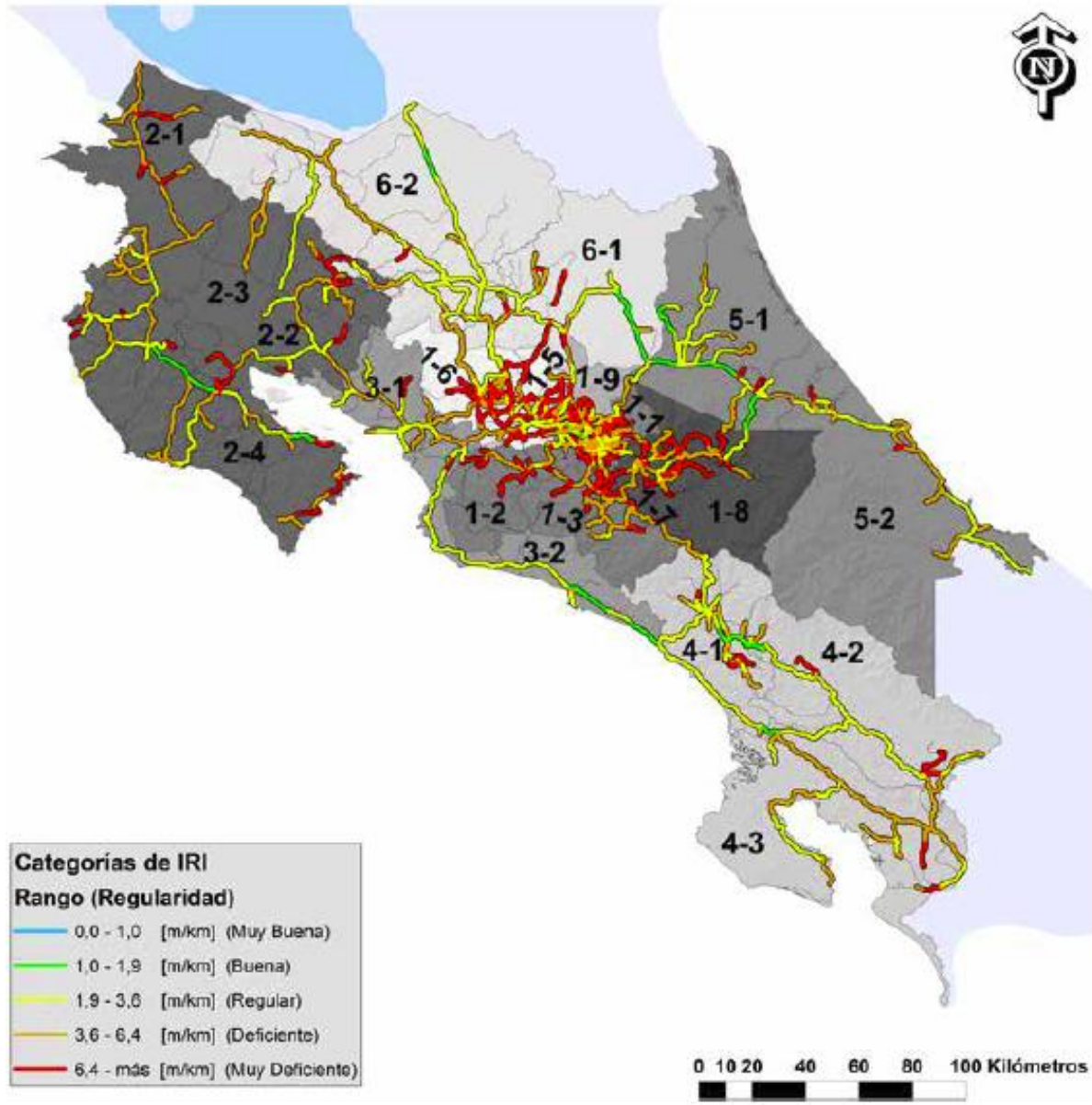


Figura 2.4. Representación gráfica de la condición funcional (IRI) de la Red Vial Nacional de Costa Rica.

Fuente: Adaptado del LANAMMEUCR, 2015. Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2014-2015 de la Universidad de Costa Rica.

2.3. EL PCI EN LAS CARRETERAS

Para la evaluación del estado de los pavimentos, se utilizan varios indicadores de desempeño para las vías. Uno de los indicadores más comunes es la revisión del Índice de Condición del Pavimento (PCI), el cual permite determinar un criterio visual del estado actual de la capa superficial de rueda. Vale la pena aclarar que este es un indicador visual que otorga una evaluación de los daños estructurales de tipo fatiga, pero que no permite caracterizar las capas inferiores de la estructura de pavimento. Normalmente, el PCI

se utiliza con la finalidad de determinar densidades de daños superficiales de las vías y así obtener una calificación de la superficie de ruedo que se desea intervenir, aun así sigue siendo un buen indicador de la condición del pavimento (Hajek, Phang, Wrong, Prakash, & Stott, 1988).

La metodología de evaluación visual del PCI se basa en la valoración de daños superficiales en la carpeta asfáltica, como cuero de lagarto o piel de cocodrilo, grietas longitudinales y transversales, baches, huecos y algunos otros de importancia. Una vez recopilado esto, se calculan los porcentajes o densidades de daños en el área de estudio, lo cual refleja el grado de deterioro superficial de las unidades de muestreo. Sumado a lo anterior, se utilizan gráficas o modelos de deterioro que determinan una nota de calificación a la estructura de ruedo, la cual se encuentra dentro del rango de 0 a 100.

La evaluación del PCI en carretera se realiza mediante inspección visual de campo, la cual se va llenando en un registro de datos específicos de fallas superficiales del pavimento. En la Figura 2.5 se ilustra el registro de campo utilizado acorde con la norma D6433-11 de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés).

EXPLORACIÓN DE LA CONDICIÓN POR UNIDAD DE MUESTREO				ESQUEMA		
ZONA	ABSCISA INICIAL	UNIDAD DE MUESTREO				
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>				
CÓDIGO VÍA	ABSCISA FINAL	ÁREA MUESTREO (m ²)				
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>				
INSPECCIONADA POR		FECHA				
<input type="text"/>		<input type="text"/>				
No.	Daño	No.	Daño			
1	Piel de cocodrilo.	11	Parcheo.			
2	Exudación.	12	Pulimento de agregados.			
3	Agrietamiento en bloque.	13	Huecos.			
4	Abultamientos y hundimientos.	14	Cruce de vía férrea.			
5	Corrugación.	15	Ahuellamiento.			
6	Depresión.	16	Desplazamiento.			
7	Grieta de borde.	17	Grieta parabólica (slippage)			
8	Grieta de reflexión de junta.	18	Hinchamiento.			
9	Desnivel carril / berma.	19	Desprendimiento de agregados.			
10	Grietas long y transversal.					
Daño	Severidad	Cantidades parciales		Total	Densidad (%)	Valor deducido

Figura 2.5. Ilustración del registro de campo para la evaluación de carreteras mediante el PCI.

Fuente: Adaptado de Vásquez, 2002. *Pavement Condition Index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras de la Universidad Nacional de Colombia.*

2.4. LAS DEFLEXIONES MEDIDAS CON EL FWD EN LAS CARRETERAS

Otro indicador utilizado para la evaluación de pavimentos es la deflexión medida con el deflectómetro de impacto (FWD), el cual consiste en un equipo de alta tecnología que mide el hundimiento o deflexión instantánea que experimenta el pavimento en un punto, debido al golpe de un peso lanzado desde un mecanismo diseñado específicamente con este propósito, de tal manera que

produzca una fuerza de reacción en la estructura de 40 Kilo-Newton (KN) o 556 Mega-Pascales (MPa) (Loría, Barrantes, & Sanabria, 2013). Estas pruebas simulan de manera muy aproximada las características de carga impuestas por el tránsito vehicular, permitiendo medir la respuesta de deflexiones ante un impulso de carga aplicado en la superficie del pavimento. Con base en esta respuesta, se puede estimar la capacidad estructural de las carreteras. (Beltrán & Romo, 2012).

Este evaluador posee la característica principal de ser un procedimiento no destructivo, a diferencia de otros métodos que se utilizan para la evaluación de la capacidad estructural de las vías, tales como calicatas, extracción de núcleos, placas de carga y penetración dinámica de cono. Por tal razón, permite agilizar la toma de datos y evaluación de carreteras y de esta manera optimizar la aplicación de técnicas de mantenimiento vial para la conservación de pavimentos.

En la Figura 2.6 se muestra la descripción de las pruebas destructivas y no destructivas que se pueden aplicar a los pavimentos con el propósito de determinar la capacidad estructural de las vías.

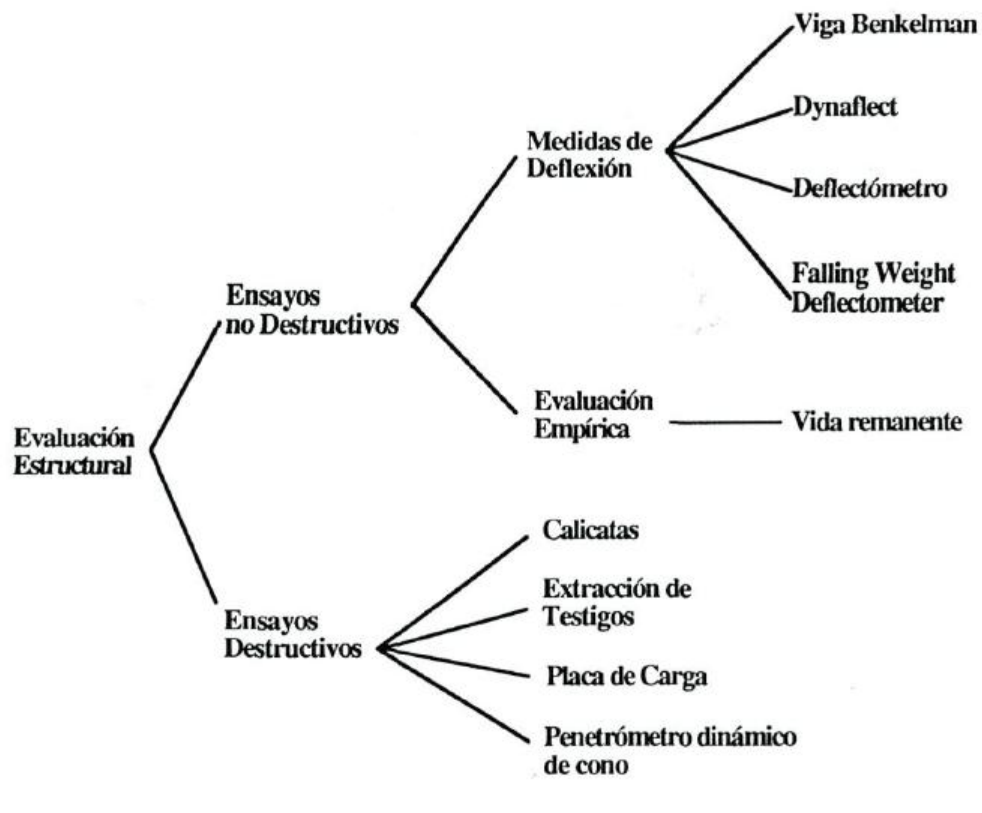


Figura 2.6. Ejemplificación de las pruebas destructivas y no destructivas aplicables a los pavimentos para la estimación de la capacidad estructural.

Fuente: Adaptado de Thenoux & Gaete, 1995. *Evaluación técnica del pavimento y comparación de métodos de diseño de capas de refuerzo asfáltico* de la Universidad Nacional de Colombia.

La medición de deflexiones utilizando el FWD presenta un comportamiento característico de los pavimentos, produciendo un efecto conocido como la “Cuenca de Deflexiones” en la estructura de la carretera, causado por el impacto del deflectómetro de impacto. Esta cuenca permite determinar la deflexión máxima D_{max} , la cual describe cómo se comporta globalmente el pavimento ante una carga,

donde valores bajos de D_{max} se relacionan con pavimentos de buena capacidad estructural y valores altos se relacionan con pavimentos débiles (Beltrán & Romo, 2012) . En la Figura 2.7 se ilustra el comportamiento de la “Cuenca de Deflexiones” ante la señal ocasionada por el deflectómetro de impacto (FWD) en el pavimento de una carretera.

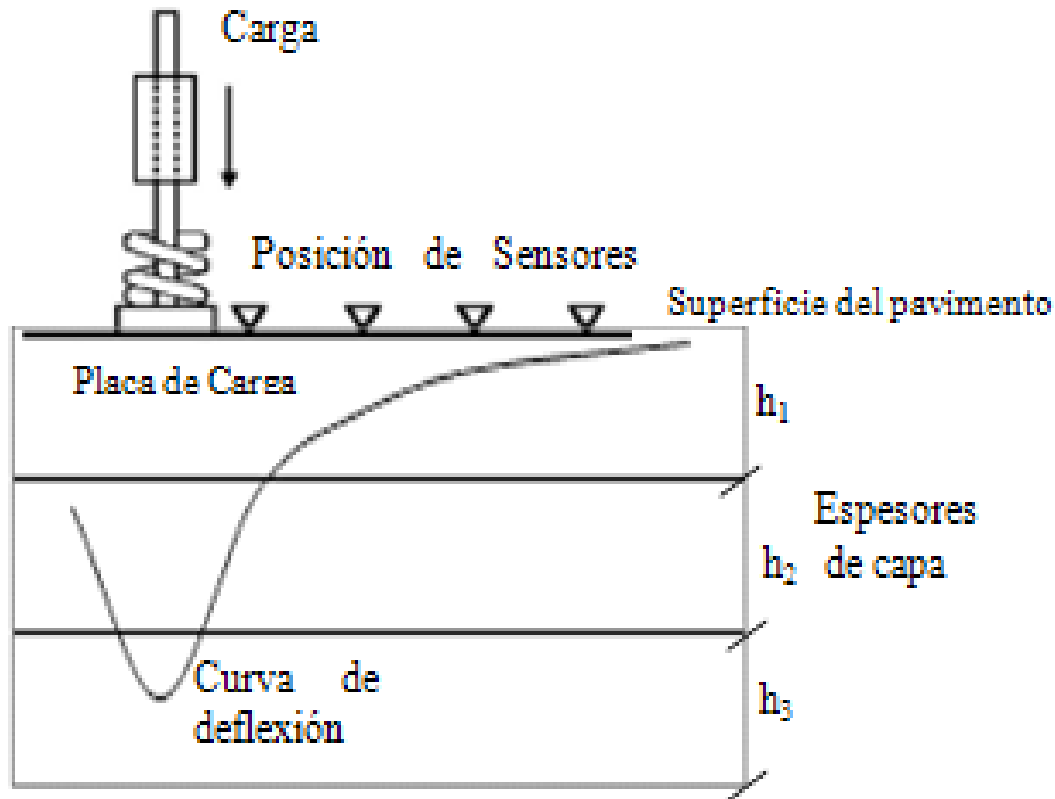


Figura 2.7. Ilustración de la Cuenca de Deflexiones producida en un pavimento ante el impacto del FWD.

Fuente: Adaptado de Beltrán & Romo, 2012. *Análisis de índices derivados de pruebas de deflexión por impacto para evaluación de pavimentos de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad Nacional de Colombia.*

A nivel nacional, el país presenta una red vial nacional con buena capacidad estructural, es decir, los valores de las deflexiones medidas con el FWD reflejaron valores bajos de deflexión, por lo que se evidencian buenas estructuras para las rutas nacionales pavimentadas de Costa Rica (LANAMMEUCR, 2015).

En la Figura 2.8 se ilustran los resultados de las deflexiones medidas con el FWD brindados por el LANAMMEUCR en el último informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica para el año 2015.

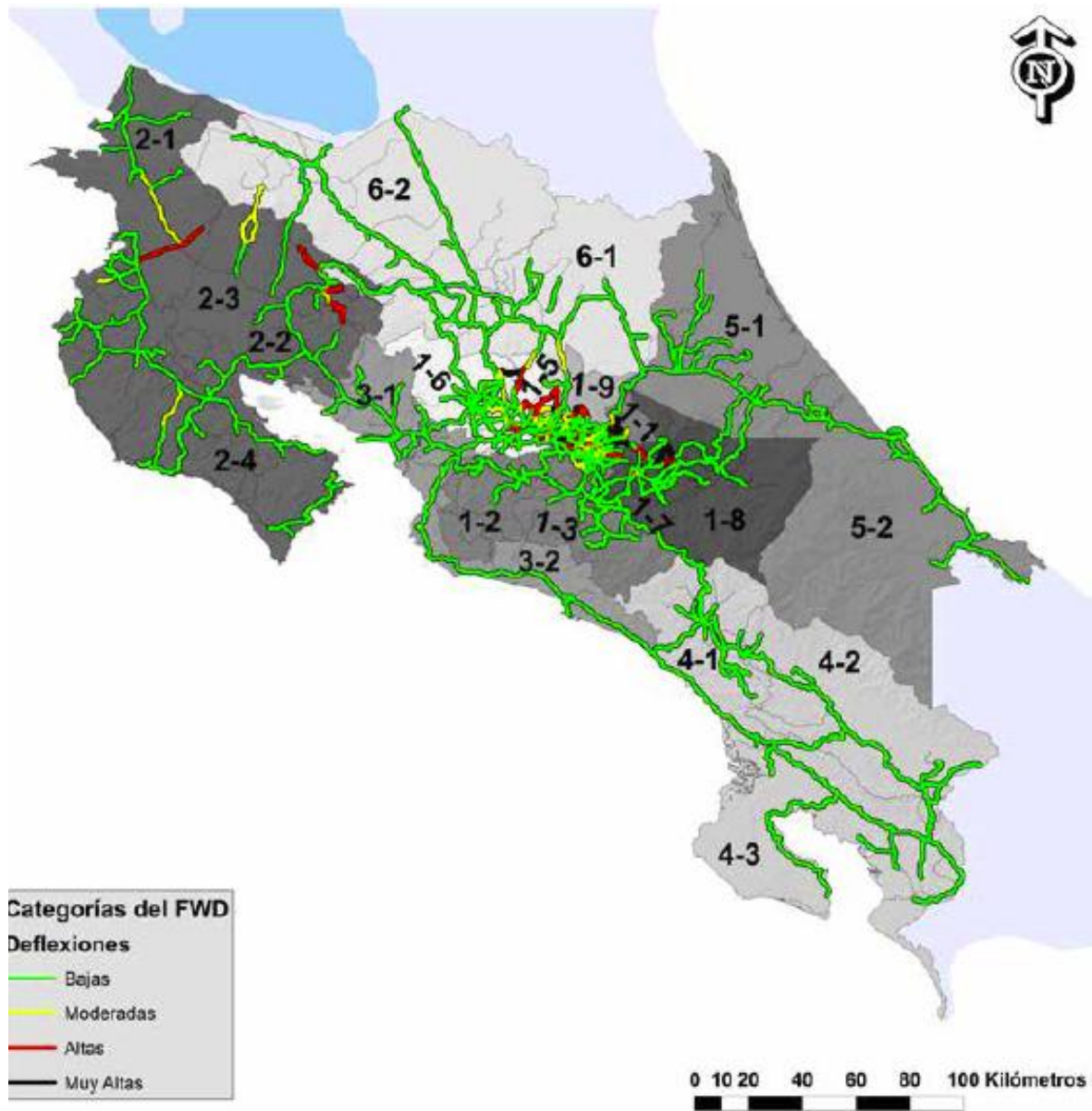


Figura 2.8. Representación gráfica de la condición estructural (FWD de la Red Vial Nacional de Costa Rica.

Fuente: Adaptado del LANAMMEUCR, 2015. *Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2014-2015* de la Universidad de Costa Rica.

Existen diversos programas de cálculo que permiten corresponder las mediciones del PCI con el IRI, con los cuales se han desarrollado diversas investigaciones que determinaron que existe una fuerte relación entre ambos indicadores (Park, Thomas, & Lee, Wayne, 2007). De la misma forma, estos programas pueden ser utilizados para estimar el desempeño de las técnicas de intervención para el mantenimiento vial a través de su vida útil. (Harrison & Park, 2008). Asimismo, la nota de calidad Q es un parámetro que establece el diagnóstico final de la condición de la sección estudiada, de acuerdo con los resultados obtenidos para el IRI y las deflexiones (Loría et al., 2013).

2.5. ANÁLISIS A NIVEL NACIONAL

Evidentemente, se requiere de una serie de acciones que permitan mejorar el nivel funcional y estructural de las carreteras reflejado en la transitabilidad de las vías, utilizando actividades típicas de mantenimiento vial periódico, las cuales sean comparables recurriendo a los indicadores como las mediciones de las deflexiones con el FWD para el comportamiento estructural del pavimento y el IRI para el comportamiento funcional de la carretera (Harrison & Park, 2008; Thenoux & Gaete, 1995).

Diversos estudios indican que las deflexiones obtenidas con el FWD se pueden correlacionar con el número estructural del pavimento, mediante el uso de ecuaciones, coeficientes y parámetros estadísticos (Kim, Kim, & Murphy, 2013). De la misma forma, el IRI se ha utilizado a través de los años como un evaluador del estado de los pavimentos. Tanto así, que se han comparado técnicas de mantenimiento de preservación, tales como sobrecapas delgadas de 5 centímetros, reciclado en caliente in situ y perfilado y carpeta, brindando esta última el mejor desempeño en la vida útil representado en la aparición más temprana de deterioros como grietas por fatiga, grietas transversales y longitudinales y ahuellamiento, para periodos de evaluación de 7 años. En este mismo proyecto se evidenció que el desempeño mejoraba con el uso de mezclas asfálticas modificadas con polímeros. (Shuler & Schmidt, 2008).

Además, Irfan, Khurshid & Labi (2009) mostraron que las técnicas de preservación mediante la aplicación de sobrecapas funcionales y estructurales de MAC presentaron mayores relaciones de costo – efectividad utilizando las evaluaciones del IRI, la Condición de Calificación del Pavimento (PCR, por sus siglas en inglés) y la Profundidad de Rodería (RUT, por sus siglas en inglés).

Finalmente, el estudio de diversas Agencias Estatales de Carreteras (SHAs, por sus siglas en inglés) relacionado con técnicas de mantenimiento vial de preservación han reflejado que sobrecapas de MAC delgadas de aproximadamente 5 centímetros de espesor presentan periodos de vida útil variables entre 2 años y 12 años, dependiendo de factores externos como el tránsito vehicular, el clima, la topografía del sitio, los sistemas de drenaje, la distribución de la condición del estado del pavimento (CS, por sus siglas en inglés), condiciones y rangos de deterioros antes del tratamiento (BT, por sus siglas en inglés) y la calidad de la construcción. Por lo que, involucrando todos estos factores externos, la vida útil remanente de capas delgadas de MAC se podría promediar en 6 años. (Dawson et al., 2012).

Además, el uso de técnicas como bacheo formal instalado previo a la colocación de una sobrecapa delgada de MAC produce mejores resultados cuando el bacheo se realiza con altos porcentajes de compactación in situ (Dong, Huang, & Jia, 2014). Sumado a ello, se han realizado proyectos de mantenimiento vial que determinaron que sobrecapas delgadas en distintas carreteras siempre tienden a disminuir los valores del IRI, otorgando de esta manera una mejora sustancial del confort de las vías. Sin embargo, estos estudios también incluyeron sobrecapas de nivelación previas a la colocación de la carpeta delgada final (Hung et al., 2014).

Por otro lado, existen métodos que permiten realizar radiografías de las capas estructurales de una carretera. En Costa Rica, el LANAMMEUCR utiliza el GeoRadar de Penetración (GPR) para la valoración y estudio de las capas que conforman las estructuras de pavimento. Esta técnica permite detectar los espesores característicos de las vías nacionales, lo cual es ideal en casos donde se necesite un estudio especial que verifique la homogeneidad de un tramo de carretera. Además, es un procedimiento no destructivo que proporciona los resultados por medio de la toma y recepción de pulsos electromagnéticos de corta duración, los cuales ayudan a determinar patrones para los distintos materiales que componen el paquete estructural, de manera que se logre aproximar el espesor de las capas de la carretera (Barrantes, Valverde, Badilla & Loría, 2013).

Para una mejor interpretación de los resultados obtenidos por estudios internacionales, relacionados con la evaluación de técnicas de mantenimiento de carreteras, recientemente se realizan valoraciones estadísticas del desempeño de las técnicas de mantenimiento utilizadas, con el propósito de reforzar los valores obtenidos. Esta práctica se ha vuelto muy común en las investigaciones de los últimos años relacionados con comparación de técnicas de conservación vial, ya que revalida los efectos logrados mediante el estudio (Hung et al., 2014).

En vista de lo anterior, existen distintos métodos estadísticos de evaluación para efectos de obtener resultados estadísticamente relevantes. Entre ellos se encuentran: el análisis de la “t pareada” o “t Student”, el análisis de varianza “Anova” y el estudio con el estadístico “Tukey”. El primero de ellos permite determinar, con porcentajes de confianza seleccionados, la aceptación o rechazo de los análisis mediante el uso de hipótesis nulas y alternativas, donde estas hipótesis representan si la aplicación de las técnicas utilizadas presentan resultados eficientes en las mediciones con los indicadores viales del IRI y las deflexiones.

El análisis de tipo “Tukey” permite determinar la mejor alternativa de comparación en los casos donde se necesite comparar el impacto producido entre distintos tratamientos hacia un mismo objeto. Este tipo de estudios son muy utilizados cuando se manejan diversas pruebas a una serie de datos que parecieran ser similares pero que estadísticamente resultan ofrecer resultados diferentes, identificando de esta forma la mejor prueba realizada o la prueba que tuvo mayor impacto en el objeto de investigación. Es decir, el estudio de “Tukey”, permite evaluar entre sí tratamientos empleados a una misma muestra, resultando de esta manera la identificación del mejor tratamiento utilizado o el que mayor impacto reflejó en la muestra de indagación.

En Costa Rica, la ejecución de obras públicas viales conlleva una extensa tramitología y el cumplimiento de diversos requerimientos, que alargan el periodo entre el diseño técnico y la puesta en práctica de la construcción. A raíz de esto, resulta imprescindible para la nación, evitar que las rutas nacionales pavimentadas colapsen y caigan en un estado de deterioro total, que las convierta en rutas candidatas para proyectos de tipo reconstrucción. Lo anterior se puede lograr ejecutando proyectos que impidan que las rutas nacionales pavimentadas, que se encuentran en un estado de preservación sufran un deterioro acelerado, lo cual se puede alcanzar optimizando los recursos públicos e identificando la técnica más eficiente para el mantenimiento periódico de carreteras en Costa Rica.

La Figura 2.9 muestra el comportamiento típico de una carretera, en función del Índice de Serviciabilidad Presente (PSI, por sus siglas en inglés), el cual es una combinación matemática de valores obtenidos de las evaluaciones de campo, para predecir la Clasificación de Serviciabilidad Presente (PSR, por sus siglas en inglés), la cual se basa en una relación entre la opinión de los conductores, que al transitar tramos de las pistas de ensayo emplearon una escala de calificación del 1 al 5, donde 1 representa una condición muy mala y 5 una condición excelente (LANAMMEUCR, 2015).

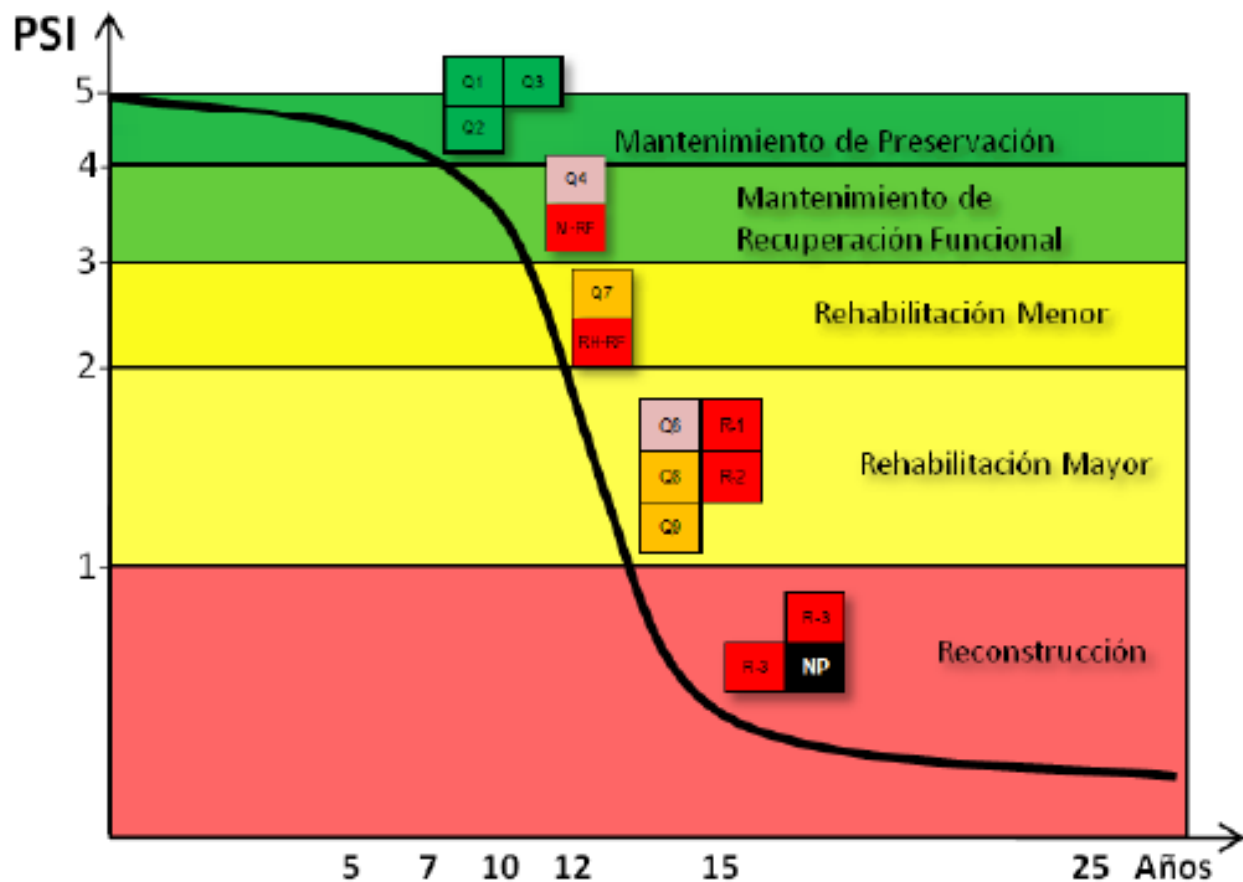


Figura 2.9. Curva de deterioro del pavimento de una carretera en función del PSI.

Fuente: Adaptado del LANAMMEUCR, 2015. *Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2014-2015* de la Universidad de Costa Rica.

En el marco legal costarricense, todas aquellas vías que se encuentren dentro de la zona de color rojo de la Figura 2.9 (Reconstrucción), son rutas que necesitan proyectos viales que deben pasar por el trámite burocrático mencionado anteriormente, por lo que posiblemente se refleje en retraso técnico en el estado de la red vial nacional pavimentada.

La Figura 2.9 muestra la evolución y desempeño de las estructuras de pavimento, ya sean asfálticas o de concreto, a través del tiempo. Una adecuada administración y gestión de pavimentos tiene como finalidad evitar que las carreteras que se encuentran dentro del área de color verde en la Figura 2.9 sufran mayores deterioros que provoquen que caigan hacia las zonas amarillas y posteriormente a la zona de color rojo.

En la Figura 2.10 se ilustra el comportamiento de las carreteras, acorde con la pérdida de capacidad funcional y capacidad estructural de las mismas, basado en el Informe INF-PITRA-001-2015 publicado por el LANAMMEUCR.

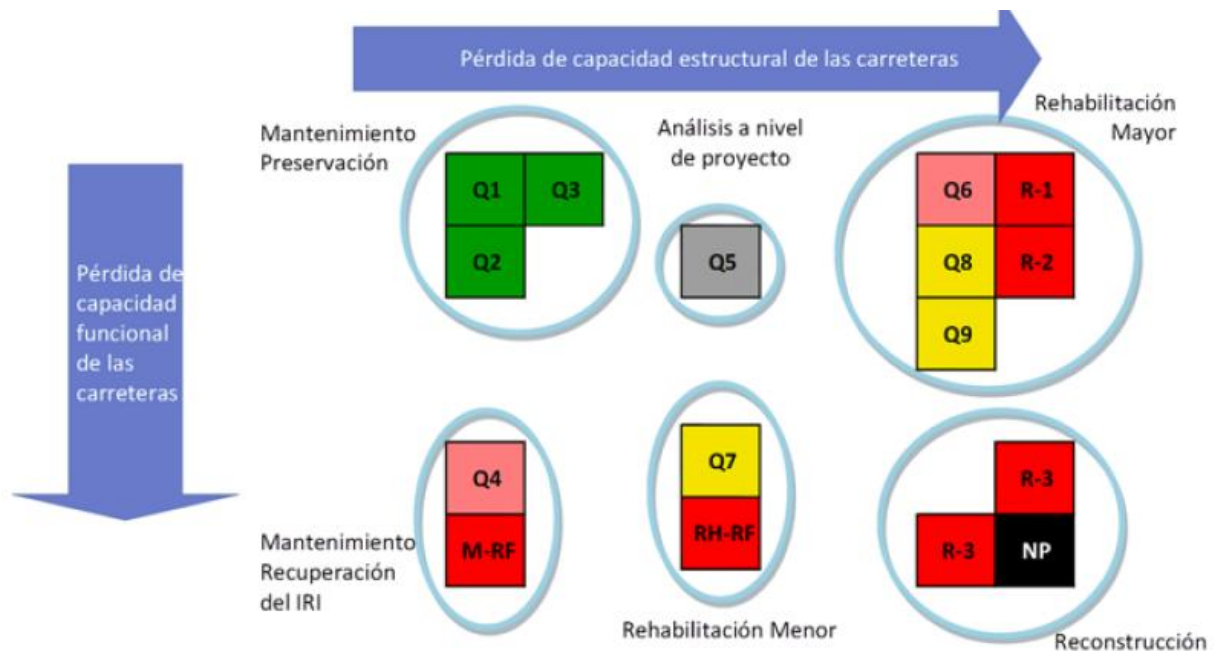


Figura 2.10. Ilustración del enfoque del comportamiento de los pavimentos de Costa Rica acorde con sus necesidades funcionales y estructurales.

Fuente: Adaptado del LANAMMEUCR, 2015. *Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2014-2015* de la Universidad de Costa Rica.

Esta metodología se basa en un enfoque a nivel red, el cual permite identificar el estado de los pavimentos nacionales utilizando los parámetros internacionales del IRI y las deflexiones medidas con el FWD. Una vez obtenido estos valores, el LANAMMEUCR, acorde con los niveles de TPD y con el tipo de importancia de la vía, clasifica las carreteras otorgándoles una Nota de calidad Q, tal y como se aprecia en la Figura 2.10.

Lo anterior otorga una herramienta útil para la priorización de atención de las rutas nacionales pavimentadas, prevaleciendo la intervención de tipo preservación y recuperación de la capacidad funcional sobre el resto de intervenciones viales, ya sea de tipo mantenimiento periódico o rehabilitación. Lo anterior apegado al hecho de que las intervenciones de tipo preservación otorgan una mayor relación costo – beneficio.

En resumen, una adecuada administración de pavimentos en el país se lograría identificando los pavimentos que requieren intervenciones de tipo preservación, y que estos sean prioritariamente atendidos de acuerdo a sus necesidades, con las técnicas óptimas para maximizar los beneficios de dicha inversión.

Al lograr optimizar las técnicas de mantenimiento periódico, el país podría incurrir en una inversión más eficiente que produzca resultados favorables a mediano y largo plazos, desde el punto de vista socio – económico, así como del desempeño de las estructuras de pavimento de la red vial nacional. En otras palabras, se lograría evitar lo que se presenta a continuación en la Figura 2.11, donde debido a inversiones ineficientes en pavimentos, las carreteras pierden su capacidad estructural y funcional, cayendo de esta forma a la zona conocida como reconstrucción, tal y como se ilustró en la Figura 2.9.

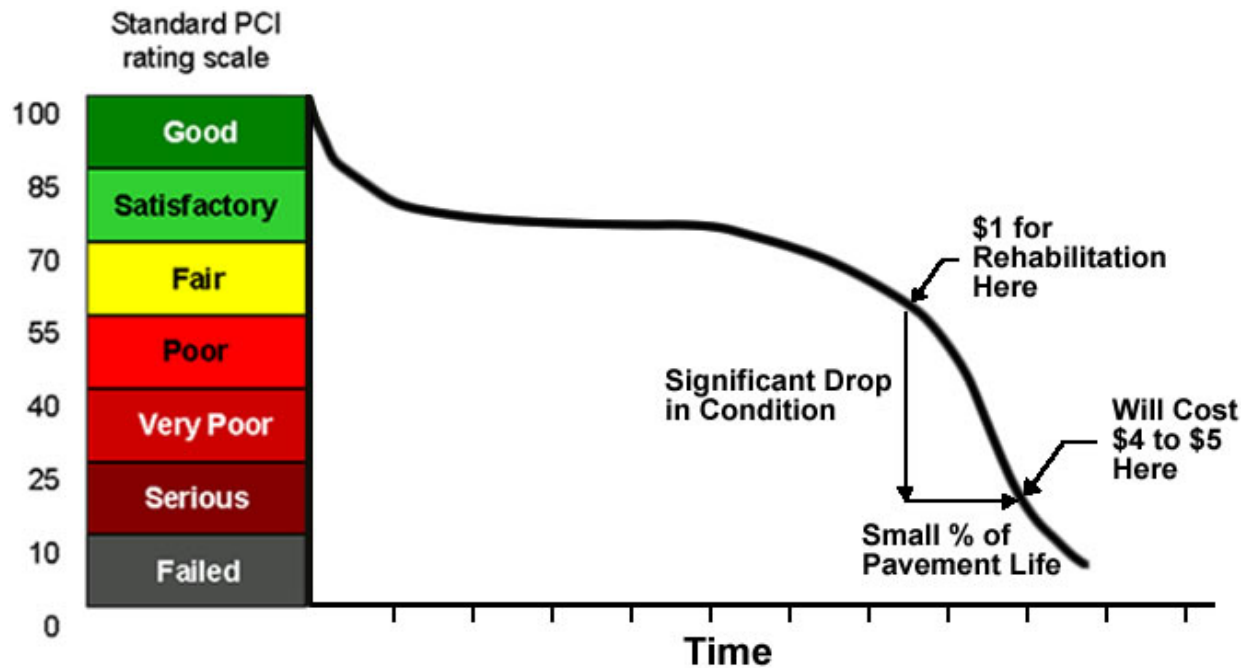


Figura 2.11. Curva de deterioro del pavimento de una carretera en función del PCI.

Fuente: Adaptado del LANAMMEUCR, 2015. *Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2014-2015* de la Universidad de Costa Rica.

Finalmente, las Figuras 2.9 y 2.11 se pueden correlacionar para presentar valoraciones de las carreteras pavimentadas, de forma tal que a partir de una auscultación PCI se puede identificar en qué momento de la vida útil de una vía es indispensable ejecutar proyectos de mantenimiento vial de tipo mantenimiento periódico, por medio de sobrecapas asfálticas delgadas. Lo anterior para evitar que las rutas se continúen deteriorando y esto implique una posterior inversión mayor, hasta cinco veces más alta.

3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

En este apartado se despliega el proceso metodológico utilizado para el desarrollo del proyecto. A manera de resumen, en la Figura 3.1 se describe la metodología empleada para el desarrollo del proyecto. En vista de que el informe buscó comparar las cuatro técnicas de conservación vial, correspondió garantizar que las cuatro técnicas se aplicaran sobre tramos de vía con condiciones similares en cuanto a espesor y características de las capas estructurales, para así disminuir la posibilidad de errores debido a diferencias de la estructura de pavimento existente.

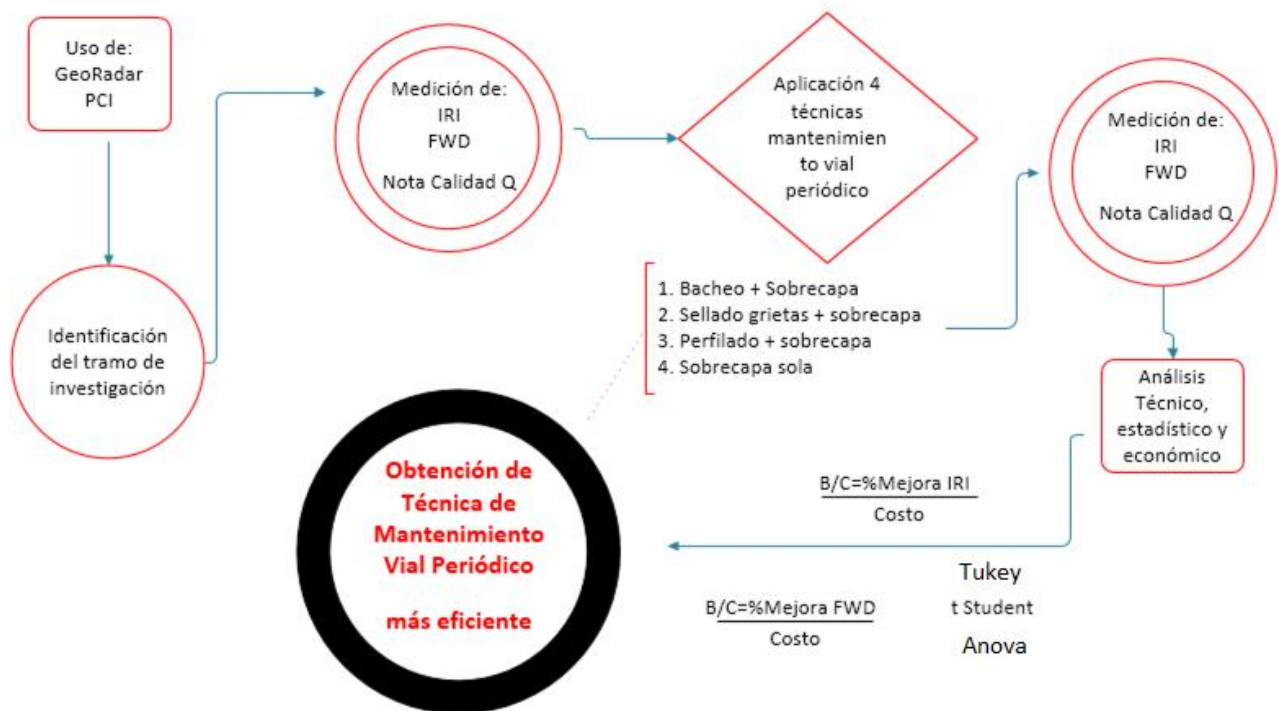


Figura 3.1. Esquema metodológico del proyecto de investigación.

3.1. IDENTIFICACIÓN DEL TRAMO DE INVESTIGACIÓN.

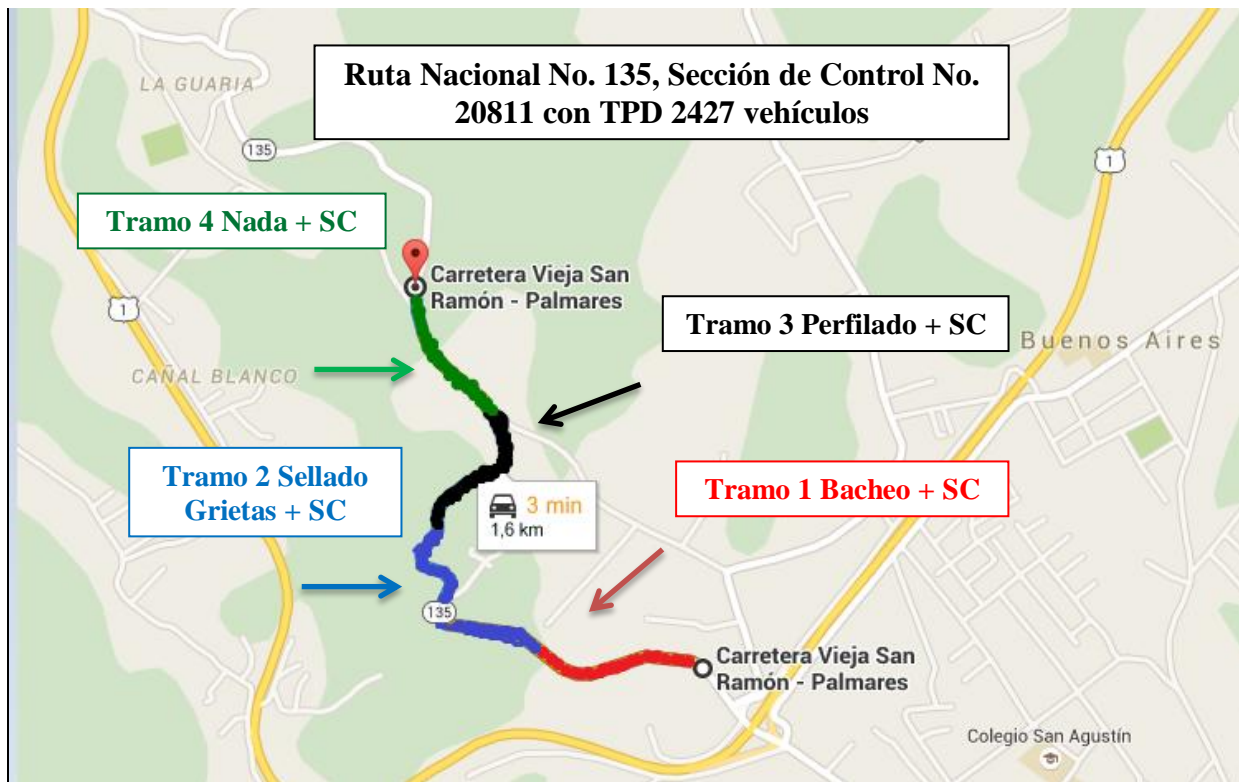
Para el desarrollo de este estudio se identificó un tramo de carretera de 1,6 km de longitud, el cual tuviera una estructura de pavimento con características técnicas similares, con la idea de dividir este recorrido en cuatro secciones iguales de 400 metros de longitud cada una.

En cada sección del tramo de investigación se aplicaron cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico típicas a nivel del país, las cuales se compararon entre sí mediante indicadores viales como las mediciones del IRI y las deflexiones con el deflectómetro de impacto, para posteriormente identificar la técnica de mantenimiento vial periódico que otorgara los resultados más favorables.

Para lograr evidenciar que las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico ejecutadas se evaluaran bajo condiciones similares, las cuatro secciones debían poseer similitudes en el estado de su paquete estructural. A raíz de esto, se realizó una evaluación del daño superficial del tramo de investigación mediante la metodología de auscultación visual del PCI, la cual otorga una calificación del estado del pavimento a partir de los daños y deterioros superficiales de la vía. Sumado a esto, se realizaron muestreos

de espesores de carpeta asfáltica, mediante la extracción de núcleos, para las cuatro secciones de estudio y por último, se ejecutó una evaluación con el GPR del LANAMMEUCR para obtener una aproximación de los espesores de la estructura de pavimento del tramo de investigación.

La carretera seleccionada fue la Ruta Nacional No. 135 en la Sección de Control No. 20811, específicamente del estacionamiento 5+210 al 6+810, conocida comúnmente como la calle vieja entre los cantones de Palmares y San Ramón de la provincia de Alajuela. Esta vía se caracteriza por tener un TPD aproximado de 2500 vehículos, según los estudios de tránsito más recientes publicados por el MOPT. La carretera se clasifica como una ruta secundaria, ya que, es una vía de comunicación entre dos cantones del país y cabe resaltar que la última intervención de mantenimiento ejecutada sobre esta calle data del año 2011, cuando se realizó un mantenimiento con bacheo formal. En la Figura 3.2 se observa el tramo de investigación seleccionado.



*SC: Sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor.

Figura 3.2. Ubicación del tramo de investigación identificado en la Ruta Nacional No. 135, Sección de Control No. 20811.

El tramo de investigación mostrado en la Figura 3.2 se dividió, acorde con la intervención de mantenimiento periódico ejecutada, de la forma mostrada en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Identificación del tramo de investigación del proyecto.

Número de Tramo	Estacionamiento de la ruta	Técnica de mantenimiento vial aplicada	Color en la Figura 3.2
1	5+210 al 5+610	Bacheo Formal + Sobrecapa de 5 cm de espesor	Rojo
2	5+610 al 6+010	Sellado de grietas + Sobrecapa de 5 cm de espesor	Azul
3	6+010 al 6+410	Perfilado + Sobrecapa de 5 cm de espesor	Negro
4	6+410 al 6+810	Solamente Sobrecapa de 5 cm de espesor	Verde

Se nota que cada una de las cuatro secciones intervenidas poseen una longitud de 400 metros lineales, los cuales sumados forman el tramo de investigación del proyecto desarrollado.

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El enfoque es de tipo investigación aplicada, pues se convirtió el conocimiento teórico en conocimiento práctico, al aplicar actividades de campo y realizar una evaluación técnica, económica y estadística de los resultados obtenidos. Asimismo, los instrumentos utilizados cuentan con componentes cuantitativos, ya que, la información recolectada se caracteriza por tener valores numéricos, facilitando de esta forma el análisis de los resultados.

Al ser el objetivo principal la identificación de la técnica más efectiva para el mantenimiento periódico de las rutas nacionales pavimentadas en estado de preservación, la investigación se considera de carácter profesional, ya que, por las particularidades de los medios utilizados para la obtención de datos, se tuvo que ejecutar pruebas de campo experimentales.

3.3. FUENTES Y SUJETOS DE INFORMACIÓN

3.3.1. Fuentes

Como parte del desarrollo del proyecto, se utilizaron las siguientes fuentes:

3.3.1.1. Primarias

Las fuentes primarias de información usadas para este proyecto se basan en una serie de investigaciones y artículos técnicos de distintos autores e investigadores en materia de ejecución y evaluación de técnicas de mantenimiento vial en distintos países a lo largo de los años. Las fuentes primarias para este proyecto se pueden dividir de la siguiente forma:

- a. Investigaciones y evaluaciones para el indicador IRI (Costello, Bargh, Henning & Hendry, 2013. *Proposed new performance indicator – vehicle operating cost index (Voci) due to road roughness*).
- b. Investigaciones y evaluaciones para el indicador FWD (Badilla & Sibaja, 2010. *Análisis de la respuesta estructural de pavimentos mediante deflectometría de impacto (FWD) en diferentes épocas del año en Costa Rica*).

- c. Investigaciones y evaluaciones para el indicador PCI (Vásquez, 2002. *Pavement condition index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras*).
- d. Comparaciones económicas entre distintas técnicas de mantenimiento vial (Irfan, Bilal, Labi & Kumares, 2008. *Cost-Effectiveness of Rehabilitation Alternatives – The Case For Flexible Pavements*).
- e. Comparaciones técnicas del desempeño de pavimentos (Shuler & Schmidt, 2008. *A Study of the Performance of Three Popular Asphalt Pavement Rehabilitation Strategies*).
- f. Evaluaciones técnicas de la red vial nacional de Costa Rica (LANAMMEUCR, 2015. *Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2014-2015* de la Universidad de Costa Rica).

3.3.1.2. Secundarias

Este apartado incluye básicamente las guías internacionales de evaluación de los pavimentos, así como resúmenes de catálogos que contienen y suministran información, relacionada con el desempeño de técnicas de conservación vial a nivel. Algunas enciclopedias técnicas usadas fueron:

- *Maintenance Management* del TRB.
- *Pavement Management* del TRB.
- Statistical analysis of fNIRS data: A comprehensive review.
- Multilevel Analysis.
- Statistical Principles in Experimental Design.

3.3.1.3. Terciarias

Como fuentes terciarias se utilizaron algunas bases de datos en red y sistemas bibliotecarios nacionales e internacionales como:

- TRB Of The National Academies
- Science Direct.
- Google Académico.

3.3.2. Sujetos de información

Los sujetos de información son:

- a. Gerencia de Conservación de Vías y Puentes de CONAVI: esta representa la unidad ejecutora del proyecto en campo, las técnicas de mantenimiento vial se elaboraron bajo una licitación pública a cargo de una empresa privada.

- b. LANAMMEUCR: mediante esta entidad se ejecutaron las mediciones de campo con el equipo técnico especializado para obtener los datos e información de los indicadores IRI y FWD.

3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Las técnicas de investigación empleadas fueron:

3.4.1.Revisión documental

Esta técnica consiste en una investigación documental basada en la identificación de palabras y textos claves en distintos escritos, de los cuales se espera obtener información selecta para el desarrollo del proyecto.

3.4.2.Análisis del PCI

Se fundamenta en una metodología internacional utilizada para la valoración e identificación de daños superficiales en las carreteras pavimentadas, basada en la norma ASTM D6433. Consiste en la visita al campo donde se realiza una auscultación visual del estado actual de la carretera fundamentada en mediciones de la magnitud y severidad de los daños de la vía, con el objetivo de determinar un grado de calificación de la vía, el cual guía respecto al tipo de intervención que requiere la vía (preventiva, mejoramiento de IRI, rehabilitación y reconstrucción). En la Figura 3.3 se muestra la metodología básica para la auscultación de pavimentos mediante el índice PCI según la norma ASTM D6433.

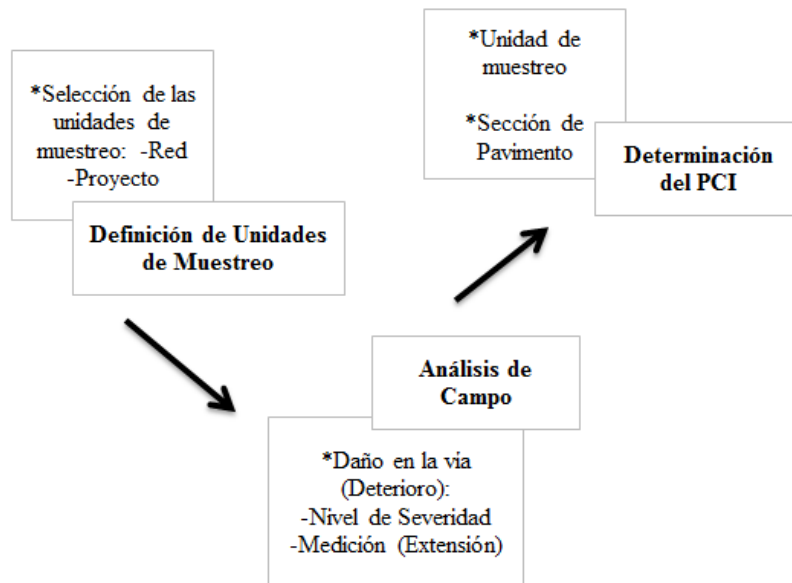


Figura 3.3. Pasos básicos en la metodología de la norma ASTM D6433 para auscultación de pavimentos PCI.

Fuente: LANAMMEUCR, 2014.

Basado en la Figura 3.3, se debe realizar la identificación de las unidades de muestreo (UM) del tramo de investigación seleccionado. Por tal razón, en las Figuras 3.4 y 3.5 se ilustra el diagrama de flujo que se siguió para la determinación de cada unidad de muestreo.

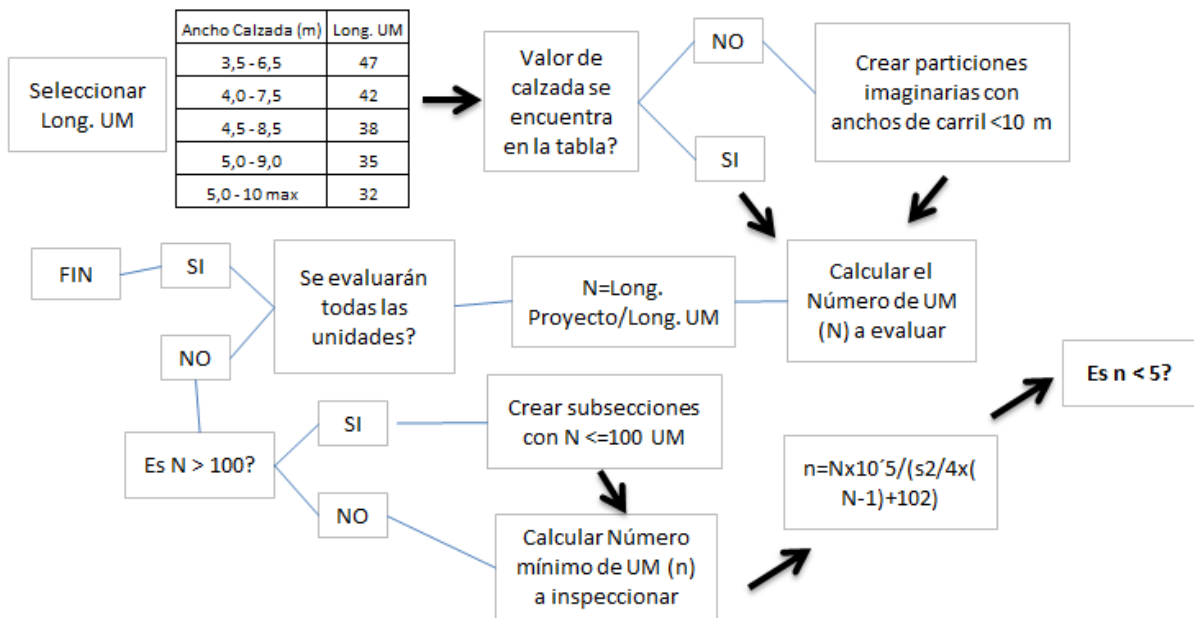


Figura 3.4. Parte I del diagrama de flujo para la identificación de las unidades de muestreo (UM) para la auscultación de pavimentos PCI del tramo de investigación.

Fuente: LANAMMEUCR, 2014.

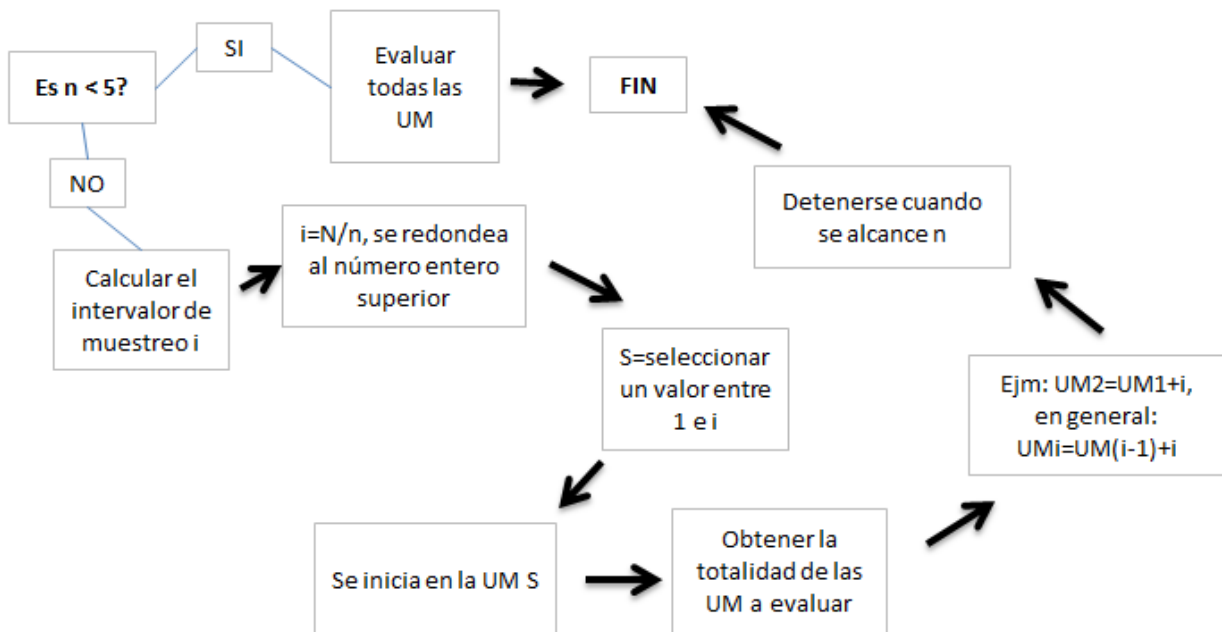


Figura 3.5. Parte II del diagrama de flujo para la identificación de las unidades de muestreo (UM) para la auscultación de pavimentos PCI del tramo de investigación.

Fuente: LANAMMEUCR, 2014.

La norma ASTM D6433 muestra la metodología a seguir en campo para la identificación de los deterioros superficiales del. En el Cuadro 3.2 se muestran las clasificaciones acorde con la evaluación del PCI.

Cuadro 3.2. Clasificación de la calidad de un pavimento según análisis PCI.

Calificación	Estado del Pavimento
100 - 85	Bueno
85 - 70	Satisfactorio
70 - 55	Regular
55 - 40	Pobre
40 - 25	Muy Pobre
25 - 10	Serio
10 - 0,	Fallado

Fuente: ASTM, 2011.

3.4.3. Equipo de laboratorio

Para determinar el tramo de investigación utilizado, se utilizó el equipo del GeoRadar (GPR) del LANAMMEUCR para la definición de un tramo de carretera homogéneo, es decir, que posea similares características de materiales de subbase, base y carpeta asfáltica, así como también similares espesores a lo largo del tramo escogido, para cada una de las capas mencionadas. Lo anterior sirvió para garantizar que la comparación de las cuatro técnicas de mantenimiento vial se ejecutara bajo términos y referencias equivalentes. El esquema representativo para el GPR se muestra en la Figura 3.6.

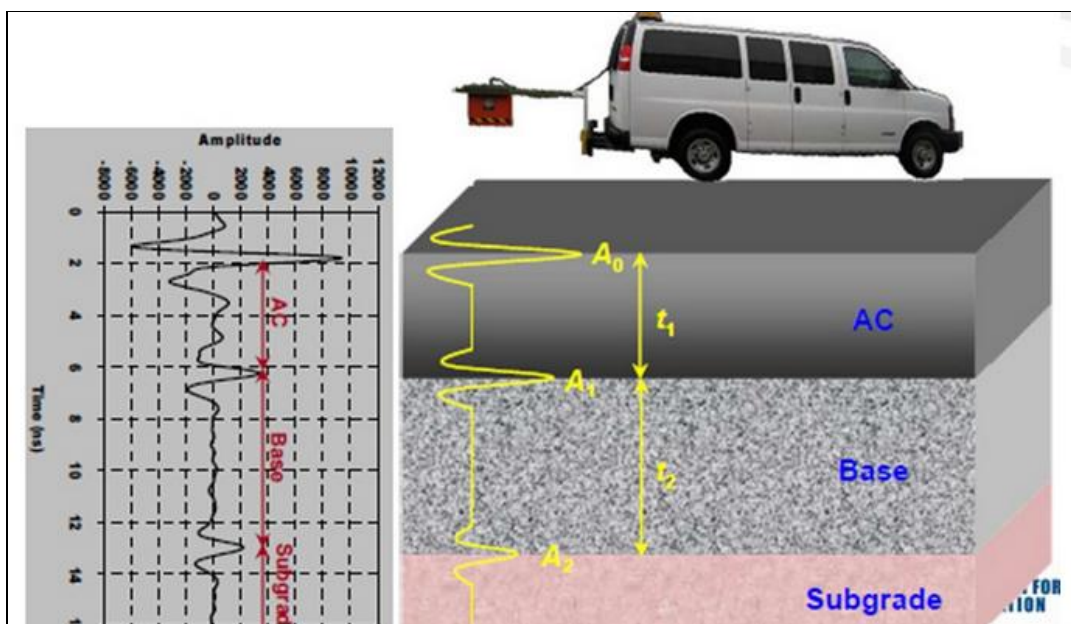


Figura 3.6. Esquema representativo del funcionamiento del GPR del LANAMMEUCR.

Fuente: Adaptado del LANAMMEUCR, 2013. *Determinación de la capacidad del GeoRadar, GPR, dentro de los procedimientos empleados para el análisis de la red vial nacional de Costa Rica.*

El GPR es una herramienta no destructiva que permite detectar espesores de estructuras de pavimento, fundamentado en el uso de ondas electromagnéticas que reflejan límites entre distintos materiales. El funcionamiento está basado en la radiación, mediante una antena transmisora muy próxima al suelo, de una señal que en la mayoría de los radares es transitoria, esto es, un pulso electromagnético de corta duración. El pulso radiado penetra en tierra donde parte de él se refleja hacia la superficie cada vez que interacciona con un objeto, estructura o cambio en la estratigrafía del terreno, con propiedades electromagnéticas.

La medición de los indicadores viales de IRI y FWD, se hizo mediante un equipo técnico especializado del LANAMMEUCR. El IRI se determinó mediante el uso de un perfilómetro inercial láser que calcula las variaciones o diferencias verticales relativas acumuladas a lo largo de un tramo de carretera, lo cual correlaciona con el nivel de confort o comodidad que sienten los usuarios de los vehículos al transitar por una vía. En la Figura 3.7 se ejemplifica el equipo del perfilómetro inercial láser utilizado.



Figura 3.7. Perfilómetro inercial láser del LANAMMEUCR.

Fuente: Adaptado del LANAMMEUCR, 2013. *Determinación de la capacidad del GeoRadar, GPR, dentro de los procedimientos empleados para el análisis de la red vial nacional de Costa Rica.*

El equipo mostrado en la Figura 3.7 corresponde a una técnica confiable para evaluar el comportamiento de las estructuras de pavimento desde el punto de vista de capacidad funcional. En el Cuadro 3.3 se exponen los rangos de clasificación para las carreteras apoyado en los resultados del IRI, empleados por el Lanamme para la evaluación bienal de la red vial nacional.

Cuadro 3.3. Clasificación de la calidad de un pavimento según análisis IRI.

Rango de IRI (m/km)	Clasificación de la regularidad superficial
Menor a 1,0	Muy Buena
Entre 1,0 y 1,9	Buena
Entre 1,9 y 3,6	Regular
Entre 3,6 y 6,4	Deficiente
Mayor a 6,4	Muy deficiente

Fuente: Adaptado del LANAMMEUCR, 2015. Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2014-2015 de la Universidad de Costa Rica.

Las mediciones de las deflexiones de la sección de estudio se realizaron mediante el ensayo con el deflectómetro de impacto (FWD), la cual es una técnica no destructiva, que consiste en un equipo de alta tecnología que mide el hundimiento o deflexión instantánea que experimenta el pavimento en un punto específico. Para este proyecto, se realizaron evaluaciones cada 50 metros lineales en ambos carriles de la ruta. En la Figura 3.8 se muestra el equipo utilizado para el desarrollo del proyecto.



Figura 3.8. Deflectómetro de impacto del LANAMMEUCR.

El equipo ilustrado en la Figura 3.8 determina mediciones de las deflexiones de la carretera en el campo, las cuales se debieron ajustar por efectos de la temperatura del pavimento y la temperatura de la fibra inferior de la carpeta asfáltica. En el Cuadro 3.4 se detallan los rangos de clasificación para los resultados obtenidos con el FWD empleados por el Lanamme para la evaluación bienal de la red vial nacional.

Cuadro 3.4. Clasificación de la calidad de un pavimento según análisis con el FWD para Costa Rica.

TPD	Menor a 5000 vpd**	5000 - 15000 vpd	15000 - 40000 vpd	Casos Especiales*
Categoría	TPD Bajo	TPD Moderado	TPD Alto	Especiales
Categorías de deflexión	Rangos (10^{-2} mm)			
Bajas	Menor a 76,50	menor a 70,80	menor a 59,20	menor a 48,50
Moderadas	76,50 - 88,50	70,80 a 83,30	59,20 a 69,40	48,50 a 57,60
Altas	88,50 - 115,70	83,30 a 112,90	69,40 a 95,20	57,60 a 80,80
Muy Altas	mayor a 115,70	mayor a 112,90	mayor a 95,20	mayor a 80,80

*Corresponden con rutas con alto TPD y porcentaje alto de vehículos pesados, las cuales son la ruta 1 Carretera General Cañas, tramo La Uruca – entrada a Naranjo, y la ruta 32, tramo puente sobre el Río Virilla – Limón.

**vpd: vehículos por día

Fuente: Adaptado del LANAMMEUCR, 2015. Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2014-2015 de la Universidad de Costa Rica.

Las mediciones del IRI y deflectometría se hicieron antes y después de la aplicación de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico, con el objetivo de obtener resultados evaluativos que permitieran comparar la efectividad de cada una de las técnicas.

3.4.4. Análisis de nota de calidad Q

Consiste en la obtención de una nota de calidad del pavimento basada en los resultados obtenidos para el IRI y las deflexiones en combinación con la información suministrada para el Tránsito Promedio Diario (TPD) de la ruta de estudio. Este concepto se exhibe en la Figura 3.9.

Rangos de TPD		Límites de los valores de deflexión (10 ⁻² mm)			
0 - 5 000		← 76,5	88,5	115,7	→
		BAJAS	MODERADA	ALTAS	MUY ALTAS
5 000 - 15 000		← 70,8	83,3	112,9	→
		BAJAS	MODERADA	ALTAS	MUY ALTAS
15 000 - 40 000		← 59,2	69,4	95,2	→
		BAJAS	MODERADA	ALTAS	MUY ALTAS
Casos Especiales		← 48,5	57,6	80,8	→
		BAJAS	MODERADA	ALTAS	MUY ALTAS

INDICADOR ESTRUCTURAL		CATEGORIAS DE FWD				
		BAJAS	MODERADA	ALTAS	MUY ALTAS	
INDICADOR FUNCIONAL		▼	▼	▼	▼	
Rangos de IRI (m/Km)	< 1,9 (Bueno)	▶	Q1	Q3	Q6	R-1
	1,9 – 3,6 (Regular)	▶	Q2	Q5	Q8	R-2
	3,6 – 6,4 (Malo)	▶	Q4	Q7	Q9	R-3
	> 6,4 (Muy Malo)	▶	M-RF	RH-RF	R-3	NP

*Casos Especiales: corresponden con rutas con alto TPD y porcentaje alto de vehículos pesados, las cuales son la ruta 1 Carretera General Cañas, tramo La Uruca – entrada a Naranjo, y la ruta 32, tramo puente sobre el Río Virilla – Limón.

Figura 3.9. Esquema de evaluación para la obtención de la nota de calidad Q.

Fuente: Adaptado del LANAMMEUCR, 2015. *Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2014-2015* de la Universidad de Costa Rica.

Esta metodología se utilizó para clasificar la calidad del estado del pavimento del tramo de estudio, tanto previo a la ejecución en campo de las cuatro técnicas como posterior a ello, con el propósito de obtener el impacto de cada una de las técnicas de estudio. Para la ejecución del proyecto fue vital que el tramo de investigación elegido se encontrara dentro del rango mostrado en la Figura 2.9 de color verde, ya que, de esta manera se garantizó que el proyecto se desarrolló en una carretera en estado de preservación, la cual es candidata óptima para la aplicación de técnicas de mantenimiento vial periódico.

3.4.5. Análisis de contenido

Es un método de investigación empleado para hacer inferencias válidas y confiables de datos con respecto a su contexto. Este análisis se nutre de la información obtenida en la revisión documental y se utilizó para analizar la información obtenida por medio de las mediciones del IRI y las deflexiones con el FWD.

3.4.6. Análisis estadísticos prueba “T Pareada”, prueba “Anova” y prueba “Tukey”

Una vez ejecutado el proyecto en campo y finalizadas las mediciones de IRI y deflexiones, antes y después de las intervenciones, se realizó, con el apoyo del programa “Multitab”, un análisis estadístico basado en la metodología del criterio de “t pareada” para medias de dos muestras emparejadas. La

finalidad de este análisis es demostrar que las mejoras producidas en las mediciones de IRI y deflexiones producto de la aplicación de cada técnica de mantenimiento vial periódico, son estadísticamente válidas. A manera de ejemplo, en la Figura 3.10 se muestra la distribución del estadístico de la prueba “t pareada” utilizada.

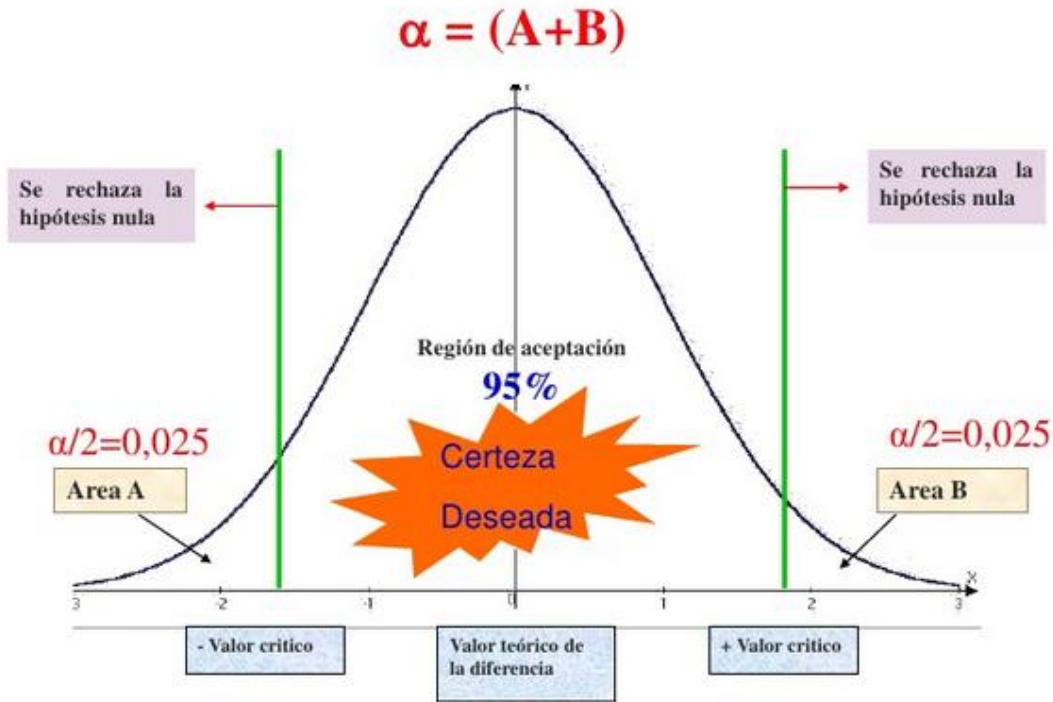


Figura 3.10. Distribución típica del estadístico “t pareada” para medias de dos muestras emparejadas en prueba de dos colas.

Fuente: Adaptado de Pértega & Pita, 2001. *Métodos paramétricos para la comparación de dos muestras t de Student.*

La Figura 3.10 ilustra una representación básica del análisis de “t pareada” empleado en este proyecto.

De manera similar, se empleó el análisis de varianza de un factor “Anova” para las diferencias de los valores del IRI medidos antes y después de la ejecución de las cuatro técnicas de mantenimiento vial en el tramo de investigación seleccionado. Este análisis busca determinar si existen diferencias significativas entre las medias de los datos obtenidos mediante las diferentes técnicas de mantenimiento vial.

También, se utilizó el análisis de “Tukey”, con un nivel de significancia del 95 %, con el propósito de determinar si existían diferencias entre los resultados obtenidos para las mediciones del IRI, es decir, si alguna técnica de mantenimiento vial producía mejores resultados que las otras técnicas de mantenimiento vial utilizadas.

3.4.7. Análisis económico

Este apartado consiste en asignar un valor económico para cada una de las cuatro técnicas de estudio, basado en los costos unitarios manejados por el gobierno de Costa Rica para actividades de

mantenimiento vial periódico, específicamente se utilizó la licitación de obra pública No. 2009LP-000003-0CV00 para la zona 1-6 San Ramón, proyecto ejecutado por la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del CONAVI. Con esta información y con los porcentajes de mejora en los indicadores viales se obtienen las relaciones Beneficio - Costo. En el Cuadro 3.5 se puede observar lo acotado.

Cuadro 3.5. Costos de las actividades de mantenimiento vial utilizadas.

Renglón de Pago	Actividad de mantenimiento vial periódico	Unidad de medida	Precio Unitario	Cantidad	Monto
M41(A)	Bacheo con mezcla asfáltica en caliente	t	₡ 63.866,61	87,64	₡ 5.597.269,70
M42(B)	Perfilado de pavimentos	m ²	₡ 731,04	2952,00	₡ 2.158.030,08
M43(C)	Ruteo y sellado de grietas	m	₡ 3.024,97	204,60	₡ 618.908,86
M45(A)	Pavimento Bituminoso en caliente	t	₡ 60.214,17	400,00	₡ 24.085.668,00

*El costo de la carpeta asfáltica de 5 cm para cada tramo del proyecto es el mismo y equivale a ₡24.085.668,00. El espesor del perfilado de pavimentos fue de 5 cm.

Fuente: Licitación Pública No. 2009LP-000003-0CV00 Zona 1-6 San Ramón CONAVI, 2014.

Cabe destacar que los costos mostrados en el Cuadro 3.5 son específicos para la zona de conservación vial de San Ramón, mostrada en la Figura 1.1 como zona 1-6, la cual incluye el cantón de Palmares y por ende la Sección de Control No. 20811 de la Ruta Nacional No. 135.

Con el fin de obtener la relación Beneficio-Costo, se determinó el porcentaje de mejora alcanzado para los indicadores del IRI y las deflexiones, y se utilizaron las fórmulas matemáticas mostradas a continuación. Esta relación se obtuvo para cada una de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para ambos carriles.

$$B/C = \frac{\% \text{ Mejora IRI}}{\text{Cost técn mant vial}} \quad (1)$$

Fuente: Irfan, Bilal, Labi & Sinha, 2008. *Cost-Effectiveness of Rehabilitation Alternatives – The Case for Flexible Pavements.*

$$B/C = \frac{\% \text{ Mejora FWD}}{\text{Cost técn mant vial}} \quad (2)$$

Fuente: Irfan, Bilal, Labi & Sinha, 2008. *Cost-Effectiveness of Rehabilitation Alternatives – The Case for Flexible Pavements.*

3.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

3.5.1. Objetivo 1. Evaluar la condición actual del tramo de investigación sobre la Ruta Nacional No. 135, mediante el cálculo del indicador PCI y la nota de calidad Q a partir de las mediciones del IRI y las deflexiones con el FWD.

La valoración del tramo de investigación se hizo mediante una auscultación visual realizada en campo donde se midieron los porcentajes de fallas superficiales del pavimento, tales como agrietamiento, presencia de baches, hundimientos, cuero de lagarto o piel de cocodrilo, segregación de agregados, entre otros. Luego, se calculó el valor del Índice de Condición del Pavimento (PCI) mediante la norma ASTM D6433-11, la cual se puede apreciar en el Anexo 1. De esta manera, se logró determinar que las cuatro secciones de investigación tuvieran un estado de pavimento similar entre ellas a lo largo de todo el tramo de estudio. Asimismo, y con la intención de reforzar lo anterior, el sondeo con el GPR logró detectar espesores similares en las estructuras de pavimentos de las cuatro secciones de investigación.

Por otro lado, mediante el equipo del LANAMMEUCR se obtuvieron las mediciones del IRI y las deflexiones con el FWD, y de esta manera, utilizando la matriz expuesta en la Figura 3.9, se determinó la Nota de Calidad Q para cada una de las cuatro secciones de investigación, las cuales establecieron la condición inicial del tramo de investigación del proyecto.

3.5.2. Objetivo 2. Aplicar las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico en el tramo de investigación sobre la Ruta Nacional No. 135.

Como parte de la programación de los proyectos de mantenimiento vial periódico, la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del CONAVI realizó la ejecución de las obras, donde se aplicaron las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico, una para cada tramo de 400 metros lineales de la Sección de Control No. 20811 de la Ruta Nacional No. 135, para una distancia total de investigación de 1,6 kilómetros (km). El orden de ejecución para las técnicas fue, en sentido Palmares–San Ramón: un bacheo formal en conjunto con la carpeta asfáltica de 5 cm de espesor, luego un ruteo y sellado de grietas más la carpeta asfáltica de 5 cm de espesor, seguido de un perfilado de pavimentos con la carpeta asfáltica de 5 cm de espesor y de último solamente la carpeta asfáltica de 5 cm de espesor. En el Cuadro 3.6 se resume la aplicación de cada técnica en la sección de estudio.

Cuadro 3.6. Ordenamiento de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico, en sentido Palmares–San Ramón.

Sección	Técnica de mantenimiento vial periódico aplicada	Estacionamiento
1	Bacheo Formal + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	5+210 al 5+610
2	Ruteo y sellado de grietas + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	5+610 al 6+010
3	Perfilado de pavimentos + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	6+010 al 6+410
4	Carpeta asfáltica sola de 5 cm de espesor	6+410 al 6+810

Durante el proceso del proyecto, se ejecutaron labores de control de tránsito vehicular en la ruta y se utilizó maquinaria especializada para realizar los trabajos, tales como: perfiladora, tanque de emulsión, back hoe, compactadora y pavimentadora (finisher). Las especificaciones de los trabajos ejecutados fueron las siguientes:

Perfiladora: Se utilizó para realizar el perfilado del pavimento existente en un espesor aproximado de 5 cm hasta obtener una superficie de rueda limpia de todo material suelto y polvo, dejando de esta manera la vía apta para la aplicación del riego de emulsión asfáltico previo a la colocación de la sobrecapa asfáltica.

Distribuidor de asfalto: Máquina usada para colocar el riego de emulsión asfáltico mediante aspersores de distribución. Para este proyecto se utilizó un riego promedio de 0,5 L/m².

Back Hoe: Equipo empleado para eliminación de escombros y cualquier material que pudiera contaminar el área de trabajo.

Compactadora: Maquinaria usada para garantizar la compactación de la carpeta asfáltica y del área a bachear, en la cual se debió obtener un porcentaje de compactación mayor a 92 % y menor a 98 % del valor de la gravedad específica bruta, medida a través de núcleos. Para la colocación de la sobrecapa asfáltica se usó un patrón de compactación de tres pasadas con la compactadora para el planchado y dos pasadas con vibración, para posteriormente utilizar el equipo de llanta de hule.

Finisher: Equipo empleado para la colocación de la carpeta asfáltica de 5 cm de espesor, controlando el alineamiento horizontal en campo. El tipo de mezcla asfáltica utilizado es asfalto tipo AC-30 con una graduación de tamaño máximo nominal de 12,5 mm y se aplicó a temperaturas mayores a 110° C en campo.

Asimismo, se hicieron trabajos adicionales de control temporal del tránsito vehicular, así como limpiezas de áreas externas a la zona de trabajo.

3.5.3. Objetivo 3. Evaluar la condición del tramo de investigación una vez se hayan aplicado las técnicas de mantenimiento sobre la Ruta Nacional No. 135, mediante el cálculo de la nota de calidad Q a partir de las mediciones del IRI y las deflexiones con el FWD.

De manera similar al Objetivo 1, después de ejecutadas las cuatro actividades de mantenimiento vial periódico, y utilizando nuevamente el equipo del LANAMMEUCR, se realizaron las mediciones del IRI y deflexiones con el FWD. De la misma forma, se usó la matriz de la Figura 3.9, para obtener la nueva Nota de Calidad Q para cada una de las cuatro secciones de investigación y así determinar la condición final del tramo de estudio.

3.5.4. Objetivo 4. Comparar cada una de las técnicas de mantenimiento vial a partir de los índices de desempeño y su análisis costo beneficio

Para el logro de este objetivo, se calcularon los porcentajes de mejora en el IRI y en las deflexiones medidas con el FWD para cada una de las cuatro secciones de investigación. Luego, se dividieron estos valores entre los costos totales de cada actividad de mantenimiento vial aplicada, y de esta forma se logró obtener la relación Beneficio – Costo para cada una de las cuatro secciones de estudio. En otras palabras, se utilizaron las ecuaciones (1) y (2) para el cálculo de la relación Beneficio – Costo.

4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la evaluación inicial del tramo de investigación, mediante el cálculo del PCI y el sondeo con el GPR. Así también, se muestran las mediciones iniciales del IRI y las deflexiones con el FWD, donde se obtuvo la Nota de calidad Q inicial.

Además, se exponen los resultados logrados durante la aplicación en campo de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico en las secciones de investigación. Aunado a esto, se muestran los resultados obtenidos para la evaluación posterior del tramo de investigación, mediante las mediciones finales del IRI y las deflexiones con el FWD, donde se obtuvo la Nota de calidad Q final.

Finalmente, se exponen los costos asociados a cada una de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico empleadas. Con esta información, en conjunto con los porcentajes de mejora en las mediciones del IRI y de las deflexiones, se muestran las relaciones Beneficio – Costo para cada una de las cuatro técnicas aplicadas. Esto último, logró identificar, en el tramo de estudio, la técnica de mantenimiento vial periódico más eficiente.

4.1. Objetivo 1. Evaluar la condición actual del tramo de investigación sobre la Ruta Nacional No. 135, mediante el cálculo del indicador PCI y la nota de calidad Q a partir de las mediciones del IRI y las deflexiones con el FWD

4.1.1. Identificación del tramo de investigación.

Con el fin de detectar un tramo de carretera homogéneo para la ejecución del proyecto, se utilizó el equipo del GPR, el cual se especializa en detectar espesores de capas de una vía. A continuación, en las Figuras 4.1 y 4.2 se ejemplifica la imagen del pavimento detectado, tanto en el sentido Palmares-San Ramón como en sentido San Ramón-Palmares.

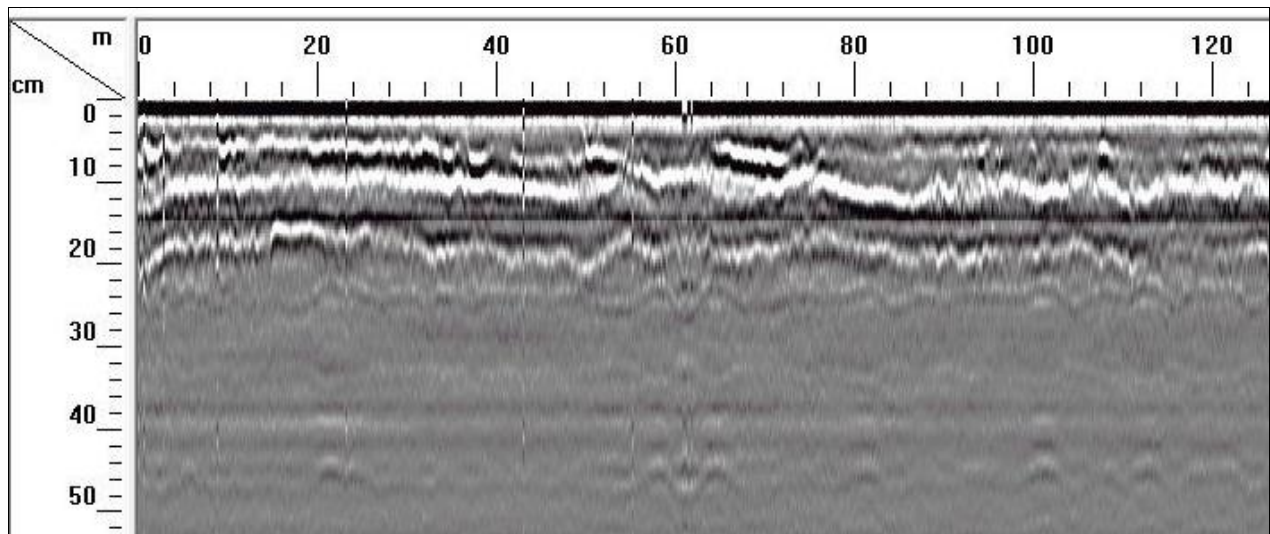


Figura 4.1. Imagen del GPR para la estructura de pavimento del tramo de investigación.

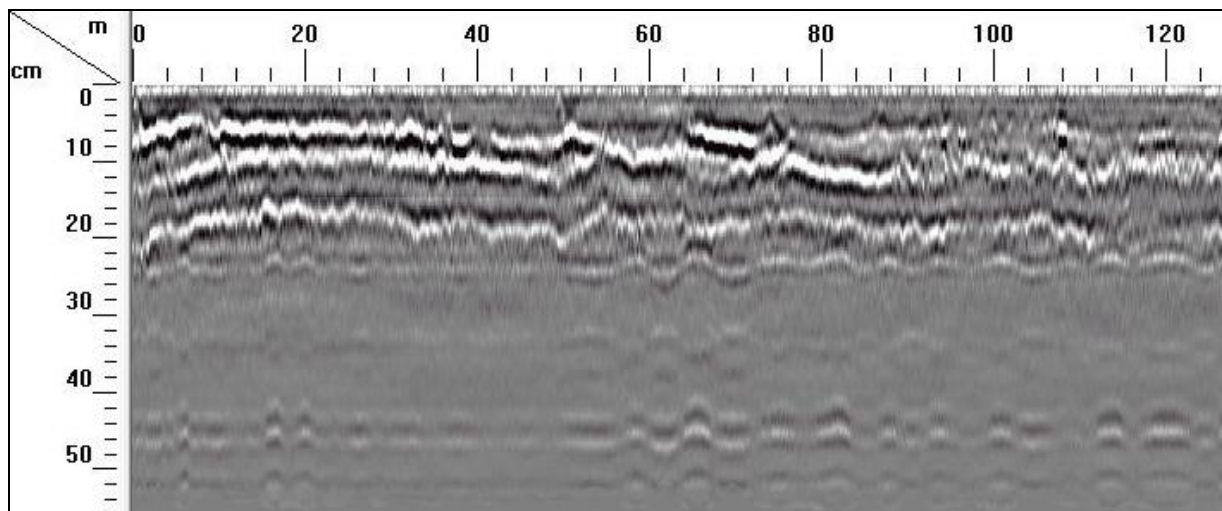


Figura 4.2. Imagen del GPR para la estructura de pavimento del tramo de investigación.

El GPR es un ensayo no destructivo del pavimento, el cual utiliza radiación electromagnética en bandas de microondas que detectan las estructuras de la carretera. Las Figuras 4.1 y 4.2 muestran las divisiones entre capas de materiales en la estructura del pavimento en estudio, a partir de las cuales es posible identificar los espesores de cada una de ellas a lo largo de todo el tramo de investigación. Es posible identificar la presencia de una carpeta asfáltica de aproximadamente 10 cm de espesor, con variaciones entre 8 cm y 12 cm a lo largo del tramo de 1,6 km de longitud.

Para confirmar lo mostrado en las Figura 4.1 y 4.2, se realizó una extracción de núcleos de la carpeta asfáltica, obteniendo los espesores mostrados en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Espesores aproximados del pavimento del tramo de investigación seleccionado.

Núcleo Número	Ubicación	Sección de Investigación	Espesor campo (mm)	Promedio (mm)	Desviación estándar (mm)
1	Ruta Nacional No. 135, Sección de Control 20811	Sección 1	101	100,5	1,29
2	Ruta Nacional No. 135, Sección de Control 20811	Sección 2	99		
3	Ruta Nacional No. 135, Sección de Control 20811	Sección 3	102		
4	Ruta Nacional No. 135, Sección de Control 20811	Sección 4	100		

**Las extracciones se hicieron en forma cruzada. Un muestreo en cada uno de las cuatro secciones del tramo en investigación.*

Se logró concluir con los resultados obtenidos del GPR, que la estructura de pavimento existente en el tramo de estudio presenta características de espesor similares, estimándose en 10 cm de grosor. Asimismo, se debe recordar que el sondeo que realizó el GPR es a lo largo de todo el tramo de investigación, es decir se cubrieron los 1,6 km de longitud.

Ahora bien, una vez obtenido un tramo de estudio homogéneo, se realizó una auscultación visual de los deterioros superficiales de la estructura de pavimento, mediante la metodología de evaluación del PCI acorde con la norma ASTM D6433. En el Cuadro 4.2 se muestra el resultado obtenido.

Cuadro 4.2. Evaluación del tramo de investigación mediante la metodología del PCI, según norma ASTM D6433.

UM	UBICACIÓN EN TRAMO DE INVESTIGACIÓN	DETERIORO	DENSIDAD	PCI (UM)	PCI (Promedio)
3	Tramo 1	GRIETA PARABOLICA	0,64	96	
8	Tramo 1	GRIETA PARABOLICA DESPRENDIMIENTO AGREGADO	1,31 3,58	86	
13	Tramo 2	GRIETA BORDE DESPRENDIMIENTO AGREGADO	0,85 1,71	88	
18	Tramo 2	DESNIVEL CARRIL DESPRENDIMIENTO AGREGADO	1,88 2,59	87	
23	Tramo 2	BACHEO GRIETA BORDE GRIETA LONG. Y TRANS. CUERO LAGARTO	2,43 0,09 2,30 0,90	86	88
28	Tramo 3	GRIETA PARABOLICA DESNIVEL CARRIL	0,17 0,17	85	
33	Tramo 3	DESPRENDIMIENTO AGREGADO DESNIVEL CARRIL	2,29 0,07	90	
38	Tramo 4	GRIETA LONG. Y TRANS. DESNIVEL CARRIL BACHEO	0,31 6,04 5,43	87	
43	Tramo 4	DESPRENDIMIENTO AGREGADO	1,79	90	

*La desviación estándar es de 3,92.

Para efectos de establecer una medida del PCI en tramos aledaños a la sección de investigación de 1,6 km, y con la única finalidad de reforzar que a lo largo del tramo de investigación se tuviera una estructura similar, se realizó la auscultación en secciones aledañas de 140 metros de longitud antes y después de la sección de investigación. Los resultados obtenidos se reflejan en los Cuadros 4.3 y 4.4.

Cuadro 4.3. Evaluación de un tramo de 140 metros antes del tramo de investigación en el estacionamiento 5+070, mediante la metodología del PCI, según norma ASTM D6433.

UM	DETERIORO	DENSIDAD	PCI	PCI
1	Cuero de Lagarto	1,14	89	
2	Cuero de Lagarto	0,40	95	
3	Grieta Parabólica	0,27	97	94
4	Grieta Parabólica	0,36	96	

**La desviación estándar es de 3,59.*

Cuadro 4.4. Evaluación de un tramo de 140 metros después del tramo de investigación en el estacionamiento 6+950, mediante la metodología del PCI, según norma ASTM D6433.

UM	DETERIORO	DENSIDAD	PCI	PCI
1	Grieta Long y Transversal	0,28		
	Grieta Parabólica	0,37	89	
	Desprendimiento De Agregado	0,63		
2	Desnivel de Carril	1,15		
	Grieta Long y Transversal	0,19	94	
	Cuero de Lagarto	0,10		92
3	Desnivel de Carril	0,56	93	
	Grieta Parabólica	0,70		
4	Cuero de Lagarto	0,42		
	Desnivel de Carril	0,28	90	
	Grieta Long y Transversal	1,97		

**La desviación estándar es de 2,38.*

Los datos mostrados en los Cuadros 4.3 y 4.4 se confeccionaron con el objetivo de apoyar el criterio de selección del tramo homogéneo de investigación. Por tanto, se logró constatar que los rangos identificados para el PCI a lo largo del trayecto del proyecto varían entre 85 y 96, obteniendo como promedio un valor de 88 para la sección en estudio de 1,6 km. Ahora bien, fundamentado en el Cuadro 3.1 se estima que cada una de las secciones en estudio se clasifican como “Buenas”, por lo que se evidencia otro aliciente para garantizar que cada una de las secciones en estudio del tramo de investigación seleccionado son homogéneas y por ende poseen características muy similares entre sí, inclusive al grado de mostrar

similitudes en la presencia de deterioros en la superficie de ruedo. En evidencia de los resultados expuestos anteriormente, se consiguió determinar un tramo homogéneo para su estudio, el cual se compone de 1.6 km de longitud y encuentra ubicado en el estacionamiento 5+210 al 6+810 de la Sección de Control No. 20811 sobre la Ruta Nacional No. 135 en Palmares de Alajuela. Esta sección de control cuenta con un Tránsito Promedio Diario (TPD) estimado de 2.427 vehículos por día, el cual es el dato más actualizado brindado por el Ministerio. Además, se observa que a pesar de que la vía haya tenido un crecimiento vehicular normal, tasa de crecimiento vehicular proyectada del año 2013 al 2023 de 6,98 %, aun así el TPD se estimaría en 2.747 vehículos por día para el año 2015 y no sobrepasaría los 5.000 vehículos por día y por lo tanto la Nota de calidad Q no variaría (MOPT, 2013). En el Cuadro 4.5 se muestra la distribución vehicular del TPD de la ruta.

Cuadro 4.5. Estimación y crecimiento del TPD para el tramo de investigación.

Ruta	Estación	Sección de Control	Año	TPD	Pasajeros	Clasificación (%)			TPD Estimado 2013	% Crecimiento 2013-2023	
						C. Liviana	Buses	2 Ejes 3 Ejes			
135	515	20811	2010	1.949	66,37	23,77	2,02	7,17	0,67	2.427	6,98

Fuente: MOPT, 2013. *Anuario de información de tránsito 2013.*

4.1.2. Análisis inicial de tramo de investigación.

Se realizó la evaluación inicial de la estructura de pavimento para medir el IRI y las deflexiones en ambos sentidos de la vía, mediante el perfilómetro inercial láser y el deflectómetro de impacto, respectivamente. En la Figura 4.3 se muestra el comportamiento del IRI del tramo de estudio de 1,6 km para ambos carriles, sentido Palmares-San Ramón y viceversa.

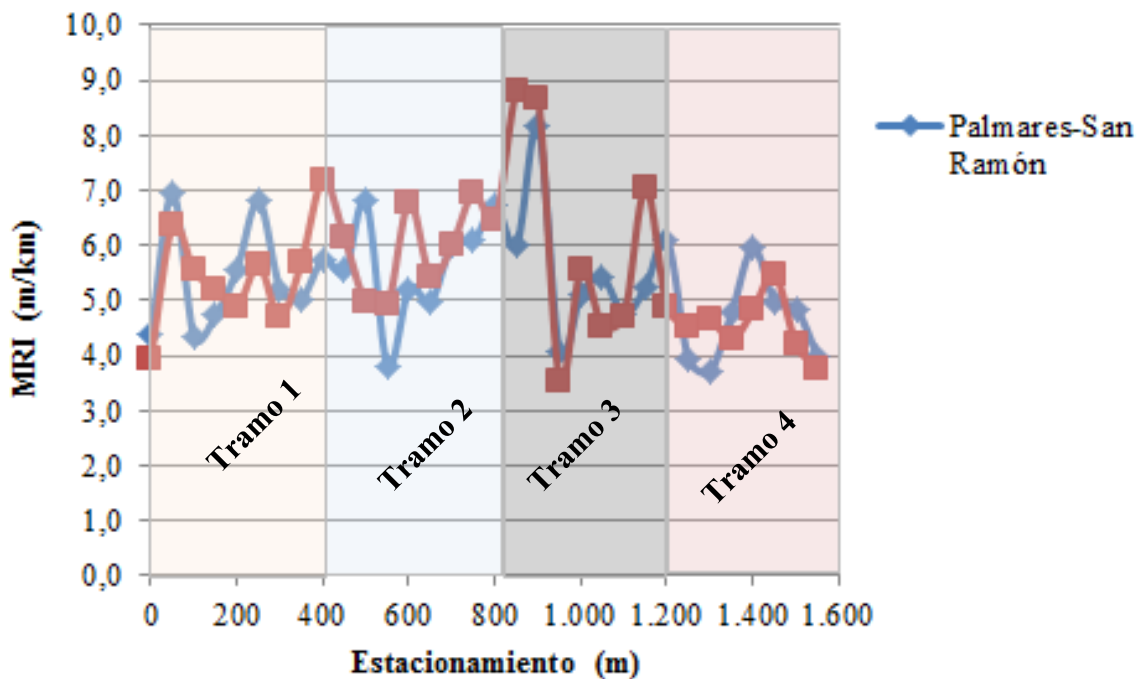


Figura 4.3. Comportamiento del IRI en el tramo homogéneo sobre la Ruta Nacional No. 135, Sección de Control No. 20811, previo a la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.

Es notable indicar que el IRI varía entre 4 (cuatro) y 7 (siete), obteniendo un promedio general de 5,4 para el carril con sentido Palmares-San Ramón y de 5,5 para el carril con dirección San Ramón-Palmares. Cabe destacar que para los estacionamientos 0+820 al 0+870, durante la medición en campo se encontró una cuadrilla del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) trabajando sobre la vía, provocando que un tramo de sesenta metros estuviera contaminado con material de desecho lo cual pudo afectar los resultados obtenidos en este trayecto. De la misma forma, en el Cuadro 4.6 se exponen los resultados para cada sección del tramo de investigación seleccionado.

Cuadro 4.6. Promedios del IRI en cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, previo a la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.

Estacionamiento	Técnica Mantenimiento Vial Periódico	IRI (m/km)		Palmares – San Ramón		San Ramón - Palmares	
		Palmares-San Ramón	San Ramón-Palmares	Rangos del IRI (m/km)	Desviación estándar	Rangos del IRI (m/km)	Desviación estándar
0+000 al 0+400	Bacheo Formal + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	5,1	4,6	4,3 a 6,8	0,79	3,8 a 5,5	0,51
0+400 al 0+800	Ruteo y sellado de grietas + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	5,5	6,2	3,8 a 6,1	0,89	3,6 a 8,8	1,94
0+800 al 1+200	Perfilado de pavimentos + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	5,8	6,0	4,1 a 8,2	1,31	4,9 a 7,2	0,89
1+200 al 1+600	Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor sola	4,8	5,3	3,7 a 6,1	0,90	4,0 a 6,4	0,74

El Cuadro 4.6 evidencia que los 4 (cuatro) tramos de investigación poseen regularidades superficiales calificadas como “Deficientes”, apoyado en lo expuesto en el Cuadro 3.3.

Para la medición de las deflexiones iniciales del pavimento, se empleó el equipo del deflectómetro de impacto del LANAMMEUCR, obteniendo los valores iniciales mostrados en la Figura 4.4.

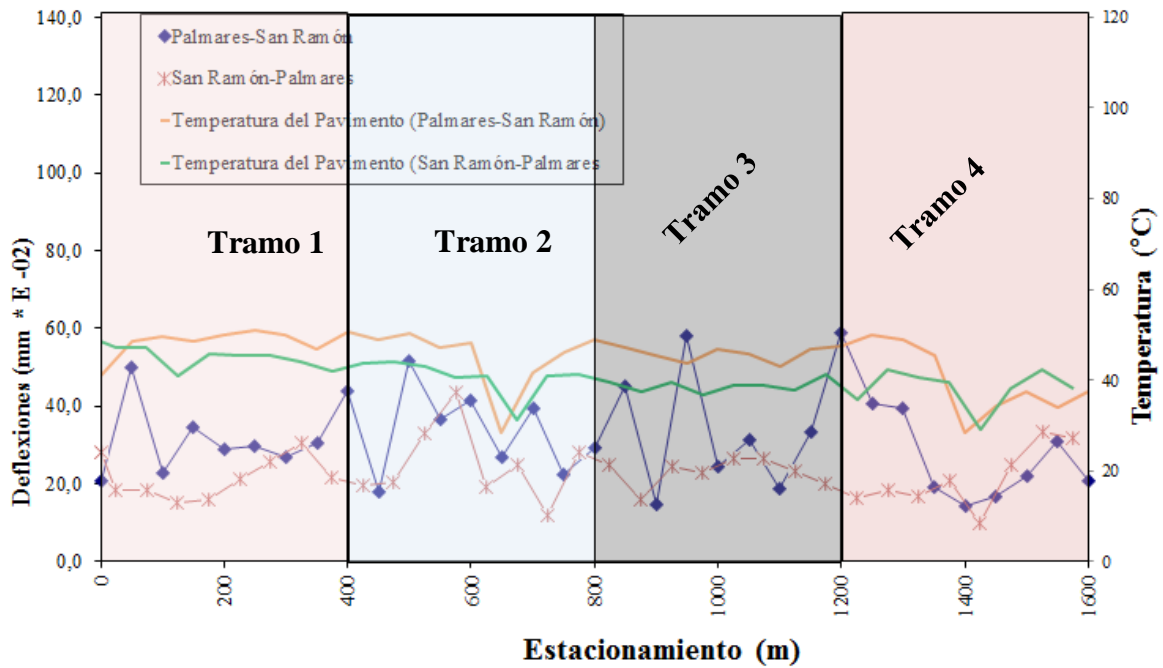


Figura 4.4. Comportamiento de las deflexiones en el tramo homogéneo sobre la Ruta Nacional No. 135, Sección de Control No. 20811, previo a la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.

Acorde con lo expuesto en la Figura 4.4, el promedio de deflexiones en el carril con sentido Palmares-San Ramón es de $31,6 \times 10^{-2}$ mm y en el sentido San Ramón-Palmares es de $22,8 \times 10^{-2}$ mm. En el Cuadro 4.7 se muestran los promedios de las deflexiones para cada sección de estudio del tramo de investigación elegido, en ambos sentidos de la vía.

Cuadro 4.7. Promedios de las deflexiones en cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, previo a la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.

Estacionamiento	Técnica Mantenimiento Vial Periódico	FWD (10^{-2} mm)		Palmares – San Ramón		San Ramón - Palmares	
		Palmares -San Ramón	San Ramón- Palmares	Rangos del FWD (10^{-2} mm)	Desviación estándar (10^{-2} mm)	Rangos del FWD (10^{-2} mm)	Desviación estándar (10^{-2} mm)
5+210 al 5+610	Bacheo Formal + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	32,00	21,30	21,00 a 49,09	9,46	9,80 a 33,50	7,51
5+610 al 6+010	Ruteo y sellado de grietas + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	33,20	24,10	18,20 a 51,50	10,98	16,10 a 28,00	3,67
6+010 al 6+410	Perfilado de pavimentos + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	35,60	24,30	14,90 a 58,90	16,91	11,90 a 43,60	9,77
6+410 al 6+810	Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor sola	25,6	21,8	14,4 a 40,6	10,21	15,0 a 30,6	5,79

**Se puede observar que en el peor de los casos para los valores promedio asociado con cada desviación estándar, los datos no superan el valor de $76,5 \times 10^{-2}$ mm.*

Por lo tanto, apoyado en los resultados mostrados en el Cuadro 4.7 y la información del TPD de la vía, esta ruta se caracteriza por tener deflexiones de categoría “Bajas”, lo cual representa una capacidad estructural buena. Ahora, utilizando las calificaciones obtenidas para las deflexiones y para el IRI y utilizando la información suministrada por la metodología del LANAMMEUCR, se lograron obtener las notas de calidad Q, las cuales se exhiben en el Cuadro 4.8.

Cuadro 4.8. Notas de Calidad Q para cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, previo a la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.

Estacionamiento	Técnica Mantenimiento Vial Periódico	Nota de Calidad Q	
		Palmares-San Ramón	San Ramón- Palmares
5+210 al 5+610	Bacheo Formal + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	Q4	Q4
5+610 al 6+010	Ruteo y sellado de grietas + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	Q4	Q4
6+010 al 6+410	Perfilado de pavimentos + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	Q4	Q4
6+410 al 6+810	Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor sola	Q4	Q4

Los resultados mostrados en el Cuadro 4.8 justifican que el tramo de investigación identificado es un buen candidato para la aplicación de técnicas de intervención de tipo mantenimiento vial periódico.

4.2. Objetivo 2. Aplicar las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico en el tramo de investigación sobre la Ruta Nacional No. 135.

4.2.1. Aplicación de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico.

A través del programa de mantenimiento vial de la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del CONAVI, se ejecutó por un periodo de una semana, mediante la Licitación Pública No. 2009LN-000003-OCV, el proyecto de intervención en el tramo seleccionado de 1,6 km de longitud en el estacionamiento 5+210 al 6+810 de la Sección de Control No. 20811 sobre la Ruta Nacional No. 135. La sección de estudio identificada se dividió en cuatro trayectos de 400 metros de longitud cada uno, donde se aplicaron distintas técnicas de mantenimiento vial periódico con el propósito de evaluar y comparar, desde el punto de vista técnico, económico y estadístico, cada una de ellas. La división de las secciones del tramo de estudio se ilustra en el Cuadro 4.9.

Cuadro 4.9. División del tramo de investigación seleccionado para la aplicación de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico.

Estacionamiento	Técnica Mantenimiento Vial Periódico	Sentido de la vía
5+210 al 5+610	Bacheo Formal + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	De Palmares hacia San Ramón
5+610 al 6+010	Ruteo y sellado de grietas + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	
6+010 al 6+410	Perfilado de pavimentos + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	
6+410 al 6+810	Carpeta asfáltica sola de 5 cm de espesor	

Como parte de la ejecución del proyecto, se realizaron trabajos de campo con maquinaria especializada. En el Cuadro 4.10 se expone el tipo de equipo empleado para cada técnica de mantenimiento vial, así como algunas recomendaciones seguidas para la inspección de campo.

Cuadro 4.10. Equipo utilizado para la aplicación de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación seleccionado.

Estacionamiento	Técnica Mantenimiento Vial Periódico	Maquinaria utilizada	Recomendaciones para inspección de campo
5+210 al 5+610	Bacheo Formal + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	Back Hoe, compactadora, tanqueta para riego de emulsión, cortadora de pavimento, herramientas menores + Tanque para imprimación, compactadora de rodillo y hule, pavimentadora (finisher), rastrillos y herramientas menores y equipo de acarreo de mezcla asfáltica en caliente	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificar la falla por fatiga o deformación permanente. 2. Realizar el corte con la profundidad dañana en forma de figura geométrica (cuadro, rectángulo, etc) 3. Sacar el espesor del área dañada con el back hoe 4. Limpiar completamente el área a bachear 5. Chequear temperatura mínima (90 C) de MAC y compactación con espesor no menor a 4 cm 6. Colocar el espesor de carpeta asfáltica (5 cm) a lo largo del tramo intervenido 7. Comprobar compactación mínima de 92 %.
5+610 al 6+010	Ruteo y sellado de grietas + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	Equipo de calefacción + Tanque para imprimación, compactadora de rodillo y hule, pavimentadora (finisher), rastrillos y herramientas menores y equipo de acarreo de mezcla asfáltica en caliente	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificar la falla por fatiga (Grieta en bloque, arco, transversal, longitudinal, por reflexión de junta, máximo abertura de 4 cm). 2. Aplicar sellador en configuración tipo "D" o "B". 3. Colocación y arrastre de asfalto modificado y conformar la banda. 4. Colocar el espesor de carpeta asfáltica (5 cm) a lo largo del tramo intervenido 5. Comprobar compactación mínima de 92 % .
6+010 al 6+410	Perfilado de pavimentos + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	Perfiladora, barredora, back hoe + Tanque para imprimación, compactadora de rodillo y hule, pavimentadora (finisher), rastrillos y herramientas menores y equipo de acarreo de mezcla asfáltica en caliente	<ol style="list-style-type: none"> 1. Controlar el espesor a perfilar (5 cm). 2. Perfilar todo el ancho y largo del tramo a intervenir. 3. Barrer el área perfilada y eliminar el fresado. 4. Colocar el espesor de carpeta asfáltica (5 cm) a lo largo del tramo intervenido 5. Comprobar compactación mínima de 92 %.
6+410 al 6+810	Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor sola	Tanque para imprimación, compactadora de rodillo y hule, pavimentadora (finisher), rastrillos y herramientas menores y equipo de acarreo de mezcla asfáltica en caliente	<ol style="list-style-type: none"> 1. Colocar el espesor de carpeta asfáltica (5 cm) a lo largo del tramo intervenido 2. Comprobar compactación mínima de 92 %.

La sobrecapa de mezcla asfáltica en caliente de 5 cm de espesor fue colocada de manera uniforme en cada una de las cuatro secciones del tramo de investigación. Lo anterior permitió la evaluación posterior de las

técnicas de mantenimiento vial de manera equiparada. En la Figura 4.5 se muestran las actividades de bacheo y sellado de grietas realizadas en las secciones del tramo de investigación.



Figura 4.5. Actividades de bacheo formal y sellado de grietas realizadas previo a la colocación de la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor.

De la misma forma, en la Figura 4.6 se muestran las actividades de perfilado de pavimentos y colocación de la sobrecapa asfáltica ejecutadas en las secciones de control del tramo de investigación.



Figura 4.6. Actividades de perfilado de pavimentos y colocación de la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor.

4.3. Objetivo 3. Evaluar la condición del tramo de investigación una vez se hayan aplicado las técnicas de mantenimiento sobre la Ruta Nacional No. 135, mediante el cálculo de la nota de calidad Q a partir de las mediciones del IRI y las deflexiones con el FWD.

4.3.1. Análisis post-aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico en el tramo de investigación.

Nuevamente se realizaron las mediciones de los indicadores viales del IRI y deflexiones (FWD) en el tramo de investigación. En la Figura 4.7 se presenta el comportamiento del IRI a través del tramo de estudio de 1,6 km para ambos carriles, en sentido Palmares-San Ramón y viceversa.

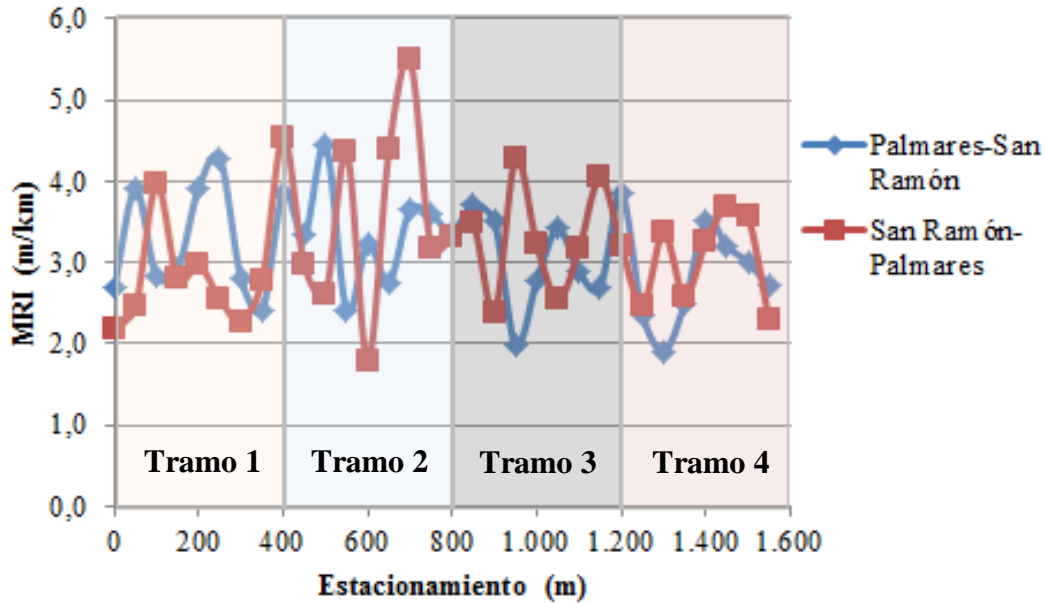


Figura 4.7. Comportamiento del IRI en el tramo homogéneo sobre la Sección de Control No. 20811 de la Ruta Nacional No. 135, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.

En comparación con la Figura 4.3, se logró detectar que los resultados del IRI se redujeron de manera considerable, ya que, los valores varían entre 2 (dos) y 4 (cuatro), salvo un punto cerca de la estación 5+910 que se aproxima a 5,5, obteniendo un promedio general de 3,1 para el carril con sentido Palmares-San Ramón y de 3,2 para el carril con dirección San Ramón-Palmares. Este punto específico se debió a que durante la medición del IRI, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) realizaba labores de excavación para la colocación de fibra óptica, lo cual alteró la superficie de la vía con desechos de tierra, por lo que esta medición no se contempló para el análisis estadístico final. En el Cuadro 4.11 se muestran los resultados para cada sección del tramo de investigación elegido.

Cuadro 4.11. Promedios del IRI en cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.

Estacionamiento	Técnica Mantenimiento Vial Periódico	IRI (m/km)		Palmares – San Ramón		San Ramón - Palmares	
		Palmares- San Ramón	San Ramón- Palmares	Rangos del IRI (m/km)	Desviación estándar	Rangos del IRI (m/km)	Desviación estándar
5+210 al 5+610	Bacheo Formal + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	3,20	2,70	2,40 a 4,30	0,70	2,20 a 4,00	0,56
5+610 al 6+010	Ruteo y sellado de grietas + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	3,40	3,70	2,40 a 4,50	0,64	1,80 a 5,50	1,22
6+010 al 6+410	Perfilado de pavimentos + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	3,00	3,30	2,00 a 3,70	0,57	2,40 a 4,30	0,57
6+410 al 6+810	Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor sola	2,90	3,10	1,90 a 3,90	0,64	2,30 a 3,70	0,64

El Cuadro 4.11 evidencia que las 4 (cuatro) secciones investigación poseen índices de rugosidad superficial calificados como “Regulares”.

Para las mediciones de las deflexiones del pavimento en las secciones de estudio, se obtuvo el comportamiento expuesto en la Figura 4.8.

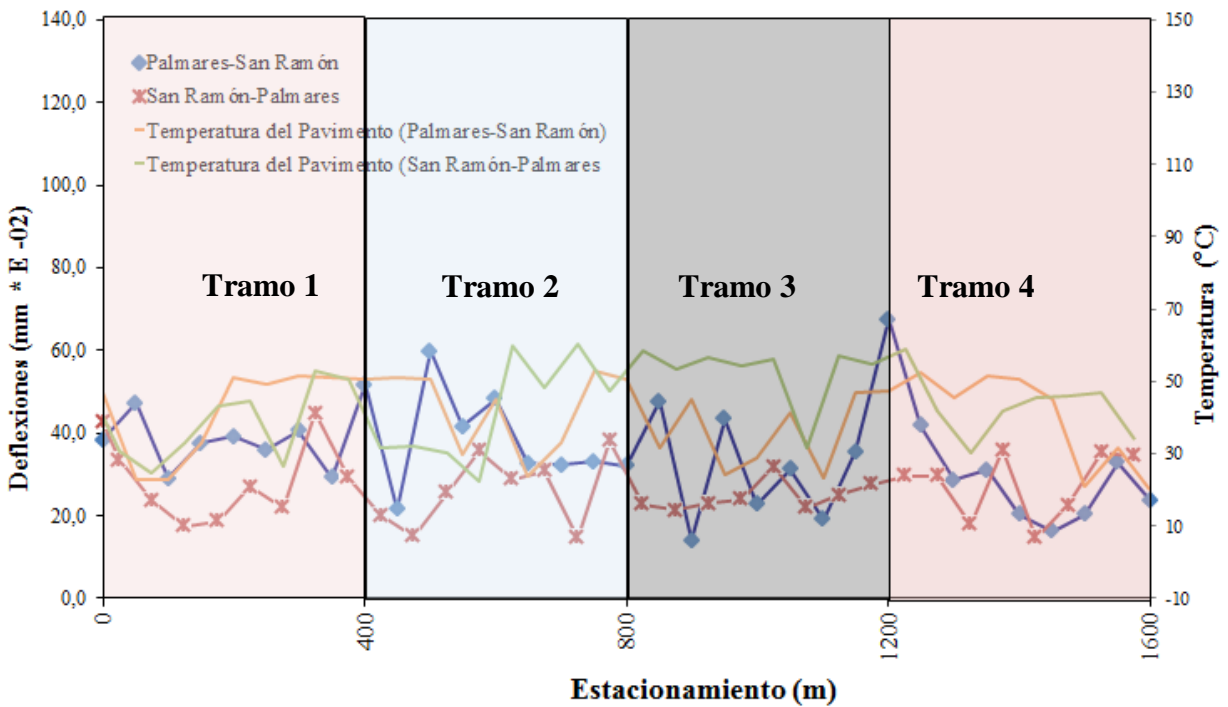


Figura 4.8. Comportamiento de las deflexiones en el tramo homogéneo sobre la Sección de Control No. 20811 de la Ruta Nacional No. 135, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.

En balance con los resultados mostrados en la Figura 4.4, lo reflejado en la Figura 4.8 ilustra un promedio en el valor de las deflexiones del pavimento de $34,7 \times 10^{-2}$ mm para el carril en sentido Palm ares-San Ramón, y un valor promedio de $26,8 \times 10^{-2}$ mm para el carril con dirección San Ramón-Palm ares. De igual manera, en el Cuadro 4.12 se exhiben los promedios de las deflexiones para cada sección de estudio del tramo de investigación elegido.

Cuadro 4.12. Promedios de las deflexiones en cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.

Estacionamiento	Técnica Mantenimiento Vial Periódico	FWD (10^{-2} mm)		Palmares – San Ramón		San Ramón - Palmares	
		Palmares-San Ramón	San Ramón-Palmares	Rangos del FWD (10^{-2} mm)	Desviación estándar	Rangos del FWD (10^{-2} mm)	Desviación estándar (10^{-2} mm)
5+210 al 5+610	Bacheo Formal + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	38,8	27,5	29,0 a 51,8	7,40	14,76 a 35,9	7,67
5+610 al 6+010	Ruteo y sellado de grietas + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	37,7	26,0	21,52 a 59,9	11,88	21,3 a 38,1	5,90
6+010 al 6+410	Perfilado de pavimentos + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	35,1	25,1	14,0 a 67,6	17,55	14,6 a 35,8	7,69
6+410 al 6+810	Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor sola	26,9	28,7	16,3 a 41,7	8,32	17,4 a 44,8	10,50

4.3.2. Corrección de deflectometría por efectos de la temperatura.

A pesar de los valores exteriorizados en el Cuadro 4.12, se tuvo que realizar un ajuste por efectos de la temperatura del pavimento y la temperatura de la fibra inferior de la carpeta asfáltica existente. Inicialmente, se determinó la temperatura promedio de la capa asfáltica, lo cual se logró recurriendo a la siguiente ecuación.

$$t_{pav} = \frac{1}{2}(t_{sup.pav} + t_{inf.pav}) \quad (3)$$

Donde:

t_{pav} = temperatura promedio del pavimento en ° C.

$t_{sup.pav}$ = temperatura de la superficie del pavimento en el ensayo en ° C.

$t_{inf-pav}$ = temperatura en la fibra inferior del pavimento.

Para determinar la $t_{inf.pav}$ se usó la Figura 4.9, la cual exhibe el comportamiento de la temperatura en función del espesor de la capa asfáltica del pavimento.

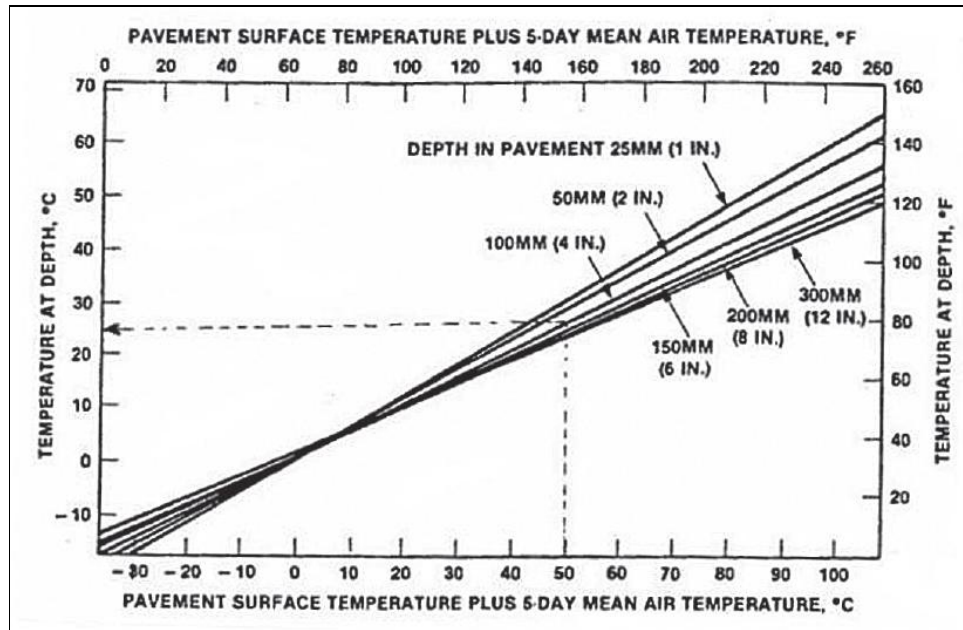


Figura 4.9. Temperatura en función del espesor de la capa asfáltica.

Fuente: Adaptado de Badilla & Sibaja, 2010. Análisis de la respuesta estructural de pavimentos mediante deflectometría de impacto (FWD) en diferentes épocas del año en Costa Rica.

Basado en lo anterior, en el Cuadro 4.13 se muestran los resultados obtenidos para los valores de temperatura en la fibra inferior de la carpeta asfáltica $t_{inf,pav}$ y para la temperatura promedio del pavimento t_{pav} .

Cuadro 4.13. Valores de temperatura en la fibra inferior del pavimento existente $t_{inf,pav}$ y temperatura promedio del pavimento t_{pav} para el tramo de investigación seleccionado.

Palmares-San Ramón					San Ramón-Palmares				
Estacionamiento	Temperatura del Aire (° C)	Temperatura en pavimento $t_{sup,pav}$ (° C)	Temperatura en fibra inferior $t_{inf,pav}$ (° C)	Temperatura promedio t_{pav} (° C)	Estacionamiento	Temperatura del Aire (° C)	Temperatura en pavimento $t_{sup,pav}$ (° C)	Temperatura en fibra inferior $t_{inf,pav}$ (° C)	Temperatura promedio t_{pav} (° C)
5+210	34,70	46,70	16,70	31,70	1+600	34,70	34,00	16,70	25,40
5+260	34,70	22,80	16,70	19,80	1+550	34,50	46,70	16,60	31,70
5+310	34,60	22,90	16,70	19,80	1+500	34,40	46,20	16,60	31,40

... continuación Cuadro 4.13. Resultados obtenidos para los valores de temperatura en la fibra inferior del pavimento existente $t_{inf.pav}$ y temperatura promedio del pavimento t_{pav} para el tramo de investigación seleccionado.

Palmares-San Ramón					San Ramón-Palmares				
Estacionamiento	Temperatura del Aire (° C)	Temperatura en pavimento o $t_{sup.pav}$ (° C)	Temperatura en fibra inferior $t_{inf.pav}$ (° C)	Temperatura promedio t_{pav} (° C)	Estacionamiento	Temperatura del Aire (° C)	Temperatura en pavimento o $t_{sup.pav}$ (° C)	Temperatura en fibra inferior $t_{inf.pav}$ (° C)	Temperatura promedio t_{pav} (° C)
5+360	34,30	33,20	16,50	24,90	1+450	34,50	45,60	16,60	31,10
5+410	34,20	51,30	16,50	33,90	1+400	34,40	41,80	16,60	29,20
5+460	34,30	49,20	16,50	32,90	1+350	34,40	30,20	16,60	23,40
5+510	34,30	51,40	16,50	34,00	1+300	34,30	41,80	16,50	29,20
5+560	34,40	51,10	16,60	33,80	1+250	34,30	58,80	16,50	37,70
5+610	34,30	50,60	16,50	33,60	1+200	34,30	54,90	16,50	35,70
5+660	34,30	51,30	16,50	33,90	1+150	34,40	57,10	16,60	36,80
5+710	34,40	50,50	16,60	33,50	1+100	34,50	31,70	16,60	24,20
5+760	34,40	29,60	16,60	23,10	1+050	34,60	56,30	16,70	36,50
5+810	34,40	44,90	16,60	30,70	1+000	34,70	54,30	16,70	35,50
5+860	34,40	23,60	16,60	20,10	0+950	34,80	56,70	16,80	36,70
5+910	34,40	32,80	16,60	24,70	0+900	35,00	53,20	16,90	35,10
5+960	34,40	52,70	16,60	34,60	0+850	35,10	58,70	17,00	37,80
6+010	34,40	50,50	16,60	33,50	0+800	35,10	47,40	17,00	32,20
6+060	34,40	31,70	16,60	24,10	0+750	35,10	60,40	17,00	38,70
6+110	34,40	44,90	16,60	30,70	0+700	35,10	48,40	17,00	32,70
6+160	34,40	24,30	16,60	20,40	0+650	35,20	59,90	17,00	38,50
6+210	34,40	29,00	16,60	22,80	0+600	35,20	22,50	17,00	19,80
6+260	34,40	41,20	16,60	28,90	0+550	35,00	30,20	16,90	23,60
6+310	34,40	23,30	16,60	19,90	0+500	34,90	32,10	16,80	24,50
6+360	34,40	47,10	16,60	31,80	0+450	34,90	31,60	16,80	24,20
6+410	34,40	47,40	16,60	32,00	0+400	34,80	50,50	16,80	33,60
6+460	34,50	52,40	16,60	34,50	0+350	34,70	52,80	16,70	34,80
6+510	34,70	45,30	16,70	31,00	0+300	34,60	26,40	16,70	21,50
6+560	34,70	51,50	16,70	34,10	0+250	34,70	44,60	16,70	30,70
6+610	34,80	50,60	16,80	33,70	0+200	34,60	43,00	16,70	29,80
6+660	34,70	45,00	16,70	30,90	0+150	34,50	33,00	16,60	24,80
6+710	34,80	21,00	16,80	18,90	0+100	34,30	24,70	16,50	20,60
6+760	34,60	31,60	16,70	24,10	0+500	34,10	30,70	16,40	23,60
6+810	34,60	20,10	16,70	18,40	0+000	34,00	40,60	16,40	28,50

Acorde con lo expuesto en el Cuadro 4.13, se formalizó la corrección de deflectometría por efectos de la temperatura del pavimento, la cual se generó utilizando la información exhibida en la Figura 4.10.

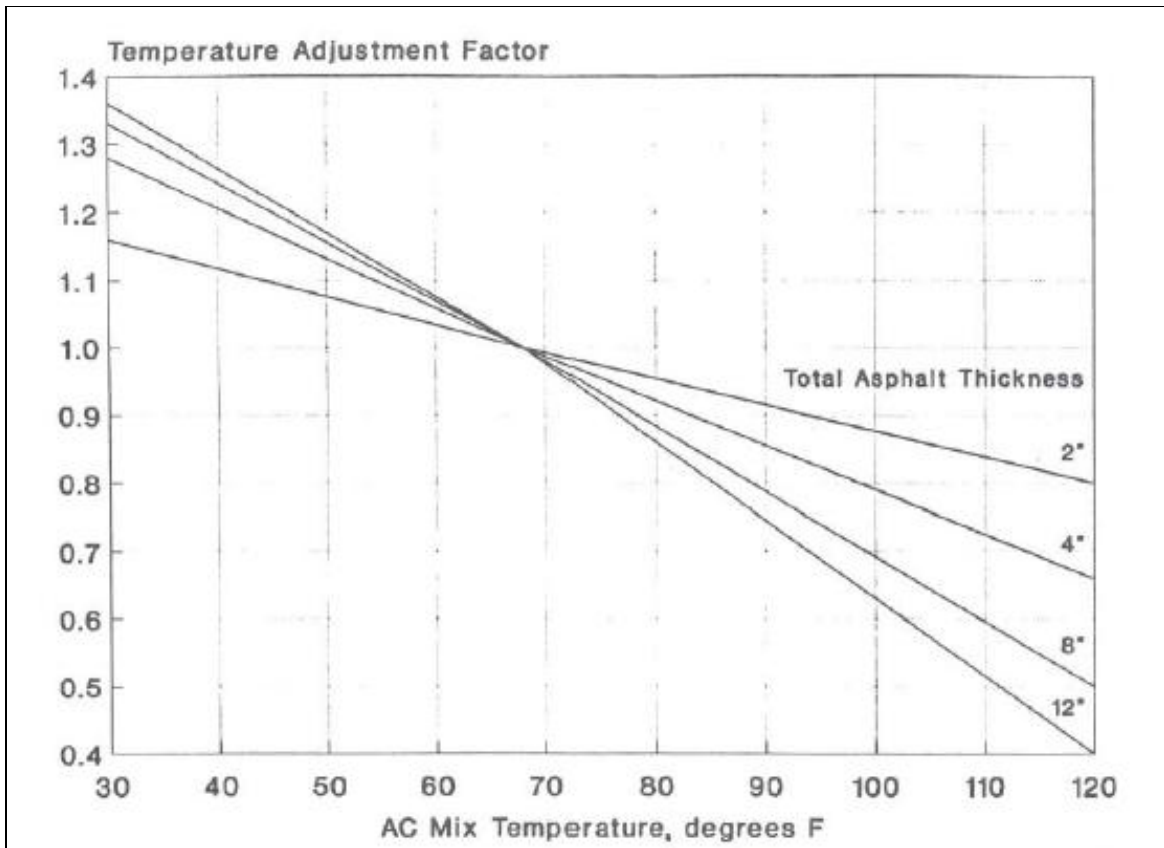


Figura 4.10. Nomograma empleado para el cálculo del factor de corrección para las deflexiones obtenidas con el FWD por efectos de la temperatura promedio del pavimento.

Fuente: AASHTO 93.

El Cuadro 4.14 muestra los factores de corrección por temperatura y los resultados finales para los valores de las deflexiones a lo largo del tramo de investigación.

Cuadro 4.14. Resultados obtenidos para la corrección por efectos de temperatura de las deflexiones para el tramo de investigación seleccionado.

Técnica de mantenimiento vial	Palmares-San Ramón			San Ramón-Palmares		
	Estación	Factor de corrección	Deflexiones (10^{-2} mm)	Estación	Factor de corrección	Deflexiones (10^{-2} mm)
Bacheo Formal + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	5+210	0,88	33,64	6+810	0,94	32,50
	5+260	1,02	48,14	6+760	0,88	30,90
	5+310	1,02	29,58	6+710	0,88	19,74
	5+360	0,95	35,70	6+660	0,88	12,92
	5+410	0,84	32,66	6+610	0,90	32,30
	5+460	0,84	30,51	6+560	0,97	17,28
	5+510	0,83	33,62	6+510	0,90	26,61
	5+560	0,84	24,47	6+460	0,79	23,38
	5+610	0,84	43,50	6+410	0,81	22,35
	5+660	0,83	17,88	6+360	0,80	19,92
Ruteo y sellado de grietas + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	5+710	0,84	50,30	6+310	0,96	20,94
	5+760	0,97	40,27	6+260	0,81	25,73
	5+810	0,88	42,52	6+210	0,81	19,49
	5+860	1,00	32,72	6+160	0,80	18,44
	5+910	0,95	30,70	6+110	0,81	17,27
	5+960	0,82	27,06	6+060	0,79	17,98
	6+010	0,84	26,74	6+010	0,88	33,30

... continuación Cuadro 4.14. Resultados obtenidos para la corrección por efectos de temperatura de las deflexiones para el tramo de investigación seleccionado.

Técnica de mantenimiento vial	Palmares-San Ramón			San Ramón-Palmares		
	Estación	Factor de corrección	Deflexiones (10 ⁻² mm)	Estación	Factor de corrección	Deflexiones (10 ⁻² mm)
Perfilado de pavimentos + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	6+060	0,96	45,50	5+960	0,78	11,37
	6+110	0,88	12,30	5+910	0,88	27,06
	6+160	1,00	43,13	5+860	0,78	22,51
	6+210	0,97	22,01	5+810	1,02	36,51
	6+260	0,90	28,06	5+760	0,96	24,66
	6+310	1,02	19,41	5+710	0,95	14,38
	6+360	0,88	31,12	5+660	0,96	19,31
	6+410	0,88	59,15	5+610	0,84	24,44
	6+460	0,82	34,23	5+560	0,82	36,70
	6+510	0,88	25,22	5+510	0,99	21,68
Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor sola	6+560	0,83	25,82	5+460	0,88	23,85
	6+610	0,84	16,93	5+410	0,89	16,57
	6+660	0,88	14,36	5+360	0,95	16,56
	6+710	1,04	21,14	5+310	0,99	23,41
	6+760	0,96	31,35	5+260	0,96	32,09
	6+810	1,04	24,70	5+210	0,90	38,26

En vista de lo descrito anteriormente, en la Figura 4.11 se ilustra el comportamiento de las deflexiones a lo largo del tramo de investigación determinado, una vez aplicada la corrección por efectos de temperatura promedio del pavimento durante el ensayo con el deflectómetro de impacto.

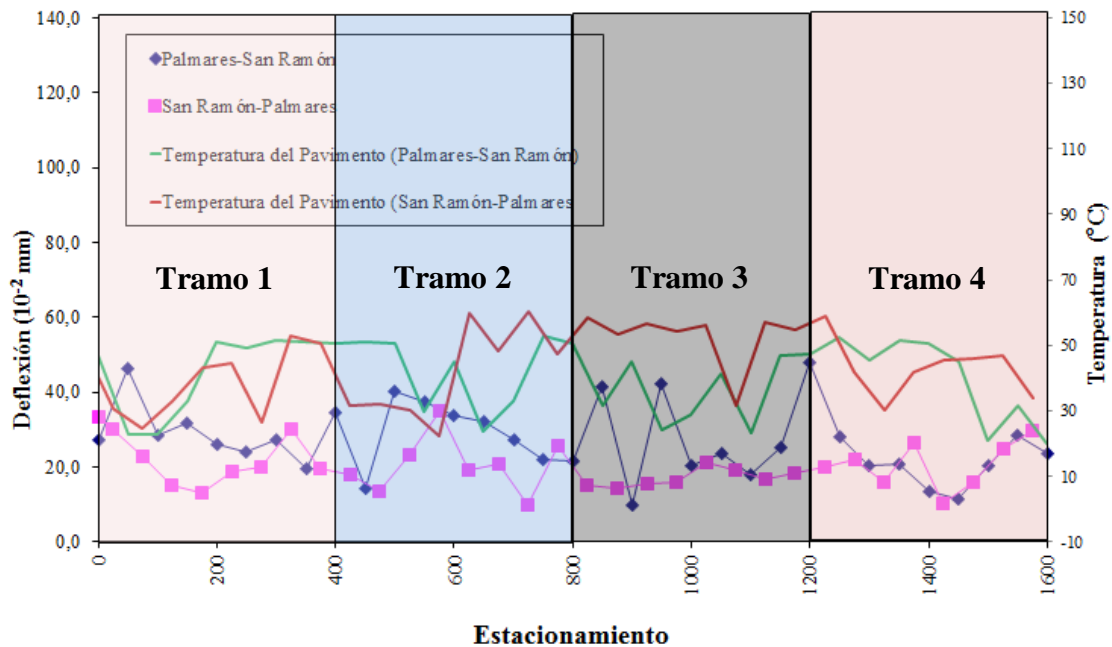


Figura 4.11. Comportamiento de las deflexiones en el tramo homogéneo sobre la Sección de Control No. 20811 de la Ruta Nacional No. 135, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico y con el factor de corrección por efectos de la temperatura promedio del pavimento.

A partir de los datos mostrados en la Figura 4.11 se logró determinar que el valor promedio de las deflexiones del pavimento corregidas es de $31,3 \times 10^{-2}$ mm para el carril en sentido Palmares-San Ramón, y un valor promedio de $23,6 \times 10^{-2}$ mm para el carril con dirección San Ramón-Palmares. En el Cuadro 4.15 se exhiben los promedios de las deflexiones para cada sección de estudio del tramo de investigación.

Cuadro 4.15. Promedios de las deflexiones en cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial y con el factor de corrección por efectos de la temperatura promedio del pavimento.

Estacionamiento	Técnica Mantenimiento Vial Periódico	FWD (10^{-2} mm)		Palmares – San Ramón		San Ramón - Palmares	
		Palmares-San Ramón	San Ramón-Palmares	Rangos del FWD (10^{-2} mm)	Desviación estándar (10^{-2} mm)	Rangos del FWD (10^{-2} mm)	Desviación estándar (10^{-2} mm)
5+210 al 5+610	Bacheo Formal + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	29,5	20,5	19,6 a 46,3	7,61	10,5 a 29,7	6,02
5+610 al 6+010	Ruteo y sellado de grietas + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	28,6	18,0	14,4 a 40,1	8,62	14,3 a 25,9	3,93
6+010 al 6+410	Perfilado de pavimentos + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	28,6	19,9	9,8 a 48,0	13,65	9,8 a 35,1	7,43
6+410 al 6+810	Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor sola	20,9	23,0	11,6 a 28,6	6,07	13,2 a 33,6	7,51

Por lo tanto, acorde con el TPD de la vía, esta ruta se caracteriza por tener deflexiones de categoría “Bajas”, lo cual resalta la buena capacidad estructural de la vía. Ahora bien, utilizando estos valores en

conjunto con los valores de IRI posterior a la intervención (Cuadro 4.11), se determinaron las notas de calidad Q luego de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico. Este concepto se expone en el Cuadro 4.16.

Cuadro 4.16. Notas de Calidad Q para cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado, después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico.

Estacionamiento	Técnica Mantenimiento Vial Periódico	Nota de Calidad Q	
		Palmares-San Ramón	San Ramón-Palmares
5+210 al 5+610	Bacheo Formal + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	Q2	Q2
5+610 al 6+010	Ruteo y sellado de grietas + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	Q2	Q2
6+010 al 6+410	Perfilado de pavimentos + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	Q2	Q2
6+410 al 6+810	Carpeta asfáltica sola de 5 cm de espesor	Q2	Q2

4.3.3. Análisis estadístico prueba “t pareada” de los resultados obtenidos para la evaluación con el indicador del IRI.

Con la finalidad de determinar si el experimento ejecutado tenía resultados estadísticamente válidos, se utilizó el criterio del análisis descriptivo de la “t pareada” con un porcentaje de confianza del 95 %. Este análisis consiste en definir una hipótesis nula, la cual se encarga de anular o refutar la idea con el objetivo de apoyar una hipótesis alternativa. Para este caso, la hipótesis nula fue asumir que las técnicas de mantenimiento vial no producían una diferencia en los valores del IRI y la hipótesis alternativa consistió en que las técnicas de mantenimiento vial aplicadas sí causaban mejoras en los datos del IRI. En detalle, esta hipótesis se presume verdadera hasta que una prueba empírica de la hipótesis indique lo contrario, es decir, se rechaza la hipótesis nula inicial para verificar que sí existió una diferencia en los valores finales del IRI. En vista que el porcentaje de confianza del análisis fue del 95 %, para todo valor de probabilidad igual o menor a 0,05 se acepta la hipótesis alternativa y por ende se rechaza la hipótesis nula.

En el Cuadro 4.17 se observan las respuestas del análisis estadístico de la “t pareada” para el carril en sentido Palmares-San Ramón.

Cuadro 4.17. Resultados del análisis estadístico con el criterio “t pareada” para cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado para el indicador IRI, en el sentido Palmares-San Ramón.

Característica	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 4	
	Bacheo Formal + Sobrecapa asfáltica de 5 cm		Sellado Grietas + Sobrecapa asfáltica de 5 cm		Perfilado + Sobrecapa asfáltica de 5 cm		Sobrecapa asfáltica de 5 cm	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Media	5,14	3,22	5,53	3,41	5,76	3,04	4,79	2,88
Varianza	0,62	0,494	0,80	0,41	1,72	0,32	0,82	0,41
Observaciones	8	8	8	8	8	8	8	8
Coefficiente de correlación de Pearson	0,74		0,95		0,798		0,92	
Diferencia hipotética de las medias	0		0		0		0	
Grados de libertad	7		7		7		7	
Estadístico t	9,91		17,14		8,33		13,77	
P(T<=t) una cola	1,13E-05		2,83E-07		3,52E-05		1,26E-06	
Valor crítico de t (una cola)	1,980		1,90		1,90		1,90	
P(T<=t) dos colas	2,27E-05		5,65E-07		7,04E-05		2,52E-06	
Valor crítico de t (dos colas)	2,37		2,37		2,37		2,37	

Los valores P(T<=t) resaltados en color rojo en el Cuadro 4.17 son todos menores a 0,05, por lo que los valores de probabilidad son muy bajos, es decir, se rechaza la hipótesis nula mencionada anteriormente, que las técnicas de mantenimiento vial utilizadas no presentarían diferencias en los resultados del IRI. Es entonces que se logra aceptar la hipótesis alternativa, efectivamente las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico sí presentan diferencias significativas en los resultados obtenidos para el IRI.

Este mismo análisis se empleó para el carril con orientación San Ramón-Palmares. En el Cuadro 4.18 se exponen los resultados obtenidos.

Cuadro 4.18. Resultados del análisis estadístico con el criterio “t pareada” para cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado para el indicador IRI, en el sentido San Ramón-Palmares.

Característica	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 4	
	Bacheo Formal + Sobrecapa asfáltica de 5 cm		Sellado Grietas + Sobrecapa asfáltica de 5 cm		Perfilado + Sobrecapa asfáltica de 5 cm		Sobrecapa asfáltica de 5 cm	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Media	4,59	2,74	6,17	3,66	6,05	3,30	5,25	3,05
Varianza	0,26	0,31	3,75	1,50	0,80	0,429	0,54	0,29
Observaciones	8	8	8	8	8	8	8	8
Coefficiente de correlación de Pearson	0,80		0,88		0,75		0,88	
Diferencia hipotética de las medias	0		0		0		0	
Grados de libertad	7		7		7		7	
Estadístico t	15,33		6,78		13,10		17,08	
P(T<=t) una cola	6,05E-07		0,00013		1,76E-06		2,90E-07	
Valor crítico de t (una cola)	1,90		1,90		1,90		1,90	
P(T<=t) dos colas	1,21E-06		0,00026		3,53E-06		5,80E-07	
Valor crítico de t (dos colas)	2,37		2,37		2,37		2,37	

Por lo tanto, de los Cuadros 4.17 y 4.18 se concluye, con un 95 % de confianza, que los experimentos sí son significativamente diferentes, es decir, las técnicas de mantenimiento vial periódico aplicadas sí muestran diferencias en los valores del IRI antes y después de la intervención de mantenimiento periódico para las 4 (cuatro) secciones de investigación.

4.3.4. Análisis estadístico prueba “t pareada” de los resultados obtenidos para la evaluación con el indicador del FWD.

Similarmente a la información expuesta en el Apartado 4.3.3, se empleó el criterio del análisis descriptivo de la “t pareada” con un porcentaje de confianza del 95 %, obteniendo los resultados expresados en el Cuadro 4.19 para el carril con dirección Palmares-San Ramón.

Cuadro 4.19. Resultados del análisis estadístico con el criterio “t pareada” para cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado para las deflexiones con el FWD, en el sentido Palmares-San Ramón.

Característica	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 4	
	Bacheo Formal + Sobrecapa asfáltica de 5 cm		Sellado Grietas + Sobrecapa asfáltica de 5 cm		Perfilado + Sobrecapa asfáltica de 5 cm		Sobrecapa asfáltica de 5 cm	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Media	32,04	29,50	33,24	28,60	35,61	28,61	25,56	20,92
Varianza	89,52	51,78	120,55	107,02	285,99	243,29	104,21	44,96
Observaciones	9	9	8	8	8	8	8	8
Coefficiente de correlación de Pearson	0,81	-	0,91	-	0,95	-	0,78	-
Diferencia hipotética de las medias	0	-	0	-	0	-	0	-
Grados de libertad	8	-	7	-	7	-	7	-
Estadístico t	-1,41	-	-0,18	-	1,68	-	0,58	-
P(T<=t) una cola	0,10	-	0,43	-	0,07	-	0,29	-
Valor crítico de t (una cola)	1,86	-	1,90	-	1,90	-	1,90	-
P(T<=t) dos colas	0,196	-	0,865	-	0,137	-	0,582	-
Valor crítico de t (dos colas)	2,31	-	2,37	-	2,37	-	2,37	-

A diferencia de los resultados obtenidos en el Cuadro 4.17 para el IRI, en este caso en el Cuadro 4.19, los datos P(T<=t) resaltados en color rojo indican que para todo valor de probabilidad mayor a 0,05 se acepta la hipótesis nula, es decir, las cuatro técnicas de mantenimiento vial aplicadas no presentan diferencias en los resultados de las deflexiones medidas con el FWD.

Igualmente que en los casos preliminares, en el Cuadro 4.20 se exhiben los resultados obtenidos para el análisis estadístico en el tramo de investigación elegido para el carril con orientación San Ramón-Palmares.

Cuadro 4.20. Resultados del análisis estadístico con el criterio “t pareada” para cada sección de intervención para el tramo de investigación seleccionado para las deflexiones con el FWD, en el sentido San Ramón-Palmares.

Característica	Sección 1		Sección 2		Sección 3		Sección 4	
	Bacheo Formal + Sobrecapa asfáltica de 5 cm		Sellado Grietas + Sobrecapa asfáltica de 5 cm		Perfilado + Sobrecapa asfáltica de 5 cm		Sobrecapa asfáltica de 5 cm	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Media	21,31	20,52	24,07	18,01	24,24	19,91	21,75	23,10
Varianza	56,44	48,05	13,47	29,08	95,54	60,74	33,56	72,81
Observaciones	9	9	8	8	8	8	8	8
Coefficiente de correlación de Pearson	0,74		0,64		0,88		0,76	
Diferencia hipotética de las medias	0		0		0		0	
Grados de libertad	8		7		7		7	
Estadístico t	-1,65		1,67		1,05		-2,21	
P(T<=t) una cola	0,07		0,07		0,16		0,03	
Valor crítico de t (una cola)	1,86		1,90		1,90		1,90	
P(T<=t) dos colas	0,137		0,138		0,328		0,062	
Valor crítico de t (dos colas)	2,31		2,37		2,37		2,37	

Se nota del Cuadro 4.20 que los resultados son similares a los mostrados en el Cuadro 4.19. Por lo tanto, basados en la información expuesta en los Cuadros 4.19 y 4.20 se concluyó, con un 95 % de confianza, que los experimentos no son significativamente diferentes, es decir, las técnicas de mantenimiento vial periódico aplicadas no muestran diferencias en los valores de las deflexiones para las 4 (cuatro) secciones de investigación, en ambos carriles. Esta información logró evidenciar que efectivamente la sobrecapa asfáltica delgada de 5 cm de espesor no otorga un reforzamiento estructural a la estructura de pavimento del tramo de investigación.

4.3.5. Análisis estadístico prueba “Anova y Tukey” de los resultados obtenidos para la evaluación con el indicador del IRI.

Para reforzar los resultados obtenidos en los Apartados 4.3.3 y 4.3.4, se utilizó el análisis estadístico Anova + Tukey, donde se logró comparar cada una de las cuatro técnicas de mantenimiento vial entre sí. Estos análisis consisten en determinar si existe alguna técnica que haya producido una mejora mayor a alguna otra técnica, entre las cuatro que se utilizaron. En el Cuadro 4.21 se muestran los datos empleados para el análisis de la prueba Anova + Tukey.

Cuadro 4.21. Resultados obtenidos para el análisis “Anova” para los resultados del IRI de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación seleccionado.

Resumen						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Tramo 1 (Bacheo)	16	30,11	1,88	0,20		
Tramo 2 (Sellado)	16	36,98	2,31	0,61		
Tramo 3 (Perfilado)	16	43,76	2,74	0,56		
Tramo 4 (Nada)	16	32,89	2,06	0,16		
Análisis de varianza (Anova)						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6,60	3	2,20	5,772	0,00155	2,76
Dentro de los grupos	22,85	60	0,38	-	-	-
Total	29,45	63	-	-	-	-

De manera similar al estudio expuesto para el estadístico “t pareada”, en este caso también se utilizó un porcentaje de confianza del 95 % y la hipótesis nula fue que no existían diferencias entre las medias obtenidas para las diferencias del IRI entre las medidas obtenidas antes y después de las cuatro técnicas de mantenimiento vial aplicadas, por lo que la hipótesis alternativa fue lo contrario, que sí existen diferencias significativas entre las medias de los valores del IRI antes y después del experimento ejecutado. Se observa en el Cuadro 4.21 que la probabilidad es menor a 0,05, por lo que se debe rechazar la hipótesis nula y prevalece la hipótesis alternativa, sí existen diferencias entre las medias de los deltas de los valores del IRI.

A partir de esto, se realizó el análisis Tukey para lograr detectar cuál técnica de mantenimiento vial fue la que generó mejores resultados para el IRI. El análisis Tukey se caracterizó por realizar pruebas entre las diferentes técnicas usadas, donde la hipótesis nula fue que las medias obtenidas entre las técnicas eran iguales, por consiguiente la hipótesis alternativa era que sí hay diferencias significativas entre las medias de las cuatro técnicas utilizadas, logrando de esta manera obtener la técnica de mantenimiento vial que presentara mejores resultados para el IRI.

En la Figura 4.12 se muestran los resultados comparativos del análisis Tukey. Asimismo, se muestran las diferencias obtenidas, antes y después de realizados los trabajos de campo, para los valores del IRI. Las letras A y B representan los resultados finales, donde letras iguales representan resultados iguales para el IRI en cada técnica de mantenimiento vial.

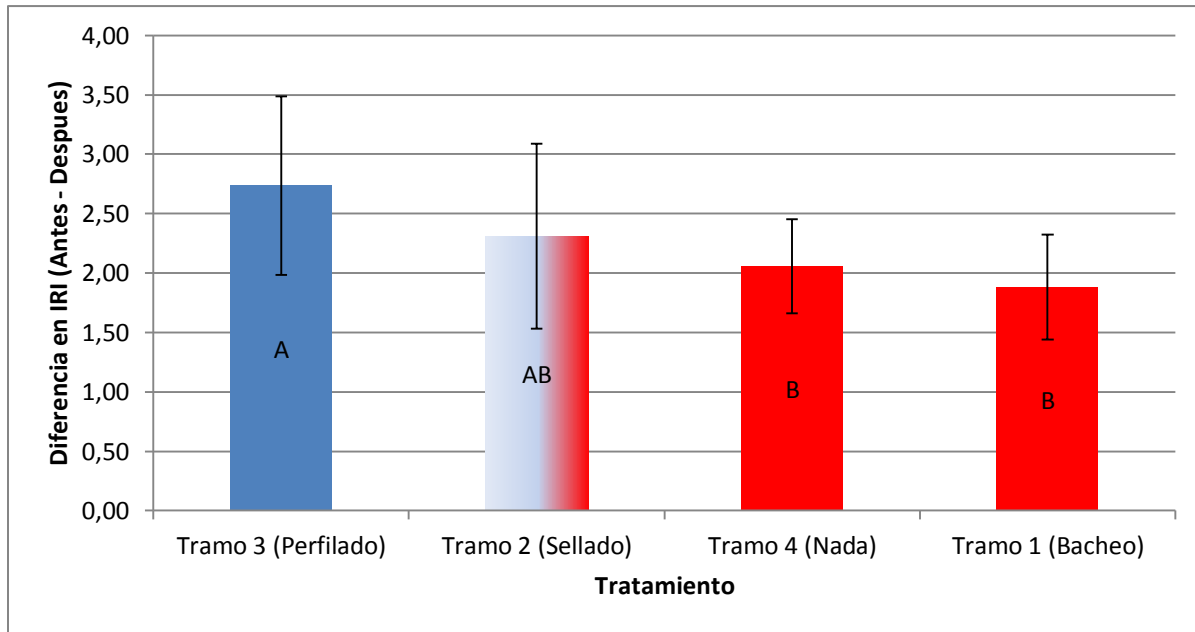


Figura 4.12. Comparación estadística entre las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico ejecutadas en el tramo de investigación para los resultados del IRI.

Se logra observar en la Figura 4.12 que la técnica de perfilado de pavimentos más la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor presenta una diferencia estadística significativa en cuanto a la mejora en IRI lograda, respecto a las técnicas de mantenimiento vial de bacheo formal más la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor y sólo la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor. Sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre la técnica de perfilado de pavimento más la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor y la técnica de sellado de grietas más la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor.

4.3.6. Análisis estadístico prueba “Anova y Tukey” de los resultados obtenidos para la evaluación con el indicador del FWD.

Procediendo con el mismo análisis realizado en el Apartado 4.3.5, se compararon las cuatro técnicas de mantenimiento vial utilizadas con la finalidad de detectar los mejores resultados obtenidos. En el Cuadro 4.22 se muestran los datos empleados para el análisis de la prueba Anova + Tukey.

Cuadro 4.22. Resultados obtenidos para el análisis “Anova” para los resultados de las deflexiones obtenidas con el FWD de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación seleccionado.

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Tramo 1 (Bacheo)	16	-47,60	-2,97	30,55		
Tramo 2 (Sellado)	16	15,12	0,94	19,78		
Tramo 3 (Perfilado)	16	40,78	2,55	22,17		
Tramo 4 (Nada)	16	-20,81	-1,30	43,33		
Análisis de varianza (Anova)						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	284,42	3	94,81	3,27	0,02710	2,76
Dentro de los grupos	1737,32	60	28,96	-	-	-
Total	2021,74	63	-	-	-	-

En este caso también se utilizó un porcentaje de confianza del 95 % y la hipótesis nula fue que no existían diferencias entre las medias obtenidas para las diferencias de las deflexiones entre las medidas obtenidas antes y después de las cuatro técnicas de mantenimiento vial aplicadas, por lo que la hipótesis alternativa sería fue lo contrario, que sí existen diferencias significativas entre las medias de los valores de las deflexiones antes y después del experimento ejecutado. Se observa en el Cuadro 4.22 que la probabilidad es menor a 0,05, por lo que se debe rechazar la hipótesis nula y prevalece la hipótesis alternativa, sí existen diferencias entre las medias de los deltas de los valores de las deflexiones.

A partir de esto, se realizó el análisis Tukey para lograr detectar cuál técnica de mantenimiento vial fue la que generó mejores resultados para las deflexiones. Este análisis Tukey se caracterizó por realizar pruebas entre cada una de las cuatro técnicas usadas, donde la hipótesis nula fue que las medias obtenidas entre las técnicas eran iguales, dejando de esta manera que la hipótesis alternativa era que sí hay diferencias significativas entre las medias de las cuatro técnicas utilizadas, logrando de esta manera obtener la técnica de mantenimiento vial que presentara mejores resultados para los valores de las deflexiones.

Para efectos de explicación, en la Figura 4.13 se muestran los resultados comparativos del análisis ejecutado. Las letras A y B representan los resultados finales, donde letras iguales representan resultados iguales para las deflexiones mediadas con el FWD en cada técnica de mantenimiento vial.

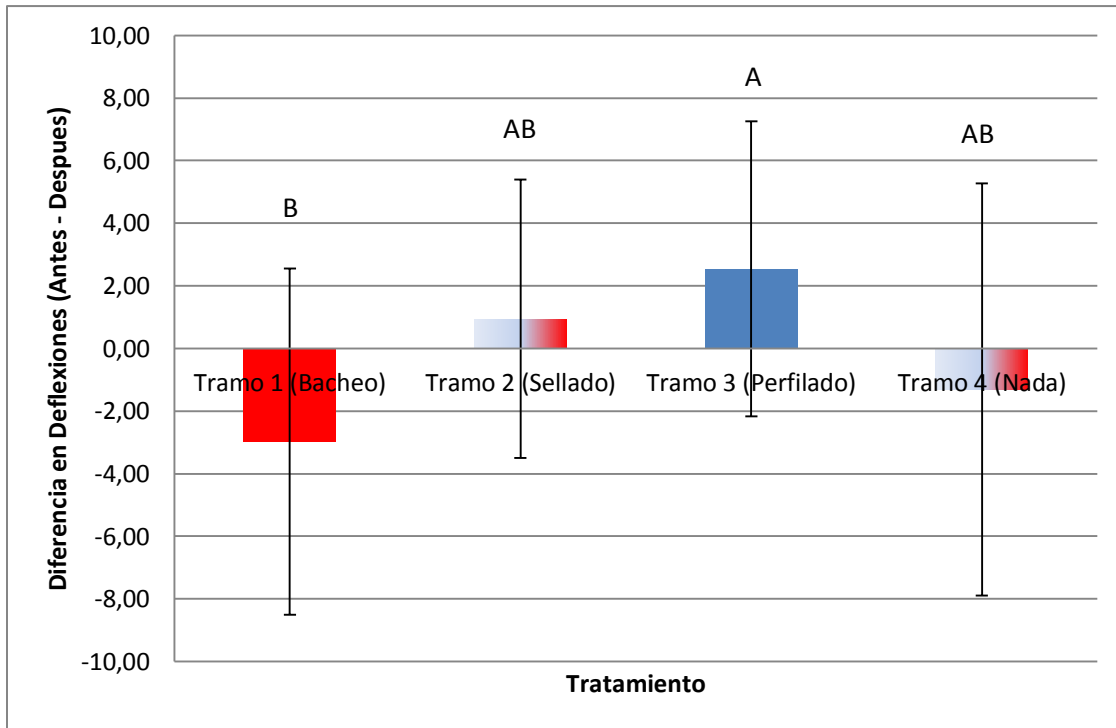


Figura 4.13. Comparación estadística entre las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico ejecutadas en el tramo de investigación para los resultados de las deflexiones medidas con el FWD.

Se logra observar en la Figura 4.13 que la técnica de perfilado de pavimentos más la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor presentó los mejores resultados y los tramos con el sellado de grietas y la sobrecapa asfáltica sola presentan similitudes en comparación con el perfilado de pavimentos y a la vez con la técnica de bacheo formal. Asimismo, se logra determinar que la técnica de perfilado de pavimentos más la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor y la técnica de sellado de grietas más la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor son las únicas que presentaron deltas positivos, es decir, un cambio positivo en las medidas de las deflexiones. Sin embargo, en el Apartado 4.3.4 se detectó que estos deltas positivos no representan mejoras estadísticamente significativas en el paquete estructural del tramo de investigación.

4.4. Objetivo 4. Comparar cada una de las técnicas de mantenimiento vial a partir de los índices de desempeño y su costo económico asociado.

4.4.1. Determinación de costos de cada técnica de mantenimiento vial periódico en el tramo de investigación.

En vista que la investigación se desarrolló acorde con los proyectos de la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del CONAVI mediante la Licitación Pública del CONAVI No. 2009LN-000003-0CV00 para la zona de conservación vial 1-6 San Ramón, en el Cuadro 4.23 se exponen los costos globales calculados para cada una de las cuatro técnicas utilizadas para la elaboración del proyecto.

Cuadro 4.23. Costos globales calculados para cada una de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación seleccionado.

Número	Técnica de mantenimiento vial periódico	Costo (millones de colones)
1	Bacheo Formal + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	29,68
2	Ruteo y sellado de grietas + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	24,70
3	Perfilado de pavimentos + Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	26,24
4	Carpeta asfáltica sola de 5 cm de espesor	24,09

Se evidencia que la técnica de sobrecapa asfáltica sola es la más económica ya que no se incluye un trabajo adicional, al contrario de las otras tres técnicas de mantenimiento vial periódico.

4.4.2. Estimación de los porcentajes de mejora en los indicadores de IRI y FWD para el tramo de investigación.

Utilizando los resultados para las mediciones del IRI, antes y después de la aplicación de las técnicas de mantenimiento vial periódico en cada una de las cuatro secciones del tramo de investigación, a continuación en el Cuadro 4.24 se ilustran los porcentajes de mejora obtenidos para cada técnica aplicada.

Cuadro 4.24. Porcentajes de mejora en el IRI para el tramo de investigación seleccionado.

Técnica mantenimiento vial periódico	% Mejora en el IRI		% Mejora promedio en el IRI
	Palmares-San Ramón	San Ramón-Palmares	
Bacheo + carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	37,25 %	41,30 %	39,28 %
Sellado de grietas + carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	38,18 %	40,32 %	39,25 %
Perfilado + carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	48,28 %	50,00 %	49,14 %
Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor sola	39,58 %	41,51 %	40,55 %

De los análisis anteriores, se concluyó que la técnica de perfilado de pavimentos en conjunto con la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor presenta los mejores porcentajes de mejora en el IRI para ambos carriles del tramo de investigación. Las otras dos técnicas de mantenimiento vial periódico presentan resultados similares.

De la misma forma, en el Cuadro 4.25 se muestran los resultados obtenidos para las mediciones de las deflexiones.

Cuadro 4.25. Porcentajes de mejora en las deflexiones para el tramo de investigación seleccionado.

Técnica de mantenimiento vial	% Mejora en las Deflexiones		% Mejora promedio en Deflexiones
	Palmares - San Ramón	San Ramón - Palmares	
Bacheo + carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	-8,89 %	-12,13 %	-10,51 %
Sellado de grietas + carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	-1,54 %	13,80 %	6,13 %
Perfilado + carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	11,81 %	6,07 %	8,94 %
Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor sola	4,15 %	-16,29 %	-6,07 %

**Los valores negativos reflejan que las mediciones de las deflexiones resultaron mayores después de ejecutadas las actividades del proyecto.*

Se logró observar que no se presentaron mejoras significativas para las mediciones con el deflectómetro de impacto.

4.4.3. Análisis técnico-económico de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación.

Acorde con los resultados evidenciados en los Apartados 4.3.3 y 4.3.4 de este proyecto, los porcentajes de mejora en el IRI sí resultaron ser estadísticamente significativos. En contraste, los valores obtenidos para las deflexiones del pavimento del tramo de investigación no resultaron ser estadísticamente significativos, por lo que se concluye que los porcentajes de mejora en los datos obtenidos son nulos.

Ahora bien, aplicando las ecuaciones (1) y (2), se logró obtener la relación costo-beneficio, con los datos del IRI, para cada una de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico aplicadas. Los resultados obtenidos se ilustran en el Cuadro 4.26.

Cuadro 4.26. Relaciones Costo-Beneficio, con datos del IRI, para cada una de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación seleccionado.

Técnica mantenimiento vial periódico	Relación Beneficio - Costo		Relación Beneficio - Costo promedio
	Palmares-San Ramón	San Ramón-Palmares	
Bacheo + carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	1,26	1,39	1,32
Sellado de grietas + carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	1,55	1,63	1,59
Perfilado + carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	1,84	1,91	1,87
Carpeta asfáltica sola de 5 cm de espesor	1,64	1,72	1,68

Por lo tanto, se evidenció que la técnica de mantenimiento vial periódico más eficiente es el perfilado de pavimentos en conjunto con una sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor, seguido de la aplicación sola de una sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor, luego el sellado de grietas más la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor y por último el bacheo formal más la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor.

De manera similar, utilizando las ecuaciones (1) y (2), se logró obtener la relación costo-beneficio, con los datos de las deflexiones, para cada una de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico aplicadas. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 4.26.

Cuadro 4.27. Relaciones Costo-Beneficio, con datos de las deflexiones, para cada una de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico para el tramo de investigación seleccionado.

Técnica de mantenimiento vial	Relación Beneficio - Costo		Relación Beneficio - Costo Promedio
	Palmares - San Ramón	San Ramón - Palmares	
Bacheo + carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	0,00	0,00	0,00
Sellado de grietas + carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	0,00	0,56	0,28
Perfilado + carpeta asfáltica de 5 cm de espesor	0,45	0,23	0,34
Carpeta asfáltica de 5 cm de espesor sola	0,17	0,00	0,09

Se observa que no se produjeron mejoras en los valores de las deflexiones medidas con el FWD.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como objetivo fundamental de este estudio, se logró identificar la técnica de mantenimiento vial periódico más efectiva para el tramo de investigación seleccionado. Adicionalmente se logró realizar una comparación técnico-económica de cuatro técnicas de mantenimiento vial empleadas a nivel nacional, las cuales se evaluaron con indicadores viales internacionales antes y después de la ejecución de cada una de ellas. Con base en la información estudiada, se llegó a las siguientes conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- La valoración inicial del tramo de investigación determinó un valor promedio del PCI de 88 catalogado como “Satisfactorio” y una Nota de calidad Q de “Q4”, lo cual demostró que el tramo de investigación seleccionado fue apto para la aplicación de técnicas de mantenimiento vial periódico.
- La aplicación de las cuatro técnicas de mantenimiento vial periódico en el tramo de investigación, logró determinar los costos asociados a cada actividad, donde el rango se estableció entre 24,09 millones de colones para la sobrecapa asfáltica delgada de 5 cm de espesor y 29,68 millones de colones para el bacheo más la sobrecapa asfáltica delgada de 5 cm de espesor.
- La valoración del tramo de investigación, después de aplicadas las técnicas de mantenimiento vial periódico, mostró una mejora significativa en la Nota de calidad Q, pasando de un estado inicial de “Q4” a un estado final de “Q2”.
- Las técnicas de mantenimiento vial periódico utilizadas en el tramo de investigación presentaron un aumento en la condición funcional del pavimento, reflejado en una mejora cercana al 40 % en los resultados del IRI.
- Las técnicas de mantenimiento vial periódico utilizadas en el tramo de investigación no presentaron un aumento en la condición estructural del pavimento, reflejado en un porcentaje de mejora menor al 10 % y en algunos casos hasta menores al 0 % en los resultados de las deflexiones medidas con el FWD.
- Para la mejora en la condición funcional de la vía, la técnica de mantenimiento vial más eficiente, para el tramo de investigación, fue el perfilado de pavimentos más la sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor, logrando alcanzar una mejora en el IRI cercana al 50 % y una relación Beneficio - Costo de 1,84 para el carril en sentido Palmares - San Ramón y de 1,91 para el carril en sentido San Ramón – Palmares.

5.2. Recomendaciones

- Elaborar un proyecto de seguimiento para la evaluación del desempeño de las técnicas de mantenimiento vial periódico aplicadas a mediano y largo plazo.
- Identificar, a largo plazo, las curvas de desempeño del proyecto desarrollado en este informe.
- Ejecutar un proyecto para la valoración y evaluación de capas asfálticas con espesores que permitan realizar aportes estructurales a las carreteras nacionales.

- Confeccionar un proyecto de evaluación comparativa de técnicas de rehabilitación de pavimentos flexibles en las rutas nacionales del país.
- Elaborar una norma nacional que permita regular el uso de técnicas de mantenimiento vial periódico sobre las vías nacionales de Costa Rica.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing Materials. (2011). *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index*. Pennsylvania.
- Badilla, G. (2011). *Determinación de la regularidad superficial de pavimentos mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI): Aspectos y consideraciones importantes*. San José, Costa Rica.
- Badilla, G., & Sibaja, D. (2010). *Análisis de la respuesta estructural de pavimentos mediante deflectometría de impacto (FWD) en diferentes épocas del año en Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- Barrantes, R., Valverde, S., Badilla, G., & Loría, G. (2013). *Determinación de la capacidad del Georadar, GPR, dentro de los procedimientos empleados para el análisis de la Red Vial Nacional*. San José, Costa Rica.
- Beltrán, G., & Romo, M. (2012). *Análisis de índices derivados de pruebas de deflexión por impacto para evaluación de pavimentos*.
- Chou, E., Datta, D., & Pulugurta, H. (2008). *Effectiveness of Thin Hot Mix Asphalt Overlay on Pavement Ride and Condition Performance*. University of Toledo, Ohio.
- CONAVI. (2014). *Licitación Pública No. 2009LP-00003-0CV00 Zona 1-6 San Ramónuario de información de tránsito 2013*. Costa Rica.
- Costello, S., Bargh, L., Henning, T., & Hendry, M. (2013). *Proposed New Performance Indicator - Vehicle Operating Cost Index (VOCi) Due to Road Roughness* (Vol. 185).
- Dawson, T. a., Baladi, G. Y., Beach, A. C., Dean, C. M., Haider, S. W., & Chatti, K. (2012). *Impact of Three State Practices on Effectiveness of Hot-Mix Asphalt Overlay*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (Vol. 2292).
- Pértega, S., & Pita, S. (2001). *Métodos paramétricos para la comparación de dos medias, t student*. *Unidad de Epimología Clínica y Bioestadística*.
- Dong, Q., Huang, B., & Jia, X. (2014). *Long-term Cost-effectiveness of Asphalt Pavement Pothole Patching Methods*. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*.
- Hajek, J. J., Phang, W. A., Wrong, G. A., Prakash, A., & Stott, G. M. (1988). *Pavement Condition Index (PCI) for Flexible Pavements*.
- Harrison, F., & Park, H.-A. (2008). *Comparative Performance Measurement: Pavement Smoothness* (Vol. 24).
- Hung, S. S., Rezaei, A., & Harvey, J. T. (2014). *Effects of Milling and Other Repairs on Smoothness of Overlays on Asphalt Pavements*. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*.

- Irfan, S. M., Bilal, M., Labi, S., & Kumares. (2008). *Cost-Effectiveness of Rehabilitation Alternatives - The Case for Flexible Pavements*.
- Kim, M. Y., Kim, D. Y., & Murphy, M. R. (2013). *Improved Method for Evaluating the Pavement Structural Number with Falling Weight Deflectometer Deflections*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
- LANAMMEUCR. (2015). *Informe INF-PITRA-001-2015 Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica Años 2014-2015*. San José, Costa Rica.
- LANAMMEUCR. (2013). *Determinación de la Capacidad del Georadar, Gpr, dentro de los procedimientos empleados para el análisis de la Red Vial Nacional de Costa Rica*. Antigua, Guatemala.
- Loría, G., Barrantes, R., & Sanabria, J. (2013). *Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional pavimentada de Costa Rica Años 2012 -2013*.
- MOPT. (2013). *Anuario de información de tránsito 2013*.
- Park, K., Thomas, N., & Lee, Wayne, K. (2007). *Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition*.
- Pierce, L., Sivaneswaran, N., Willoughby, K., & Mahoney, J. (2004). *Impacts of Smoothness on Hot Mix Asphalt Pavement Performance in Washington State*.
- Shuler, S., & Schmidt, C. (2008). *A Study of the Performance of Three Popular Asphalt Pavement Rehabilitation Strategies*.
- Smith, B. (2014). *Factors Affecting the IRI of Asphalt Overlays*. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*. South Carolina.
- Thenoux, G., & Gaete, R. (1995). *Evaluación Técnica del Pavimento y Comparación de Métodos de Diseño de Capas de Refuerzo Asfáltico*.
- Transportation Research Board. (2006). *Maintenance Management 2006*. South Carolina.
- Transportation Research Board. (2012). *Pavement Management Part 1*.
- Vásquez, L. (2002). *Pavement Index Condition (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras*. Colombia.
- Velazco, A. (2011). *Gestión de caminos no pavimentados*. Perú.
- Wang, Y., Wang, G., & Ahn, Y. H. (2012). *Impact of Climate Conditions on Effectiveness of Asphalt Pavement Preservation Techniques*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Washington.

7. APÉNDICES

Apéndice 1. Fotografías de la evaluación utilizando la metodología PCI.



Foto 1. Medición de grietas transversales y longitudinales.



Foto 2. Medición de grietas transversales y longitudinales.



Foto 3. Medición de cuero de lagarto.



Foto 4. Medición de grietas transversales y longitudinales.



Foto 5. Medición de cuero de lagarto.



Foto 6. Medición de cuero de lagarto.

Apéndice 2. Evaluación del tramo de investigación mediante la metodología del PCI, según norma ASTM D6433.

UM	DETERIORO	SEVERIDAD	AREA UM (m ²)	MEDIDA	UNID	DENSIDAD	VALOR DEDUCIDO	MAX ADMISIBLE VD	# DE ITERACIÓN	VD1	VD2	VD3	SUMA	q	VDC	VCD MÁX	PCI	PCI	
3	GRIETA PARABOLICA	BAJO	3	203,00	1,30	ml	0,64	4	9,82	1	4		4	1	4	4	96		
8	GRIETA PARABOLICA	BAJO	3	213,50	2,80	ml	1,31	6	9,08	1	12	6	18	2	12	14	86		
	DESPRENDIMIENTO AGREGADO	MEDIO	2	213,50	7,65	m ²	3,58	12		2	12	2	14	1	14				
13	GRIETA BORDE	BAJO	3	224,00	1,90	ml	0,85	2	9,36	1	9	2	11	2	6	12	88		
	DESPRENDIMIENTO AGREGADO	MEDIO	2	224,00	3,84	m ²	1,71	9		2	10	2	12	1	12				
18	DESNIVEL CARRIL	BAJO	3	217,00	4,08	m ²	1,88	4	9,17	1	11	4	15	2	10	13	87		
	DESPRENDIMIENTO AGREGADO	MEDIO	2	217,00	5,63	m ²	2,59	11		2	11	2	13	1	13				
23	BACHEO	BAJO	3	224,00	8,3	m ²	2,43	6	9,08	1	10	6	5	21	3	10	14	86	88
	GRIETA BORDE	BAJO	3	224,00	0,20	ml	0,09	0		2	10	6	2	18	2	14			
	GRIETA LONG. Y TRANS.	BAJO	3	224,00	8,40	ml	2,30	5		3	10	2	2	14	1	14			
	CUERO LAGARTO	BAJO	3	224,00	3,92	m ²	0,90	10											
28	GRIETA PARABOLICA	BAJO	3	229,25	0,40	ml	0,17	0	9,91	1	3		3	1	15	15	85		
	DESNIVEL CARRIL	BAJO	3	229,25	0,40	m ²	0,17	3											
33	DESPRENDIMIENTO AGREGADO	MEDIO	2	227,50	5,20	m ²	2,29	10	9,27	1	10		10	1	10	10	90		
	DESNIVEL CARRIL	BAJO	3	227,50	0,16	m ²	0,07	0											
38	GRIETA LONG. Y TRANS.	BAJO	3	227,50	0,70	m ²	0,31	0	9,17	1	11	4	15	2	8	13	87		
	DESNIVEL CARRIL	BAJO	3	227,50	13,75	Unid	6,04	4		2	11	2	13	1	13				
	BACHEO	BAJO	3	227,50	12,35	m ²	5,43	11											
43	DESPRENDIMIENTO AGREGADO	MEDIO	2	192,50	3,45	M2	1,79	10	9,27	1	10		10	1	10	10	90		

Apéndice 3. Datos del IRI antes de la ejecución del proyecto, sentido Palmares – San Ramón.

Resultados:								
Tabla N°1: Medición de IRI Fecha de realización de la prueba: 02/9/2014								
Prueba realizada sobre Carpeta Asfáltica. Sentido Palmares-San Ramón								
Estacionamiento (m)		Descripción	Índice de Regularidad Internacional (IRI) (m/km)				Eventos	
Inicial	Final		Izquierdo	Central	Derecho	MRI (IRI Promedio)	Estación	Evento
0	0	Palmares - San Ramón	0,0	0,0	0,0	0,0		
0	50	Palmares - San Ramón	4,8	4,4	4,1	4,4		
50	100	Palmares - San Ramón	7,0	6,8	7,0	7,0		
100	150	Palmares - San Ramón	4,9	3,8	3,8	4,3		
150	200	Palmares - San Ramón	4,9	4,4	4,6	4,7		
200	250	Palmares - San Ramón	5,4	5,0	5,7	5,6		
250	300	Palmares - San Ramón	6,7	5,8	6,9	6,8		
300	350	Palmares - San Ramón	5,4	4,8	5,0	5,2		
350	400	Palmares - San Ramón	5,0	4,5	5,1	5,0		
400	450	Palmares - San Ramón	5,6	5,4	5,9	5,8	404,2	Cada 400 m aproximadamente
450	500	Palmares - San Ramón	6,0	5,2	5,1	5,5		
500	550	Palmares - San Ramón	6,7	5,8	7,0	6,8		
550	600	Palmares - San Ramón	4,4	3,4	3,3	3,8		
600	650	Palmares - San Ramón	6,0	4,7	4,5	5,2		
650	700	Palmares - San Ramón	5,1	4,8	4,9	5,0		
700	750	Palmares - San Ramón	7,0	5,8	5,0	6,0		
750	800	Palmares - San Ramón	6,5	5,5	5,6	6,1		
800	850	Palmares - San Ramón	6,2	5,6	7,3	6,7	801,2	Cada 400 m aproximadamente
850	900	Palmares - San Ramón	5,8	5,9	6,2	6,0		
900	950	Palmares - San Ramón	9,0	8,6	7,4	8,2		
950	1000	Palmares - San Ramón	4,2	4,2	3,9	4,1		
1.000	1050	Palmares - San Ramón	5,3	5,1	5,0	5,1		
1.050	1100	Palmares - San Ramón	4,8	5,7	6,1	5,4		
1.100	1150	Palmares - San Ramón	4,5	4,8	5,0	4,8		
1.150	1200	Palmares - San Ramón	5,3	5,4	5,2	5,3		
1.200	1250	Palmares - San Ramón	5,5	5,4	6,7	6,1	1242,4	Cada 400 m aproximadamente
1.250	1300	Palmares - San Ramón	4,0	3,8	3,8	3,9		
1.300	1350	Palmares - San Ramón	3,8	4,4	3,6	3,7		
1.350	1400	Palmares - San Ramón	4,6	4,7	5,0	4,8		
1.400	1450	Palmares - San Ramón	5,4	6,1	6,5	6,0		
1.450	1500	Palmares - San Ramón	4,6	4,9	5,4	5,0		
1.500	1550	Palmares - San Ramón	5,2	4,2	4,5	4,9		
1.550	1600	Palmares - San Ramón	3,3	4,0	4,7	4,0		
1.550	1600	Palmares - San Ramón	3,3	4,0	4,7	4,0		

Apéndice 4. Datos del IRI antes de la ejecución del proyecto, sentido San Ramón – Palmares.

Resultados:								
Tabla N°2: Medición de IRI Fecha de realización de la prueba: 02/9/2014								
Prueba realizada sobre Carpeta Asfáltica. Sentido San Ramón-Palmares								
Estacionamiento (m)		Descripción	Índice de Regularidad Internacional (IRI) (m/km)				Eventos	
Inicial	Final		Izquierdo	Central	Derecho	MRI (IRI Promedio)	Estación	Evento
0	50	San Ramón - Palmares	3,8	3,6	3,7	3,8		
50	100	San Ramón - Palmares	4,6	3,9	3,9	4,2		
100	150	San Ramón - Palmares	5,6	5,3	5,4	5,5		
150	200	San Ramón - Palmares	5,4	4,2	4,3	4,8		
200	250	San Ramón - Palmares	4,4	4,1	4,1	4,3		
250	300	San Ramón - Palmares	5,0	4,5	4,3	4,7		
300	350	San Ramón - Palmares	4,4	4,7	4,7	4,5		
350	400	San Ramón - Palmares	5,2	5,4	4,5	4,9		
400	450	San Ramón - Palmares	5,7	7,7	8,4	7,1	405,9	Cada 400 m aproximadamente
450	500	San Ramón - Palmares	4,5	4,4	5,0	4,7		
500	550	San Ramón - Palmares	5,0	4,2	4,1	4,5		
550	600	San Ramón - Palmares	4,9	5,4	6,3	5,6		
600	650	San Ramón - Palmares	4,3	3,1	2,8	3,6		
650	700	San Ramón - Palmares	8,4	8,1	9,0	8,7		
700	750	San Ramón - Palmares	7,3	7,1	10,3	8,8		
750	800	San Ramón - Palmares	6,6	6,4	6,4	6,5		
800	850	San Ramón - Palmares	6,8	7,0	7,1	7,0	802,0	Cada 400 m aproximadamente
850	900	San Ramón - Palmares	6,0	6,0	6,0	6,0		
900	950	San Ramón - Palmares	5,7	5,6	5,2	5,4		
950	1.000	San Ramón - Palmares	6,0	6,7	7,6	6,8		
1.000	1.050	San Ramón - Palmares	5,5	5,6	4,3	4,9		
1.050	1.100	San Ramón - Palmares	5,2	4,6	4,7	5,0		
1.100	1.150	San Ramón - Palmares	6,2	6,6	6,0	6,1		
1.150	1.200	San Ramón - Palmares	6,7	7,3	7,7	7,2		
1.200	1.250	San Ramón - Palmares	5,0	5,9	6,5	5,7	1200,6	Cada 400 m aproximadamente
1.250	1.300	San Ramón - Palmares	4,4	4,2	5,0	4,7		
1.300	1.350	San Ramón - Palmares	5,8	4,7	5,5	5,6		
1.350	1.400	San Ramón - Palmares	5,0	4,6	4,8	4,9		
1.400	1.450	San Ramón - Palmares	4,4	4,2	6,0	5,2		
1.450	1.500	San Ramón - Palmares	5,4	5,1	5,7	5,5		
1.500	1.550	San Ramón - Palmares	7,0	5,6	5,7	6,4		
1.550	1.600	San Ramón - Palmares	4,2	3,5	3,7	4,0		

Apéndice 5. Datos del IRI después de la ejecución del proyecto, sentido Palmares – San Ramón.

Resultados:								
Tabla N°1: Medición de IRI Fecha de realización de la prueba: 01/12/2014								
Prueba realizada sobre Carpeta Asfáltica. Sentido Palmares-San Ramón								
Estacionamiento (m)		Descripción	Índice de Regularidad Internacional (IRI) (m/km)				Eventos	
Inicial	Final		Izquierdo	Central	Derecho	MRI (IRI Promedio)	Estación	Evento
0	50	Palmares - San Ramón	2,7	2,5	2,7	2,7		
50	100	Palmares - San Ramón	4,6	4,5	5,0	4,8		
100	150	Palmares - San Ramón	3,1	2,5	2,6	2,8		
150	200	Palmares - San Ramón	2,8	2,6	3,0	2,9		
200	250	Palmares - San Ramón	3,3	3,6	4,5	3,9		
250	300	Palmares - San Ramón	4,4	4,0	4,1	4,3		
300	350	Palmares - San Ramón	2,6	2,7	3,0	2,8		
350	400	Palmares - San Ramón	2,6	2,1	2,2	2,4		
400	450	Palmares - San Ramón	3,6	3,5	4,2	3,9		
450	500	Palmares - San Ramón	3,2	3,1	3,5	3,3		
500	550	Palmares - San Ramón	3,8	4,3	5,2	4,5		
550	600	Palmares - San Ramón	2,5	2,2	2,3	2,4		
600	650	Palmares - San Ramón	3,7	2,9	2,8	3,2		
650	700	Palmares - San Ramón	2,9	2,7	2,6	2,8		
700	750	Palmares - San Ramón	4,1	3,3	3,2	3,7		
750	800	Palmares - San Ramón	3,4	3,4	3,8	3,6		
800	850	Palmares - San Ramón	3,1	3,1	3,6	3,4		
850	900	Palmares - San Ramón	3,5	3,6	3,9	3,7		
900	950	Palmares - San Ramón	5,3	5,1	5,4	5,4		
950	1000	Palmares - San Ramón	1,8	2,1	2,1	2,0		
1.000	1050	Palmares - San Ramón	3,0	2,8	2,5	2,8		
1.050	1100	Palmares - San Ramón	2,6	3,6	4,2	3,4		
1.100	1150	Palmares - San Ramón	2,9	3,0	2,9	2,9		
1.150	1200	Palmares - San Ramón	2,9	2,5	2,5	2,7		
1.200	1250	Palmares - San Ramón	3,0	3,4	4,7	3,9		
1.250	1300	Palmares - San Ramón	1,8	2,4	2,9	2,4		
1.300	1350	Palmares - San Ramón	2,3	1,8	1,5	1,9		
1.350	1400	Palmares - San Ramón	2,4	2,3	2,7	2,5		
1.400	1450	Palmares - San Ramón	3,5	3,3	3,6	3,5		
1.450	1500	Palmares - San Ramón	3,0	3,0	3,4	3,2		
1.500	1550	Palmares - San Ramón	3,3	2,6	2,7	3,0		
1.550	1600	Palmares - San Ramón	2,4	2,8	3,0	2,7		

Apéndice 6. Datos del IRI después de la ejecución del proyecto, sentido San Ramón – Palmares.

Resultados:								
Tabla N°2: Medición de IRI Fecha de realización de la prueba: 01/12/2014								
Prueba realizada sobre Carpeta Asfáltica. Sentido San Ramón-Palmares								
Estacionamiento (m)		Descripción	Índice de Regularidad Internacional (IRI) (m/km)				Eventos	
Inicial	Final		Izquierdo	Central	Derecho	MRI (IRI Promedio)	Estación	Evento
0	50	San Ramón - Palmares	2,0	2,0	2,4	2,2		
50	100	San Ramón - Palmares	2,8	2,2	2,1	2,5		
100	150	San Ramón - Palmares	4,1	3,7	3,8	4,0		
150	200	San Ramón - Palmares	2,8	2,6	2,8	2,8		
200	250	San Ramón - Palmares	2,6	2,9	3,4	3,0		
250	300	San Ramón - Palmares	2,6	2,4	2,5	2,6		
300	350	San Ramón - Palmares	1,9	2,0	2,6	2,3		
350	400	San Ramón - Palmares	3,1	2,4	2,4	2,8		
400	450	San Ramón - Palmares	4,1	4,6	5,0	4,5		
450	500	San Ramón - Palmares	2,8	2,9	3,1	3,0		
500	550	San Ramón - Palmares	2,5	2,3	2,7	2,6		
550	600	San Ramón - Palmares	3,5	3,7	5,2	4,4		
600	650	San Ramón - Palmares	2,1	1,5	1,5	1,8		
650	700	San Ramón - Palmares	3,7	4,1	5,1	4,4		
700	750	San Ramón - Palmares	4,9	5,3	6,1	5,5		
750	800	San Ramón - Palmares	3,3	2,8	3,0	3,2		
800	850	San Ramón - Palmares	4,7	5,1	5,1	4,9		
850	900	San Ramón - Palmares	3,2	3,5	3,7	3,5		
900	950	San Ramón - Palmares	2,6	2,1	2,2	2,4		
950	1.000	San Ramón - Palmares	4,2	4,0	4,4	4,3		
1.000	1.050	San Ramón - Palmares	3,4	3,0	3,0	3,2		
1.050	1.100	San Ramón - Palmares	2,8	2,0	2,3	2,5		
1.100	1.150	San Ramón - Palmares	3,5	3,1	2,8	3,2		
1.150	1.200	San Ramón - Palmares	3,8	3,8	4,3	4,1		
1.200	1.250	San Ramón - Palmares	3,1	2,8	3,3	3,2		
1.250	1.300	San Ramón - Palmares	2,1	2,2	2,8	2,5		
1.300	1.350	San Ramón - Palmares	3,4	3,1	3,4	3,4		
1.350	1.400	San Ramón - Palmares	2,5	2,3	2,6	2,6		
1.400	1.450	San Ramón - Palmares	3,3	2,4	3,2	3,3		
1.450	1.500	San Ramón - Palmares	3,3	3,4	4,1	3,7		
1.500	1.550	San Ramón - Palmares	3,7	3,2	3,4	3,6		
1.550	1.600	San Ramón - Palmares	1,7	2,0	2,9	2,3		

Apéndice 7. Datos de las Deflexiones (FWD) antes de la ejecución del proyecto, sentido Palmares - San Ramón.

<i>Tabla N°1: Configuración de los Geófonos (distancia en mm)</i>														
			D1	D2	D3	D5	D6	D7	D8	D9				
			0	200	300	600	900	1200	1500	1800				
<i>Tabla N°2: Deflexiones medidas en el sitio Fecha de realización de la prueba: 02/09/2014</i>														
<i>Prueba realizada sobre Calles Asfaltadas. Ruta 135. Palmares-San Ramón</i>														
Ruta	Descripción	Estación	Temp. Pav.	Temp. Aire	Presión	DEFLEXION								
			(°C)	(°C)		mm * E -02								
					KPa	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Fw135a	Palmares - San Ramón	0	41,1	34,7	489,0	21,0	17,4	14,6	11,1	8,6	5,3	3,5	2,5	1,9
Fw135a	Palmares - San Ramón	50	48,5	34,9	479,0	49,9	42,2	35,9	27,7	21,1	13,0	8,4	6,2	4,9
Fw135a	Palmares - San Ramón	100	49,6	35,1	485,0	22,9	17,9	14,8	11,4	9,2	6,5	4,9	3,8	3,2
Fw135a	Palmares - San Ramón	150	48,7	35,4	489,0	34,8	26,9	22,5	17,7	13,9	9,0	6,4	4,9	3,8
Fw135a	Palmares - San Ramón	200	50,1	35,5	488,0	28,9	23,2	19,4	15,0	11,5	7,2	5,1	4,0	3,3
Fw135a	Palmares - San Ramón	250	50,9	35,7	493,0	29,6	24,7	21,8	18,0	14,8	10,4	7,6	5,8	4,7
Fw135a	Palmares - San Ramón	300	50,1	35,8	482,0	26,8	21,8	18,8	14,9	11,7	7,8	5,6	4,3	3,6
Fw135a	Palmares - San Ramón	350	46,8	35,9	491,0	30,6	21,7	17,6	13,6	10,8	7,4	5,5	4,2	3,2
Fw135a	Palmares - San Ramón	400	50,6	36,0	485,0	43,9	30,9	22,0	14,2	10,2	6,6	4,8	3,7	3,0
Fw135a	Palmares - San Ramón	450	49,0	36,2	491,0	18,2	13,8	11,7	9,5	7,7	5,3	4,2	3,5	2,8
Fw135a	Palmares - San Ramón	500	50,3	36,3	474,0	51,5	40,6	32,8	24,2	17,8	10,6	7,3	5,6	4,6
Fw135a	Palmares - San Ramón	550	47,1	36,4	481,0	36,7	25,6	20,6	14,7	10,3	5,8	4,2	3,2	2,8
Fw135a	Palmares - San Ramón	600	48,1	36,6	472,0	41,4	31,8	26,1	19,1	13,9	7,9	5,3	4,2	3,3
Fw135a	Palmares - San Ramón	650	28,4	36,5	479,0	27,1	21,3	17,5	13,2	9,9	6,2	4,3	3,2	2,6
Fw135a	Palmares - San Ramón	700	41,5	36,4	490,0	39,4	32,7	27,7	21,2	15,4	7,9	3,8	2,5	1,9
Fw135a	Palmares - San Ramón	750	46,0	36,5	495,0	22,5	18,8	16,2	13,1	10,4	7,0	5,0	3,8	3,0
Fw135a	Palmares - San Ramón	800	49,0	36,3	480,0	29,3	23,3	19,4	14,8	11,6	7,4	5,4	4,3	3,6
Fw135a	Palmares - San Ramón	850	47,1	36,2	474,0	45,0	37,6	32,5	26,0	20,5	12,9	8,5	6,1	4,7
Fw135a	Palmares - San Ramón	900	45,6	36,2	498,0	14,9	11,1	9,5	7,7	6,5	4,6	3,6	2,6	2,2
Fw135a	Palmares - San Ramón	950	43,6	36,0	466,0	58,2	48,8	40,1	30,1	21,9	12,8	8,3	6,1	4,8
Fw135a	Palmares - San Ramón	1000	46,9	36,2	485,0	24,4	17,4	13,7	9,9	7,7	5,2	3,6	2,9	2,2
Fw135a	Palmares - San Ramón	1050	45,7	36,2	465,0	31,5	23,1	18,1	12,8	9,3	5,8	3,9	3,0	2,4
Fw135a	Palmares - San Ramón	1100	43,0	36,2	486,0	18,8	14,2	12,3	10,2	8,9	6,5	4,7	3,7	2,7
Fw135a	Palmares - San Ramón	1150	46,8	36,3	468,0	33,3	25,0	19,6	14,0	10,0	6,1	4,5	3,4	2,6
Fw135a	Palmares - San Ramón	1200	47,6	36,2	469,0	58,9	46,1	37,6	27,0	19,4	11,5	8,1	6,1	4,8
Fw135a	Palmares - San Ramón	1250	50,0	36,2	469,0	40,6	30,2	24,7	18,6	14,2	9,1	6,4	4,8	3,9
Fw135a	Palmares - San Ramón	1300	48,8	36,3	486,0	39,5	27,4	19,8	13,7	10,6	7,6	5,9	4,6	3,7
Fw135a	Palmares - San Ramón	1350	45,4	36,2	506,0	19,2	12,4	9,7	7,2	5,8	4,2	3,2	2,9	2,2
Fw135a	Palmares - San Ramón	1400	28,3	36,2	489,0	14,4	11,5	10,4	9,1	7,9	5,9	4,3	3,1	2,3
Fw135a	Palmares - San Ramón	1450	34,3	36,2	493,0	16,7	11,7	9,8	7,9	6,6	4,8	3,7	2,9	2,3
Fw135a	Palmares - San Ramón	1500	37,6	36,0	484,0	22,1	14,9	11,0	7,3	5,1	3,0	2,0	1,6	1,3
Fw135a	Palmares - San Ramón	1550	33,9	35,8	476,0	31,2	24,4	19,7	14,3	10,4	5,8	3,7	2,7	2,1
Fw135a	Palmares - San Ramón	1600	37,3	35,7	489,0	20,9	16,3	13,5	10,5	8,3	5,6	4,0	3,1	2,4

Apéndice 8. Datos de las Deflexiones (FWD) antes de la ejecución del proyecto, sentido San Ramón – Palmares.

<i>Tabla N°3: Configuración de los Geófonos (distancia en mm)</i>														
			D1	D2	D3	D5	D6	D7	D8	D9				
			0	200	300	600	900	1200	1500	1800				
<i>Tabla N°4: Deflexiones medidas en el sitio Fecha de realización de la prueba: 02/09/2014</i>														
<i>Prueba realizada sobre Calles Asfaltadas. Ruta 135. San Ramón-Palmares</i>														
Ruta	Descripción	Estación	Temp. Pav. (°C)	Temp. Aire (°C)	Presión KPa	DEFLEXION mm * E -02								
						D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Fw135b	San Ramón - Palmares	1575	38,2	33,7	463	31,6	22,6	17,5	12,1	8,8	5,2	3,4	2,4	1,9
Fw135b	San Ramón - Palmares	1525	42,2	33,5	467	33,5	24,2	19,9	14,8	10,6	6,2	4,3	3,3	2,6
Fw135b	San Ramón - Palmares	1475	38,0	33,4	492	24,7	17,3	13,2	8,9	6,1	3,7	2,5	2,0	1,7
Fw135b	San Ramón - Palmares	1425	29,2	33,1	513	9,8	7,9	7,1	6,4	5,5	4,3	3,4	2,7	2,3
Fw135b	San Ramón - Palmares	1375	39,4	32,8	485	20,7	14,5	10,9	7,8	6,3	4,5	3,4	2,6	2,1
Fw135b	San Ramón - Palmares	1325	40,7	32,7	496	16,8	10,1	7,3	6,0	5,1	3,8	3,0	2,4	1,9
Fw135b	San Ramón - Palmares	1275	42,3	32,6	486	18,5	13,2	10,5	7,8	6,0	4,1	3,1	2,6	2,2
Fw135b	San Ramón - Palmares	1225	35,8	32,5	506	16,4	12,9	11,0	9,3	8,0	6,2	4,9	4,0	3,3
Fw135b	San Ramón - Palmares	1175	41,3	32,4	502	19,9	16,7	15,0	12,7	10,9	7,7	5,6	4,4	3,5
Fw135b	San Ramón - Palmares	1125	37,8	32,3	499	23,2	17,6	14,8	12,1	10,1	7,2	5,3	4,0	3,2
Fw135b	San Ramón - Palmares	1075	38,9	32,2	484	26,6	20,0	16,0	11,9	9,3	6,5	4,7	3,5	2,8
Fw135b	San Ramón - Palmares	1025	38,8	32,1	481	26,6	21,2	18,2	13,8	11,2	7,1	5,1	3,9	3,2
Fw135b	San Ramón - Palmares	975	36,9	32,0	492	22,8	16,6	13,0	9,8	7,7	5,1	3,6	2,6	1,9
Fw135b	San Ramón - Palmares	925	39,6	32,0	492	24,6	17,6	14,0	10,4	8,4	5,9	4,2	3,1	2,4
Fw135b	San Ramón - Palmares	875	37,4	31,9	498	16,1	13,3	11,5	9,7	8,2	6,0	4,4	3,4	2,8
Fw135b	San Ramón - Palmares	825	39,4	31,7	489	24,7	17,9	14,0	10,6	8,7	6,5	5,0	4,0	3,0
Fw135b	San Ramón - Palmares	775	41,2	31,5	491	28,0	19,8	15,4	11,6	9,3	6,5	4,7	3,5	2,7
Fw135b	San Ramón - Palmares	724	40,8	31,5	489	11,9	8,8	7,3	5,8	4,7	3,3	2,2	2,4	1,8
Fw135b	San Ramón - Palmares	675	31,3	31,5	490	25,0	19,3	15,8	11,8	9,3	6,1	4,5	3,6	3,0
Fw135b	San Ramón - Palmares	625	41,0	31,2	483	19,4	16,1	13,9	11,0	8,7	5,6	4,0	3,0	2,4
Fw135b	San Ramón - Palmares	575	40,5	31,2	470	43,6	34,5	27,3	20,1	14,3	7,5	4,5	3,2	2,6
Fw135b	San Ramón - Palmares	525	42,9	31,2	481	32,8	26,6	21,3	15,5	10,9	5,6	3,2	2,4	2,0
Fw135b	San Ramón - Palmares	475	43,9	31,3	494	20,3	13,6	10,8	9,1	7,9	5,9	4,7	3,8	3,2
Fw135b	San Ramón - Palmares	425	43,8	31,3	487	19,5	14,8	12,1	10,2	8,7	6,4	4,8	4,4	3,1
Fw135b	San Ramón - Palmares	375	42,0	31,3	490	21,5	17,3	14,4	11,1	8,3	5,3	3,7	2,8	2,3
Fw135b	San Ramón - Palmares	325	44,0	31,3	480	30,6	24,0	19,7	15,1	11,7	7,7	5,3	3,9	2,9
Fw135b	San Ramón - Palmares	275	45,3	31,3	487	25,8	16,8	12,9	9,5	7,8	5,8	4,6	3,8	3,1
Fw135b	San Ramón - Palmares	225	45,5	31,4	491	21,3	17,2	14,8	11,7	9,5	5,9	4,0	2,8	2,1
Fw135b	San Ramón - Palmares	175	45,8	31,5	504	16,1	12,6	10,9	8,9	7,5	5,5	4,2	3,3	2,8
Fw135b	San Ramón - Palmares	125	41,0	31,7	501	15,0	11,2	9,4	7,6	6,4	4,5	3,4	2,5	2,0
Fw135b	San Ramón - Palmares	75	47,3	31,9	495	18,6	14,5	12,2	10,0	8,3	6,1	4,6	3,5	2,8
Fw135b	San Ramón - Palmares	25	47,3	32,1	481	18,5	14,4	11,8	9,0	7,7	5,6	4,4	3,5	2,9
Fw135b	San Ramón - Palmares	0	48,6	32,2	486	28,2	21,5	16,8	11,6	8,4	4,3	2,4	2,1	1,8

Apéndice 9. Datos de las Deflexiones (FWD) después de la ejecución del proyecto, sentido Palmares - San Ramón.

<i>Tabla N°1: Configuración de los Geófonos (distancia en mm)</i>														
			D1	D2	D3	D5	D6	D7	D8	D9				
			0	200	300	600	900	1200	1500	1800				
<i>Tabla N°2: Deflexiones medidas en el sitio Fecha de realización de la prueba: 24/11/2014</i>														
<i>Prueba realizada sobre Calles Asfaltadas. Ruta 135. Palmares-San Ramón</i>														
Ruta	Descripción	Estación	Temp. Pav.	Temp. Aire	Presión	DEFLEXION								
			(°C)	(°C)	KPa	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Fw135a	Palmares - San Ramón	0	46,7	34,7	521,0	38,5	32,6	27,7	21,5	16,2	9,3	5,5	3,8	3,0
Fw135a	Palmares - San Ramón	50	22,8	34,7	562,0	47,2	40,6	36,2	29,6	23,9	15,2	10,1	7,2	5,6
Fw135a	Palmares - San Ramón	100	22,9	34,6	566,0	29,0	23,5	19,7	15,0	11,8	7,4	5,4	4,3	3,5
Fw135a	Palmares - San Ramón	150	33,2	34,3	568,0	37,6	30,7	26,1	20,4	15,8	10,0	6,8	5,1	4,1
Fw135a	Palmares - San Ramón	200	51,3	34,2	565,0	39,1	32,0	26,1	20,5	15,9	10,1	7,1	5,3	4,2
Fw135a	Palmares - San Ramón	250	49,2	34,3	568,0	35,9	29,5	25,9	21,5	17,8	12,6	9,3	7,2	5,7
Fw135a	Palmares - San Ramón	300	51,4	34,3	563,0	40,5	34,6	30,6	24,7	19,7	12,8	8,7	6,5	5,2
Fw135a	Palmares - San Ramón	350	51,1	34,4	564,0	29,3	21,5	18,1	14,5	12,0	8,7	6,6	4,9	3,8
Fw135a	Palmares - San Ramón	400	50,6	34,3	568,0	51,8	42,9	36,9	28,6	21,3	12,2	8,0	5,9	4,6
Fw135a	Palmares - San Ramón	450	51,3	34,3	562,0	21,5	17,4	15,2	12,3	9,9	6,9	5,1	3,8	3,0
Fw135a	Palmares - San Ramón	500	50,5	34,4	563,0	59,9	46,9	39,0	29,2	21,7	13,1	9,3	7,2	5,8
Fw135a	Palmares - San Ramón	550	29,6	34,4	567,0	41,5	32,8	26,3	19,6	14,3	8,1	5,4	4,2	3,5
Fw135a	Palmares - San Ramón	600	44,9	34,4	565,0	48,3	40,7	34,9	27,0	20,5	12,4	8,5	6,5	5,3
Fw135a	Palmares - San Ramón	650	23,6	34,4	570,0	32,7	27,5	23,9	19,3	15,2	9,8	6,9	5,3	4,2
Fw135a	Palmares - San Ramón	700	32,8	34,4	569,0	32,3	29,0	24,9	19,5	15,1	9,0	5,2	3,1	2,1
Fw135a	Palmares - San Ramón	750	52,7	34,4	566,0	33,0	27,3	23,9	19,2	15,2	9,9	6,9	5,2	4,1
Fw135a	Palmares - San Ramón	800	50,5	34,4	564,0	32,0	26,5	22,9	18,4	14,6	9,9	7,0	5,1	4,0
Fw135a	Palmares - San Ramón	850	31,7	34,4	564,0	47,6	40,6	36,0	29,7	24,0	15,9	10,8	7,8	5,9
Fw135a	Palmares - San Ramón	900	44,9	34,4	564,0	14,0	10,7	9,3	7,8	6,5	4,7	3,6	2,8	2,3
Fw135a	Palmares - San Ramón	950	24,3	34,4	568,0	43,4	38,2	34,5	29,1	23,4	14,8	9,9	7,1	5,5
Fw135a	Palmares - San Ramón	1000	29,0	34,4	565,0	22,7	17,5	14,5	11,2	8,7	5,8	4,1	3,1	2,5
Fw135a	Palmares - San Ramón	1050	41,2	34,4	570,0	31,2	26,5	22,4	17,0	12,7	7,6	5,2	3,9	3,1
Fw135a	Palmares - San Ramón	1100	23,3	34,4	566,0	19,0	15,4	13,6	11,3	9,6	7,0	5,3	4,0	3,1
Fw135a	Palmares - San Ramón	1150	47,1	34,4	563,0	35,6	27,9	22,7	17,0	12,9	8,2	5,5	4,0	3,2
Fw135a	Palmares - San Ramón	1200	47,4	34,4	565,0	67,6	51,8	41,9	30,0	21,9	13,1	9,3	7,1	5,7
Fw135a	Palmares - San Ramón	1250	52,4	34,5	564,0	41,7	32,7	27,4	21,5	17,0	11,5	8,4	6,5	5,1
Fw135a	Palmares - San Ramón	1300	45,3	34,7	565,0	28,7	21,3	17,2	13,1	10,7	8,2	6,6	5,3	4,3
Fw135a	Palmares - San Ramón	1350	51,5	34,7	565,0	31,1	22,8	18,2	13,2	9,8	6,3	4,5	3,5	2,8
Fw135a	Palmares - San Ramón	1400	50,6	34,8	565,0	20,3	15,6	13,9	12,1	10,3	7,5	5,5	4,0	3,0
Fw135a	Palmares - San Ramón	1450	45,0	34,7	564,0	16,3	12,3	10,5	8,5	7,0	5,1	4,0	3,1	2,6
Fw135a	Palmares - San Ramón	1500	21,0	34,8	563,0	20,4	15,0	11,9	8,6	6,3	3,6	2,5	1,9	1,5
Fw135a	Palmares - San Ramón	1550	31,6	34,6	565,0	32,8	26,9	22,2	16,4	11,9	7,0	4,6	3,3	2,6
Fw135a	Palmares - San Ramón	1600	20,1	34,6	565,0	23,8	19,6	16,5	12,9	10,1	6,7	4,7	3,5	2,8

Apéndice 10. Datos de las Deflexiones (FWD) después de la ejecución del proyecto, sentido San Ramón – Palmares.

<i>Tabla N°3: Configuración de los Geófonos (distancia en mm)</i>														
			D1	D2	D3	D5	D6	D7	D8	D9				
			0	200	300	600	900	1200	1500	1800				
<i>Tabla N°4: Deflexiones medidas en el sitio Fecha de realización de la prueba: 24/11/2014</i>														
<i>Prueba realizada sobre Calles Asfaltadas. Ruta 135. San Ramón-Palmares</i>														
Ruta	Descripción	Estación	Temp. Pav. (°C)	Temp. Aire (°C)	Presión KPa	DEFLEXION								
						mm * E -02								
						D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Fw135b	San Ramón - Palmares	1575	34,0	34,7	565	34,6	26,8	21,9	16,3	12,1	7,1	4,6	3,4	2,6
Fw135b	San Ramón - Palmares	1525	46,7	34,5	566	35,3	28,3	23,9	18,6	14,0	8,4	5,7	4,4	3,5
Fw135b	San Ramón - Palmares	1475	46,2	34,4	566	22,6	16,9	13,8	10,0	7,3	4,3	3,1	2,4	1,9
Fw135b	San Ramón - Palmares	1425	45,6	34,5	566	14,8	11,6	10,6	9,1	7,8	5,8	4,4	3,5	2,7
Fw135b	San Ramón - Palmares	1375	41,8	34,4	569	35,9	24,7	17,8	12,1	9,3	6,6	4,7	3,5	2,8
Fw135b	San Ramón - Palmares	1325	30,2	34,4	571	17,8	13,4	11,5	9,5	8,0	6,0	4,6	3,6	2,9
Fw135b	San Ramón - Palmares	1275	41,8	34,3	566	29,6	20,7	16,4	12,0	9,3	6,6	4,9	3,8	3,0
Fw135b	San Ramón - Palmares	1225	58,8	34,3	566	29,6	22,5	18,2	14,0	11,3	8,4	6,5	5,1	4,2
Fw135b	San Ramón - Palmares	1175	54,9	34,3	567	27,6	22,8	20,6	17,4	14,6	10,2	7,2	5,2	4,1
Fw135b	San Ramón - Palmares	1125	57,1	34,4	566	24,9	19,6	17,0	14,3	11,8	8,6	6,6	5,0	4,0
Fw135b	San Ramón - Palmares	1075	31,7	34,5	569	21,9	17,2	14,4	11,6	9,5	6,7	4,9	3,9	3,0
Fw135b	San Ramón - Palmares	1025	56,3	34,6	568	32,0	25,7	22,3	17,6	14,3	9,4	7,0	5,5	4,4
Fw135b	San Ramón - Palmares	975	54,3	34,7	570	24,1	18,4	15,1	11,4	8,7	5,4	3,8	2,8	2,2
Fw135b	San Ramón - Palmares	925	56,7	34,8	566	23,1	15,4	12,5	9,9	8,2	5,7	4,4	3,3	2,5
Fw135b	San Ramón - Palmares	875	53,2	35,0	566	21,3	16,6	14,9	12,4	10,4	7,6	5,7	4,2	3,3
Fw135b	San Ramón - Palmares	825	58,7	35,1	567	22,8	18,1	15,7	12,7	10,4	7,4	5,6	4,3	3,4
Fw135b	San Ramón - Palmares	775	47,4	35,1	565	38,1	28,5	22,8	16,6	13,3	9,1	6,6	4,9	3,8
Fw135b	San Ramón - Palmares	725	60,4	35,1	564	14,6	10,9	9,3	7,5	6,0	4,1	3,1	2,4	1,7
Fw135b	San Ramón - Palmares	675	48,4	35,1	567	30,9	25,9	22,3	18,0	14,1	9,2	6,4	4,8	3,9
Fw135b	San Ramón - Palmares	625	59,9	35,2	574	28,9	22,5	19,4	15,1	11,5	7,4	5,4	4,1	3,2
Fw135b	San Ramón - Palmares	575	22,5	35,2	570	35,8	30,7	25,7	21,2	16,6	9,9	6,1	4,0	3,0
Fw135b	San Ramón - Palmares	525	30,2	35,0	567	25,7	21,4	18,4	14,6	11,3	6,9	4,4	3,1	2,5
Fw135b	San Ramón - Palmares	475	32,1	34,9	564	15,1	12,2	10,6	9,3	8,3	6,6	5,4	4,4	3,7
Fw135b	San Ramón - Palmares	425	31,6	34,9	566	20,2	16,9	14,7	12,3	10,3	7,4	5,5	4,3	3,5
Fw135b	San Ramón - Palmares	375	50,5	34,8	565	29,3	22,0	18,4	14,6	11,6	7,8	5,5	4,2	3,4
Fw135b	San Ramón - Palmares	325	52,8	34,7	565	44,8	34,9	28,1	21,9	17,2	11,0	7,4	5,2	3,9
Fw135b	San Ramón - Palmares	275	26,4	34,6	569	21,9	16,9	14,6	11,9	9,9	7,2	5,4	4,3	3,5
Fw135b	San Ramón - Palmares	225	44,6	34,7	565	27,1	20,6	17,2	13,7	10,5	7,5	5,3	3,9	3,0
Fw135b	San Ramón - Palmares	175	43,0	34,6	571	18,6	15,0	12,9	10,5	8,6	6,2	4,7	3,7	3,1
Fw135b	San Ramón - Palmares	125	33,0	34,5	568	17,4	14,6	12,6	10,2	8,0	5,2	3,8	2,6	2,2
Fw135b	San Ramón - Palmares	75	24,7	34,3	567	23,8	19,3	16,3	12,7	10,0	6,8	4,9	3,7	2,9
Fw135b	San Ramón - Palmares	25	30,7	34,1	567	33,4	28,1	24,6	19,6	15,4	10,1	7,1	5,4	4,3
Fw135b	San Ramón - Palmares	0	40,6	34,0	569	42,5	34,4	28,6	21,1	15,3	7,8	4,4	3,2	2,7

Apéndice 11. Datos del análisis estadístico del IRI (ANOVA + Tukey).

Δ IRI			
Tramo 1 (Bacheo)	Tramo 2 (Sellado)	Tramo 3 (Perfilado)	Tramo 4 (Nada)
1,72	1,9	3,35	2,26
1,1	2,21	2,89	1,57
1,51	2,35	4,66	1,81
1,81	1,4	2,09	2,28
1,65	1,99	2,36	2,44
2,53	2,22	2	1,79
2,42	2,37	1,87	1,86
2,64	2,49	2,56	1,28
1,59	2,51	3,66	2,5
1,76	1,75	2,53	2,24
1,53	1,91	3,05	2,27
2,03	1,21	2,51	2,31
1,32	1,76	1,69	1,96
2,12	4,3	2,42	1,85
2,27	3,32	2,97	2,8
2,11	3,29	3,15	1,67

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Tramo 1 (Bacheo)	16	30,11	1,881875	0,19600291		
Tramo 2 (Sellado)	16	36,98	2,31125	0,608065		
Tramo 3 (Perfilado)	16	43,76	2,735	0,56332		
Tramo 4 (Nada)	16	32,89	2,055625	0,15618625		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6,59533125	3	2,19844375	5,77180631	0,00155079	2,758078296
Dentro de los grupos	22,8536125	60	0,380893542			
Total	29,44894375	63				

n	α = 0,05														
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
2	6,08	8,33	9,80	10,88	11,73	12,43	13,03	13,54	13,99	14,40	14,76	15,09	15,39	15,67	
3	4,50	5,91	6,82	7,50	8,04	8,48	8,85	9,18	9,46	9,72	9,95	10,15	10,35	10,52	
4	3,93	5,04	5,76	6,29	6,71	7,05	7,35	7,60	7,83	8,03	8,21	8,37	8,52	8,66	
5	3,64	4,60	5,22	5,67	6,03	6,33	6,58	6,80	6,99	7,17	7,32	7,47	7,60	7,72	
6	3,46	4,34	4,90	5,30	5,63	5,90	6,12	6,32	6,49	6,65	6,79	6,92	7,03	7,14	
7	3,34	4,16	4,68	5,06	5,36	5,61	5,82	6,00	6,16	6,30	6,43	6,55	6,66	6,76	
8	3,26	4,04	4,53	4,89	5,17	5,40	5,60	5,77	5,92	6,05	6,18	6,29	6,39	6,48	
9	3,20	3,95	4,41	4,76	5,02	5,24	5,43	5,59	5,74	5,87	5,98	6,09	6,19	6,28	
10	3,15	3,88	4,33	4,65	4,91	5,12	5,30	5,46	5,60	5,72	5,83	5,93	6,03	6,11	
11	3,11	3,82	4,26	4,57	4,82	5,03	5,20	5,35	5,49	5,61	5,71	5,81	5,90	5,98	
12	3,08	3,77	4,20	4,51	4,75	4,95	5,12	5,27	5,39	5,51	5,61	5,71	5,80	5,88	
13	3,06	3,73	4,15	4,45	4,69	4,88	5,05	5,19	5,32	5,43	5,53	5,63	5,71	5,79	
14	3,03	3,70	4,11	4,41	4,64	4,83	4,99	5,13	5,25	5,36	5,46	5,55	5,64	5,71	
15	3,01	3,67	4,08	4,37	4,59	4,78	4,94	5,08	5,20	5,31	5,40	5,49	5,57	5,65	
16	3,00	3,65	4,05	4,33	4,56	4,74	4,90	5,03	5,15	5,26	5,35	5,44	5,52	5,59	
17	2,98	3,63	4,02	4,30	4,52	4,70	4,86	4,99	5,11	5,21	5,31	5,39	5,47	5,54	
18	2,97	3,61	4,00	4,28	4,49	4,67	4,82	4,96	5,07	5,17	5,27	5,35	5,43	5,50	
19	2,96	3,59	3,98	4,25	4,47	4,65	4,79	4,92	5,04	5,14	5,23	5,31	5,39	5,46	
20	2,95	3,58	3,96	4,23	4,45	4,62	4,77	4,90	5,01	5,11	5,20	5,28	5,36	5,43	
21	2,94	3,56	3,94	4,21	4,42	4,60	4,74	4,87	4,98	5,08	5,17	5,25	5,33	5,40	
22	2,93	3,55	3,93	4,20	4,41	4,58	4,72	4,85	4,96	5,06	5,14	5,23	5,30	5,37	
23	2,93	3,54	3,91	4,18	4,39	4,56	4,70	4,83	4,94	5,03	5,12	5,20	5,27	5,34	
24	2,92	3,53	3,90	4,17	4,37	4,54	4,68	4,81	4,92	5,01	5,10	5,18	5,25	5,32	
25	2,91	3,52	3,89	4,15	4,36	4,53	4,67	4,79	4,90	4,99	5,08	5,16	5,23	5,30	
26	2,91	3,51	3,88	4,14	4,35	4,51	4,65	4,77	4,88	4,98	5,06	5,14	5,21	5,28	
27	2,90	3,51	3,87	4,13	4,33	4,50	4,64	4,76	4,86	4,96	5,04	5,12	5,19	5,26	
28	2,90	3,50	3,86	4,12	4,32	4,49	4,62	4,74	4,85	4,94	5,03	5,11	5,18	5,24	
29	2,89	3,49	3,85	4,11	4,31	4,47	4,61	4,73	4,84	4,93	5,01	5,09	5,16	5,23	
30	2,89	3,49	3,85	4,10	4,30	4,46	4,60	4,72	4,82	4,92	5,00	5,08	5,15	5,21	
31	2,88	3,48	3,84	4,09	4,29	4,45	4,59	4,71	4,81	4,90	4,99	5,06	5,13	5,20	
32	2,88	3,48	3,83	4,09	4,28	4,45	4,58	4,70	4,80	4,89	4,98	5,05	5,12	5,18	
33	2,88	3,47	3,83	4,08	4,28	4,44	4,57	4,69	4,79	4,88	4,97	5,04	5,11	5,17	
34	2,87	3,47	3,82	4,07	4,27	4,43	4,56	4,68	4,78	4,87	4,96	5,03	5,10	5,16	
35	2,87	3,46	3,81	4,07	4,26	4,42	4,56	4,67	4,77	4,86	4,95	5,02	5,09	5,15	
36	2,87	3,46	3,81	4,06	4,25	4,41	4,55	4,66	4,76	4,85	4,94	5,01	5,08	5,14	
37	2,87	3,45	3,80	4,05	4,25	4,41	4,54	4,66	4,76	4,85	4,93	5,00	5,07	5,13	
38	2,86	3,45	3,80	4,05	4,24	4,40	4,53	4,65	4,75	4,84	4,92	4,99	5,06	5,12	
39	2,86	3,45	3,79	4,04	4,24	4,39	4,53	4,64	4,74	4,83	4,91	4,98	5,05	5,11	
40	2,86	3,44	3,79	4,04	4,23	4,39	4,52	4,63	4,73	4,82	4,90	4,98	5,04	5,11	
41	2,86	3,44	3,79	4,03	4,23	4,38	4,51	4,63	4,73	4,82	4,90	4,97	5,04	5,10	
42	2,85	3,44	3,78	4,03	4,22	4,38	4,51	4,62	4,72	4,81	4,89	4,96	5,03	5,09	
43	2,85	3,43	3,78	4,03	4,22	4,37	4,50	4,62	4,72	4,80	4,88	4,96	5,02	5,08	
44	2,85	3,43	3,78	4,02	4,21	4,37	4,50	4,61	4,71	4,80	4,88	4,95	5,02	5,08	
45	2,85	3,43	3,77	4,02	4,21	4,36	4,49	4,61	4,70	4,79	4,87	4,94	5,01	5,07	
46	2,85	3,42	3,77	4,01	4,20	4,36	4,49	4,60	4,70	4,79	4,87	4,94	5,00	5,06	
47	2,85	3,42	3,77	4,01	4,20	4,36	4,48	4,60	4,69	4,78	4,86	4,93	5,00	5,06	
48	2,84	3,42	3,76	4,01	4,20	4,35	4,48	4,59	4,69	4,78	4,86	4,93	4,99	5,05	

PRUEBA DE TUKEY		
Paso 1. Hipótesis estadística		
Ho: $\mu_3 = \mu_1$	Ha: $\mu_3 \neq \mu_1$	
Paso 2. Nivel de significancia		
$\alpha =$	0,05	
Paso 3. Estadístico calculado Dc		
Dc = $X_{t1} - X_{t3} =$	0,853125	
Paso 4. Estadístico de prueba		
$q_{\alpha} (p, fe) =$	3,74	
Paso 5. Análisis de resultados		
Rechaza hipótesis nula		
Dc > W	Si hay diferencia entre las medias T3 es mejor que T1	

$$S_y = \sqrt{\frac{CME}{r_i}}$$

Error estándar para las medias $S_y =$ 0,15429
 $W = q_{\alpha} (p, fe) * S_y =$ 0,5770

Apéndice 12. Datos del análisis estadístico del FWD (ANOVA + Tukey).

Δ FWD				Análisis de varianza de un factor					
Tramo 1 (Bacheo)	Tramo 2 (Sellado)	Tramo 3 (Perfilado)	Tramo 4 (Nada)						
-12,61375	0,4264	2,5233	-0,24						
1,716	0,2918	-0,4762	6,3232						
-6,64	1,1508	2,5776	14,3092						
-0,951	-3,6044	15,03675	-6,6313						
-3,77685	-1,1616	2,3407	-2,56545						
-0,8965	-5,64	3,428	2,3484						
-6,865	8,706	-0,6106	0,9453						
6,1645	-4,57	2,13625	-0,19265						
-0,8858	3,3	0,5676	-6,075						
2,55375	5,68685	-2,07375	4,149						
4,95	0,8222	-3,1208	-2,568						
-3,075	3,2714	7,1042	-0,4318						
-11,641	6,14	8,1276	-1,5885						
-0,4757	-1,1292	5,947	-4,84345						
-8,153	6,7096	0,2099	-13,6428						
-7,0061	-5,2825	-2,94045	-10,109						

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Tramo 1 (Bacheo)	16	-47,59545	-2,974715625	30,54802894		
Tramo 2 (Sellado)	16	15,11735	0,944834375	19,77629517		
Tramo 3 (Perfilado)	16	40,7771	2,54856875	22,16876999		
Tramo 4 (Nada)	16	-20,81285	-1,300803125	43,32818126		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	284,4161644	3	94,80538814	3,274195966	0,027100336	2,758078296
Dentro de los grupos	1737,31913	60	28,95531884			
Total	2021,735295	63				

α = 0,05	n													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	6,08	8,33	9,80	10,88	11,73	12,43	13,03	13,54	13,99	14,40	14,76	15,09	15,39	15,67
3	4,50	5,91	6,92	7,50	8,04	8,48	8,85	9,18	9,46	9,72	9,95	10,15	10,35	10,52
4	3,93	5,04	5,76	6,29	6,71	7,05	7,35	7,60	7,83	8,03	8,21	8,37	8,52	8,66
5	3,64	4,60	5,22	5,67	6,03	6,33	6,58	6,80	6,99	7,17	7,32	7,47	7,60	7,72
6	3,46	4,34	4,90	5,30	5,63	5,90	6,12	6,32	6,49	6,65	6,79	6,92	7,03	7,14
7	3,34	4,16	4,68	5,06	5,36	5,61	5,82	6,00	6,16	6,30	6,43	6,55	6,66	6,76
8	3,26	4,04	4,53	4,89	5,17	5,40	5,60	5,77	5,92	6,05	6,18	6,29	6,39	6,48
9	3,20	3,95	4,41	4,76	5,02	5,24	5,43	5,59	5,74	5,87	5,98	6,09	6,19	6,28
10	3,15	3,88	4,33	4,65	4,91	5,12	5,30	5,46	5,60	5,72	5,83	5,93	6,03	6,11
11	3,11	3,82	4,26	4,57	4,82	5,03	5,20	5,35	5,49	5,61	5,71	5,81	5,90	5,98
12	3,08	3,77	4,20	4,51	4,75	4,95	5,12	5,27	5,39	5,51	5,61	5,71	5,80	5,88
13	3,06	3,73	4,15	4,45	4,69	4,88	5,05	5,19	5,32	5,43	5,53	5,63	5,71	5,79
14	3,03	3,70	4,11	4,41	4,64	4,83	4,99	5,13	5,25	5,36	5,46	5,55	5,64	5,71
15	3,01	3,67	4,08	4,37	4,59	4,78	4,94	5,08	5,20	5,31	5,40	5,49	5,57	5,65
16	3,00	3,65	4,05	4,33	4,56	4,74	4,90	5,03	5,15	5,26	5,35	5,44	5,52	5,59
17	2,98	3,63	4,02	4,30	4,52	4,70	4,86	4,99	5,11	5,21	5,31	5,39	5,47	5,54
18	2,97	3,61	4,00	4,28	4,49	4,67	4,82	4,96	5,07	5,17	5,27	5,35	5,43	5,50
19	2,96	3,59	3,98	4,25	4,47	4,65	4,79	4,92	5,04	5,14	5,23	5,31	5,39	5,46
20	2,95	3,58	3,96	4,23	4,45	4,62	4,77	4,90	5,01	5,11	5,20	5,28	5,36	5,43
21	2,94	3,56	3,94	4,21	4,42	4,60	4,74	4,87	4,98	5,08	5,17	5,25	5,33	5,40
22	2,93	3,55	3,93	4,20	4,41	4,58	4,72	4,85	4,96	5,06	5,14	5,23	5,30	5,37
23	2,93	3,54	3,91	4,18	4,39	4,56	4,70	4,83	4,94	5,03	5,12	5,20	5,27	5,34
24	2,92	3,53	3,90	4,17	4,37	4,54	4,68	4,81	4,92	5,01	5,10	5,18	5,25	5,32
25	2,91	3,52	3,89	4,15	4,36	4,53	4,67	4,79	4,90	4,99	5,08	5,16	5,23	5,30
26	2,91	3,51	3,88	4,14	4,35	4,51	4,65	4,77	4,88	4,98	5,06	5,14	5,21	5,28
27	2,90	3,51	3,87	4,13	4,33	4,50	4,64	4,76	4,86	4,96	5,04	5,12	5,19	5,26
28	2,90	3,50	3,86	4,12	4,32	4,49	4,62	4,74	4,85	4,94	5,03	5,11	5,18	5,24
29	2,89	3,49	3,85	4,11	4,31	4,47	4,61	4,73	4,84	4,93	5,01	5,09	5,16	5,23
30	2,89	3,49	3,85	4,10	4,30	4,46	4,60	4,72	4,82	4,92	5,00	5,08	5,15	5,21
31	2,88	3,48	3,84	4,09	4,29	4,45	4,59	4,71	4,81	4,90	4,99	5,06	5,13	5,20
32	2,88	3,48	3,83	4,09	4,28	4,45	4,58	4,70	4,80	4,89	4,98	5,05	5,12	5,18
33	2,88	3,47	3,83	4,08	4,28	4,44	4,57	4,69	4,79	4,88	4,97	5,04	5,11	5,17
34	2,87	3,47	3,82	4,07	4,27	4,43	4,56	4,68	4,78	4,87	4,96	5,03	5,10	5,16
35	2,87	3,46	3,81	4,07	4,26	4,42	4,56	4,67	4,77	4,86	4,95	5,02	5,09	5,15
36	2,87	3,46	3,81	4,06	4,25	4,41	4,55	4,66	4,76	4,85	4,94	5,01	5,08	5,14
37	2,87	3,45	3,80	4,05	4,25	4,41	4,54	4,66	4,76	4,85	4,93	5,00	5,07	5,13
38	2,86	3,45	3,80	4,05	4,24	4,40	4,53	4,65	4,75	4,84	4,92	4,99	5,06	5,12
39	2,86	3,45	3,79	4,04	4,24	4,39	4,53	4,64	4,74	4,83	4,91	4,98	5,05	5,11
40	2,86	3,44	3,79	4,04	4,23	4,39	4,52	4,63	4,73	4,82	4,90	4,98	5,04	5,11
41	2,86	3,44	3,79	4,03	4,23	4,38	4,51	4,63	4,73	4,82	4,90	4,97	5,04	5,10
42	2,85	3,44	3,78	4,03	4,22	4,38	4,51	4,62	4,72	4,81	4,89	4,96	5,03	5,09
43	2,85	3,43	3,78	4,03	4,22	4,37	4,50	4,62	4,72	4,80	4,88	4,96	5,02	5,08
44	2,85	3,43	3,78	4,02	4,21	4,37	4,50	4,61	4,71	4,80	4,88	4,95	5,02	5,08
45	2,85	3,43	3,77	4,02	4,21	4,36	4,49	4,61	4,70	4,79	4,87	4,94	5,01	5,07
46	2,85	3,42	3,77	4,01	4,20	4,36	4,49	4,60	4,70	4,79	4,87	4,94	5,00	5,06
47	2,85	3,42	3,77	4,01	4,20	4,36	4,48	4,60	4,69	4,78	4,86	4,93	5,00	5,06
48	2,84	3,42	3,76	4,01	4,20	4,35	4,48	4,59	4,69	4,78	4,86	4,93	4,99	5,05
49	2,84	3,42	3,76	4,00	4,19	4,35	4,48	4,59	4,69	4,77	4,85	4,92	4,99	5,05
50	2,84	3,42	3,76	4,00	4,19	4,34	4,47	4,58	4,68	4,77	4,85	4,92	4,98	5,04

PRUEBA DE TUKEY		
Paso 1. Hipótesis estadística		
H ₀ : μt3=μt2 H _a : μt3 ≠ μt2		
Paso 2. Nivel de significancia		
α=	0,05	
Paso 3. Estadístico calculado Dc		
Dc = Xt2 - Xt3=	1,603734375	
Paso 4. Estadístico de prueba		
$S_y = \sqrt{\frac{CME}{r_i}}$	q _α (p,fe) =	3,74
	Error estándar para las medias Sy=	1,345253667
	W = q _α (p,fe) * S _y =	5,031248713
Paso 5. Análisis de resultados		
Dc>W	No hay evidencia suficiente para rechazar hipótesis nula	
	No hay diferencias entre las medias de dichos tratamientos	