



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UMP-083-R1

# PARÁMETROS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS EN COSTA RICA

Preparado por:  
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica  
Octubre, 2018

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-  
LanammeUCR jose.aguiar@ucr.ac.cr





TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. Informe</b> LM-PI-UMP-083-R1		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> Parámetros de análisis estructural de pavimentos en Costa Rica		<b>4. Fecha del Informe</b> Octubre, 2018
<b>7. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>8. Notas complementarias</b>		
<b>9. Resumen</b> <i>En el siguiente informe se plantea el uso de indicadores de condición estructural de pavimentos a partir de mediciones de deflexiones en pavimentos mediante equipos FWD y RSD. Dichos indicadores se calculan de forma directa a partir de los datos medidos en las diferentes estructuras.</i> <i>Como parte del análisis, se revisan los rangos en que se presentan los valores respecto a las mediciones desarrolladas desde hace 12 años en Costa Rica mediante deflectometría de impacto (FWD), así como la forma en que los indicadores varían a lo largo de la vida útil de las estructuras en los ensayos acelerados de pavimentos desarrollados por el LanammeUCR, y con deflexiones medidas mediante equipo RSD.</i> <i>Finalmente, se valida la propuesta con la experiencia observada mediante los datos disponibles, y se insta a generalizar el uso de estos indicadores para el mejor conocimiento de las estructuras de pavimento en servicio, así como para la definición de momentos y técnicas de mantenimiento o reconstrucción.</i>		
<b>10. Palabras clave</b> Pavimentos flexibles, parámetros estructurales, ensayos acelerados, HVS	<b>11. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>12. Núm. de páginas</b> 39
<b>13. Preparado por:</b>		
Ing. Edgar Camacho Garita  Fecha: 10/10/18	Ing. Robinson Puello Bolaño  Fecha: 10/10/18	Ing. Piero Laurent Matamoras  Fecha: 10/10/18
<b>14. Revisado por:</b> Ing. Tania Ávila Esquivel, MSc.  Fecha: 10/10/18	<b>14. Revisado por:</b> Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD.  Fecha: 10/10/18	<b>15. Aprobado por:</b> Ing. Luis Guillermo Loria Salazar, PhD.  Fecha: 10/10/18



1 Introducción ..... 5

2 Marco teórico de referencia..... 7

2.1 Parámetros considerados producto de las deflexiones medidas ..... 9

2.1.1 Radio de curvatura ..... 9

2.1.2 AREA y factores de forma ..... 10

2.1.3 Indicadores SCI (BLI), BDI (MLI) y BCI (LLI)..... 12

2.1.4 Área debajo del perfil de pavimento (AUPP) ..... 16

2.1.5 Deflexión máxima ..... 17

3 Datos analizados de diferentes estructuras ..... 18

3.1 Ensayo de pavimentos a escala real 2013-2018 ..... 18

3.1.1 Tramos de ensayo ..... 19

3.1.2 Análisis mediante relación de AREA normalizada ..... 21

3.1.3 Análisis mediante BLI, MLI y LLI ..... 25

3.2 Evaluación de la Red Vial Nacional de Costa Rica 2004-2016 ..... 28

4 Conclusiones ..... 35

5 Referencias ..... 36

**TABLA DE FIGURAS**

FIGURA 1. ESQUEMA DEL MEDIDOR DE CURVATURA DE DEHLEN ..... 10

FIGURA 2. VARIACIÓN DEL CUENCO DE DEFLEXIÓN SUPERFICIAL CON RESPECTO AL MÓDULO DE LA SUBRASANTE ..... 14

FIGURA 3. INDICADORES Y ZONAS DEL CUENCO DE DEFLEXIÓN ..... 15

FIGURA 4. ÁREA DEBAJO DEL PERFIL DE PAVIMENTO ..... 17

FIGURA 5. SIMULADOR DE VEHÍCULOS PESADOS (HVS) DEL LANAMMEUCR ..... 18

FIGURA 6. VARIACIÓN DEL PARÁMETRO BLI PARA LOS DIFERENTES TRAMOS ENSAYADO CON EL HVS ..... 20

FIGURA 7. EJEMPLO DE VARIACIÓN DEL PARÁMETRO MLI PARA EL TRAMO 009AC4H ..... 21

FIGURA 8. PARÁMETRO AREA NORMALIZADA CONTRA DEFLEXIÓN MÁXIMA MEDIDA PARA LOS DIFERENTES TRAMOS DE ENSAYO. .... 22

FIGURA 9. ESALS CONTRA RELACIÓN DE AREA NORMALIZADA PARA LOS DIFERENTES TRAMOS ENSAYADOS. .... 23

FIGURA 11. RELACIÓN DE AREA NORMALIZADA VS DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA LAS PISTAS ..... 24

FIGURA 12. ESALS VS BLI PARA LOS DIFERENTES TRAMOS ENSAYADOS. .... 26

FIGURA 13. ESALS VS MLI PARA LOS DIFERENTES TRAMOS ENSAYADOS. .... 27

FIGURA 14. ESALS VS LLI PARA LOS DIFERENTES TRAMOS ENSAYADOS..... 27



FIGURA 15. DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD) ..... 28

FIGURA 16. FRECUENCIA ACUMULADA DE LOS VALORES DE BLI, A PARTIR DE LOS DATOS DE DEFLECTOMETRÍA RECOLECTADOS POR LANAMMEUCR 2004 Y 2016..... 29

FIGURA 17. FRECUENCIA ACUMULADA DE LOS VALORES DE MLI, A PARTIR DE LOS DATOS DE DEFLECTOMETRÍA RECOLECTADOS POR LANAMMEUCR 2004 Y 2016..... 29

FIGURA 18. FRECUENCIA ACUMULADA DE LOS VALORES DE RADIO DE CURVATURA, A PARTIR DE LOS DATOS DE DEFLECTOMETRÍA RECOLECTADOS POR LANAMMEUCR 2004 Y 2016. .... 30

FIGURA 19. FRECUENCIA ACUMULADA DE LOS VALORES DEL PARÁMETRO RELACIÓN DE ÁREA (AREA RATIO), A PARTIR DE LOS DATOS DE DEFLECTOMETRÍA RECOLECTADOS POR LANAMMEUCR 2004 Y 2016. .... 30

FIGURA 20. FRECUENCIA ACUMULADA DE LOS VALORES DE LLI, A PARTIR DE LOS DATOS DE DEFLECTOMETRÍA RECOLECTADOS POR LANAMMEUCR 2004 Y 2016..... 31

FIGURA 21. RELACIÓN ENTRE EL RADIO DE CURVATURA Y BLI, DEFLECTOMETRÍA RECOLECTADOS POR LANAMMEUCR 2004 Y 2016. .... 32

FIGURA 22. RELACIÓN ENTRE EL RADIO DE CURVATURA Y MLI, DATOS ERVN 2004 Y 2016..... 33

FIGURA 23. RELACIÓN ENTRE EL RADIO DE CURVATURA Y LLI, DATOS ERVN 2004 Y 2016..... 34



## 1 Introducción

El análisis estructural de pavimentos reviste una especial atención en el diseño, la construcción, verificación y gestión de las estructuras. Al analizar la capacidad estructural de las estructuras podemos darle seguimiento a su comportamiento en el tiempo, a definir los mejores momentos en el tiempo para intervenirlas y maximizar su rendimiento. Así como retroalimentar los procesos de diseño-construcción en un proceso de mejora.

Los procesos de diseño han venido evolucionando con el desarrollo de conocimiento, nuevas herramientas de análisis y procesos de diseños basados en una mayor cantidad de información, características de los materiales, detalles de las cargas y datos de laboratorio, en general aspectos mecánicos del diseño. Estos diseños deben ser ejecutados en campo mediante diferentes procesos constructivos, procesos que cuentan con limitadas herramientas de verificación para vincular lo planteado en diseños con lo efectivamente obtenido en el campo.

Históricamente se ha tratado de hacer este vínculo diseño-construcción mediante los módulos de los materiales, lo cual parte de buenos conceptos de las características físicas/mecánicas que se pueden estudiar en laboratorio para cada uno de los materiales como elementos separados. Sin embargo, la medición fehaciente de estas características físicas/mecánicas en campo es compleja.

Entre las posibilidades para conocer las características de los materiales generalmente se utilizan: 1) toma de muestras (sin colocar) en la fuente del material o en el frente de obra, para análisis posterior en laboratorio; 2) toma de muestras una vez que los materiales han sido colocados, para análisis en laboratorio y 3) retrocálculo de módulos a partir de ensayos deflectométricos no destructivos, principalmente con base en el deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés).

Como parte de las dos primeras posibilidades se analizan los materiales sin considerar las condiciones de trabajo a las que están sometidos (confinamiento, humedad real, carga) y la relación con el diseño puede llegar a resultar empírica y limitada. Lo anterior, debido a los supuestos, simplificaciones y deficiencias inherentes de los métodos y teorías utilizadas para el cálculo.

Estas muestras, históricamente, han estado orientadas a la verificación de los parámetros generales especificados para los materiales (granulometría, densidad, contenido de asfalto y similares); así como también se utilizan para la realización de ensayos asociados al desempeño de los materiales (módulo, resistencia retenida y otros). Sin embargo, para la medición del desempeño, se limitan a las propiedades de los materiales y no al desempeño de la estructura como un conjunto.

El retrocálculo de módulos a partir de ensayos FWD se ha convertido en una práctica popular, fundamentada en mediciones en campo, con una simulación buena de las cargas de tránsito mediante el uso de cargas de impacto. Sin embargo, la técnica de medición está limitada, por algunos factores.



Uno de ellos es el número de sensores que realizan la medición del cuenco de deformación: limita el proceso de análisis que necesariamente debe ejecutarse posteriormente.

El proceso de análisis de las deflexiones obtenidas es lo que se conoce como retrocálculo de módulos, donde a partir de la modelación de la estructura y las deflexiones se buscan los módulos elásticos de los materiales que conforman cada una de las capas. Este proceso es complejo y altamente dependiente de diferentes factores, donde resaltan: i) la información disponible, ii) rango de valores aceptables como resultado, iii) espesores de las capas, número de capas; iv) cuando no se conocen algunos de estos elementos no es posible ejecutar de buena manera el proceso de cálculo inverso, o v) la incertidumbre asociada no es aceptable. Adicionalmente la metodología de cálculo seleccionada también influye en el resultado.

En términos generales es necesario utilizar los mejores criterios técnicos para llevar a cabo un proceso de retrocálculo de módulos satisfactorio. Sin embargo, hay muchas situaciones donde la falta de información limita la aplicación de estos procesos. Un claro ejemplo es la evaluación de redes viales extensas.

El uso de parámetros basados en deflectometría presenta la oportunidad de unificar criterios en la evaluación de pavimentos a diferentes niveles, resultando en un vínculo claro, directo y libre de interpretaciones subjetivas entre ensayos acelerados, evaluaciones a nivel de red, diseño y construcción siendo las deflexiones una realidad física que sirve de punto de partida para dicha comparación.

Adicionalmente, el uso de indicadores/parámetros brindará una mayor claridad en la gestión de los activos viales, asignación de recursos, principalmente gracias a un mejor conocimiento de la evolución en el tiempo de dichos parámetros. Ayudando a comprender de mejor manera la forma en que los diferentes parámetros evolucionan en el tiempo y se asocian a cada uno de los mecanismos de falla que se presentan en los componentes del pavimento.



## 2 MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

De acuerdo con Fontul (2009) en la actualidad el mantenimiento ha tomado gran importancia, y es necesario determinar métodos eficientes para evaluar y monitorear las carreteras existentes. Ya que en carreteras construidas es importante conocer la condición para poder estimar una vida útil remanente, además menciona que el estado inicial de la estructura no siempre está disponible o es poco confiable.

La naturaleza misma de la construcción de carreteras ha evolucionado hacia la conservación y rehabilitación, donde se busca mantener la mayor parte de la estructura existente posible, por lo que es necesario determinar la capacidad estructural, inclusive distinguir las capas que presentan problemas, para así dar el mantenimiento adecuado (Irwin, 2002).

Para evaluar su condición estructural se pueden recurrir a dos métodos distintos, el primero es llevar a cabo pruebas de laboratorio de los materiales, y la segundo realizar pruebas no destructivas (NDT, por sus siglas en inglés). El primer método implica invertir mucho tiempo y esfuerzo; además, es destructivo ya que se deben obtener muestras, generalmente es necesario dispositivos de tránsito que pueden afectar a los usuarios. También, se debe considerar que es muy difícil simular, en laboratorio, el estado de esfuerzos al que se encuentra sometido el pavimento (Ali & Khosla, 1987).

El segundo método consiste en tomar mediciones en la superficie del pavimento y a partir de esto inferir sus condiciones estructurales. El mayor beneficio de estos métodos es que se pueden realizar en cualquier momento de la vida útil del pavimento sin provocar daños funcionales o estructurales. Además, en general no tienen un costo elevado y se realizan rápidamente, lo que los hace muy atractivos (Ali & Khosla, 1987).

De todas las respuestas que pueden medirse la deflexión se considera la más práctica. La interpretación de estas deflexiones como método de evaluación estructural se popularizó a finales de los ochentas. Además, se han desarrollado diversos NDT para medir la deflexión. De estos NDT se considera que el deflectómetro de impacto (FWD por sus siglas en inglés) provee un cuenco de deflexión realista que puede utilizarse para el diseño mecanicista-empírico (Ali & Khosla, 1987).

De acuerdo con Irwin (2002), entre 1935 y 1960 se da la observación de que en pavimentos fuertes las deflexiones son bajas y en pavimentos débiles las deflexiones son altas. Entre 1940 y 1970 se desarrollan teorías que vinculan las propiedades fundamentales de los materiales con las respuestas en un sistema de capas. Posteriormente, entre 1955 y 1980, la instrumentación de los sistemas de medición se hace portátiles, precisos y económicos. Por último, a partir de 1960 las computadoras hacen posible implementar soluciones hasta ese momento teóricas para los sistemas de capas (Irwin, 2002).

La mayoría de los programas realizan el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones basados en la teoría elástica y bajo los supuestos: la carga es distribuida uniformemente bajo un área circular;



todas las capas son homogéneas, isotrópicas y lineal-elásticas; las capas tienen una extensión horizontal infinita; la última capa es un espacio semi-infinito (Irwin, 2002).

Existen también programas basados en el análisis de elemento finito. Sin embargo, estos programas requieren una cantidad grande de información de entrada, y generalmente la información requerida no es común. Estos programas normalmente son utilizados para la investigación y no para el diseño (Irwin, 2002).

El retrocálculo es el método de obtener de manera inversa los módulos de las capas que forman la estructura del pavimento. Normalmente los programas de retrocálculo utilizan métodos de búsqueda de prueba y error, donde se proporciona un valor semilla de módulos con el que se inicia la iteración. La mayor desventaja de estos métodos es que no producen una solución única (Fwa, Tan, & Li, 2000).

El retrocálculo se puede realizar de manera manual con el uso de los programas de análisis. Sin embargo, se debe iterar manualmente cada estacionamiento lo cual toma mucho tiempo y esfuerzo. Según Huang (2004) el procedimiento básico del retrocálculo consiste en la iteración de los módulos de las capas hasta que las deflexiones obtenidas mediante el modelo teórico se ajusten a las medidas en campo.

Para obtener resultados representativos a partir del retrocálculo se requiere que la información de entrada requerida sea confiable. Se ha determinado en general que la confiabilidad de los resultados del retrocálculo depende de manera significativa de la precisión en la medición de los espesores de las capas, de la calibración de los datos de deflexión, variación de temperatura y de problemas en el algoritmo de búsqueda (Sangghaleh, y otros, 2013).

Uzan et al. (1989) determinaron que la variabilidad de los espesores, la presencia de vacíos, grietas, agua subterránea o capas rígidas resultan en distorsiones en los cuencos de deflexión que afectan de gran medida el resultado del retrocálculo. Además, consideran que existen errores debido a la precisión de los geófonos, debido a que la distribución de presiones del plato de carga se puede ver afectada por muchos factores (perpendicularidad de la carga y la superficie, irregularidades en la superficie, entre otros), y debido a que los datos provienen de un ensayo dinámico (a pesar de que el análisis que se aplica es estático). Por último, según Uzan et al. (1989) los modelos para los materiales de pavimentos consideran homogeneidad, lo cual no se cumple y además, se utilizan parámetros lineales elásticos para describir materiales que en algunos casos son no lineales.

Según Ceylan et al. (2007) los programas de multicapa elástica asumen condiciones lineales elásticas, mientras los materiales de la estructura de pavimentos no siguen el comportamiento de esfuerzo-deformación lineal, de hecho, los materiales granulares tienen una respuesta no lineal sensible al esfuerzo al que se encuentran sometidos. Se ha establecido que los materiales granulares gruesos muestran aumento de módulo bajo esfuerzo mayores (“Stress Hardening”) y los materiales granulares finos presentan una disminución en el módulo bajo el aumento del esfuerzo (“Stress Softening”). Por



este motivo cuando estos materiales se utilizan en las estructuras de pavimento, el módulo deja de ser una constante del material y pasa a ser una propiedad función del esfuerzo (Ceylan et al. 2007).

Debido a lo expuesto anteriormente, es importante notar que de acuerdo con Irwin (2002) aunque se logre un ajuste bueno entre las deflexiones, medidas y retrocalculadas, no implica necesariamente que los resultados sean confiables. Irwin considera que para sobrepasar los problemas y comprobar la validez de los resultados es necesario poseer un conocimiento profundo y avanzado de los materiales de pavimentos. Además, es importante conocer a fondo los supuestos, limitaciones y teoría detrás del método o software utilizado.

Es debido a estas razones que se considera que el módulo de las capas estructurales del pavimento obtenidas mediante el retrocálculo, están limitadas por las condiciones específicas del ensayo y pueden llegar a representar únicamente una fotografía de estas. Además, debido a que el método de solución es de prueba y error, puede ser dependiente de los módulos semilla que se introduzcan, obteniendo mínimos locales en la ecuación objetivo, sesgado por el comportamiento que se espera del material, sin considerar el nivel de esfuerzo y deterioro del pavimento analizado.

## 2.1 Parámetros considerados producto de las deflexiones medidas

Se presentan a continuación los parámetros que se han desarrollado históricamente, incluyendo algunos elementos del desarrollo de estos, sentido físico cuando esto sea pertinente, así como correlaciones encontradas por diferentes investigadores.

De la revisión de los parámetros se presentarán posteriormente un análisis de diferentes datos con algunos de los parámetros de mayor relevancia. Se utilizarán datos de las evaluaciones de la Red Vial Nacional (FWD) y datos de los ensayos acelerados de pavimentos del LanammeUCR (RSD).

### 2.1.1 Radio de curvatura

El parámetro del cuenco de deflexión denominado radio de curvatura fue uno de los primeros en ser utilizado para realizar la evaluación estructural de los pavimentos. Dehlen (1962a) observó que utilizando la viga Benkelman y como parte de un estudio para medir el efecto en la superficie del pavimento debido a la carga de las llantas, es posible ajustar un círculo en la superficie deformada medida en el campo en 127 mm alrededor de la deflexión máxima encontrada. Dicha forma geométrica es una aproximación de la forma elíptica, parabólica o sinusoidal presentada realmente en el campo, encontrando errores inferiores al 5% por dicha suposición.

El radio de curvatura es muy dependiente del aporte estructural de las capas superiores y medias del pavimento (capa asfáltica, base y subbase), poco dependiente de la capa inferior o subrasante. Además, también es altamente dependiente de la presión de las ruedas, pero no tanto de las cargas impuestas por las mismas (Dehlen, 1962b). En la ecuación 1 se presenta la expresión para el cálculo

LM-PI-UMP-083-R1	Octubre, 2018	Página 9 de 39
------------------	---------------	----------------

de dicho parámetro y en la Figura 1 se muestra en un diagrama como se interpreta dicho radio de curvatura.

$$R_0C = \frac{(L)^2}{2d_0 \left(1 - \frac{d_L}{d_0}\right)} \quad 1$$

Donde:

$R_0C$  = Radio de curvatura en metros

$L$  = Distancia medida desde el centro de aplicación de la carga; 127 mm en el medidor de curvatura de Dehlen (1962a) y 200 mm para FWD

$d_0$  = Deflexión en mm a la distancia 0 desde el centro de aplicación de la carga

$d_L$  = Deflexión en mm a la distancia  $L$  desde el centro de aplicación de la carga

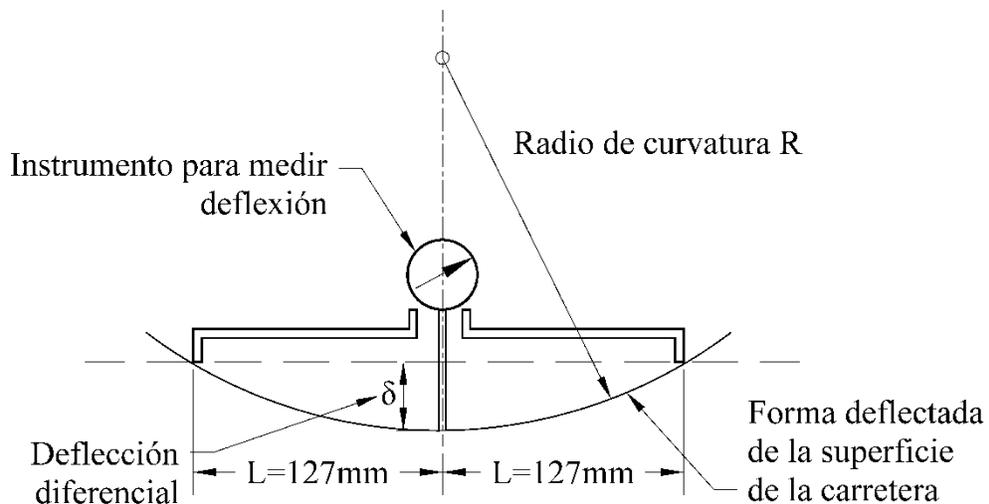


Figura 1. Esquema del medidor de curvatura de Dehlen

### 2.1.2 AREA y factores de forma

Hoffman & Thompson (1981) proponen en un informe los parámetros *AREA* y *factores de forma* ( $F_1$  y  $F_2$ ) para la evaluación de la condición de las estructuras.

Los autores derivaron el parámetro AREA del cálculo del área bajo el cuenco de deflexión normalizado, con respecto al valor de la mayor deflexión registrada ( $D_0$ ), utilizando el concepto de la regla de Simpson para la integración numérica. El parámetro combina las diferentes deflexiones

LM-PI-UMP-083-R1	Octubre, 2018	Página 10 de 39
------------------	---------------	-----------------



registradas por los geófonos en un número, minimizando por lo tanto el efecto de un posible error de mal funcionamiento presentado en alguno de los sensores.

En la ecuación 2, se presenta el cálculo del parámetro AREA utilizando las deflexiones medidas a partir de la carga aplicada al pavimento por el equipo no destructivo (FWD).

$$\text{AREA} = \frac{150(d_0 + 2d_1 + 2d_2 + d_3)}{d_0} \quad 2$$

Donde:

AREA = Parámetro AREA en mm

$d_0, d_1, d_2, d_3$  = deflexiones en mm medidas a la distancia 0, 300, 600 y 900 mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga.

Saleh (2016) pudo observar que el parámetro AREA poco sensible a la condición estructural de la subrasante, es decir que no posee la capacidad de evaluar la totalidad de la estructura de pavimento. No obstante, a pesar de lo anterior es un buen indicador estructural de todas las capas de pavimento que se encuentran por encima de la subrasante.

Saleh (2015, 2016) también propone otra manera de evaluar tanto las capas de pavimento por encima de la subrasante como la subrasante a través de un parámetro que denominó AREA normalizada, el cual se define como la relación entre el parámetro AREA y el producto de la máxima deflexión medida y el máximo valor del parámetro AREA (900), tal como es expresado en la ecuación 3 a continuación.

$$A'_r = \frac{150(d_0 + 2d_1 + 2d_2 + d_3)}{900 * (d_0)^2} \quad 3$$

Donde:

$A'_r$  = Relación AREA normalizada

$d_0, d_1, d_2, d_3$  = deflexiones en mm medidas a la distancia 0, 300, 600 y 900 mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga.

La relación de AREA normalizada muestra un gran potencial para ser utilizado como herramienta para la gestión de pavimentos, ya que permite evaluar y clasificar la condición estructural de la red,



tanto en las estrategias de mantenimiento como en las de rehabilitación; por lo tanto es posible una eficiente asignación de los recursos (Saleh, 2015, 2016).

Los factores de forma por otra parte fueron presentados por Hoffman & Thompson (1981) como los encargados de describir realmente la forma del cuenco de deflexión, presentando la condición de la estructura a determinada profundidad. Estos factores son adimensionales y reflejan las diferencias relativas en vez de las absolutas entre diferentes estructuras de pavimentos. Hoffman & Thompson (1981) afirman que dichos factores son análogos a una derivada de la deflexión con una distancia lateral desde el centro del plato de carga. En las ecuaciones 4 y 5 se presenta la manera de calcular dichos factores.

$$F_1 = \frac{(d_0 - d_2)}{d_1} \quad 4$$

$$F_2 = \frac{(d_1 - d_3)}{d_2} \quad 5$$

Donde:

$F_1, F_2$  = Factores de forma

$d_0, d_1, d_2, d_3$  = deflexiones en mm medidas a la distancia 0, 300, 600 y 900 mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga.

### 2.1.3 Indicadores SCI (BLI), BDI (MLI) y BCI (LLI)

Anderson (1977) realizó un estudio donde analizó estructuras de pavimentos estándar en el estado de Victoria en Australia, en dicho estudio fue introducido el parámetro denominado *indicador de curvatura superficial (SCI, por sus siglas en inglés)*.

El autor encontró que con este indicador podría evaluar la resistencia de la parte superior de la estructura de pavimento. En simultáneo el autor utilizó la deflexión máxima medida para la descripción de la respuesta de la parte inferior de las estructuras de pavimento evaluadas. En general las estructuras de pavimentos usadas poseían capas delgadas de rodadura cercanas a los 50 mm de espesor (Horak, 1987).

En recientes estudios se ha encontrado que dicho indicador específicamente caracteriza capacidad estructural de la capa ligada como parte de la capa de base de la estructura de pavimento (Horak, 2008; Talvik & Aavik, 2009). En la ecuación 6 se presenta la expresión para el cálculo de dicho indicador.



$$SCI = d_0 - d_1$$

6

Donde:

SCI = Indicador de curvatura superficial

$d_0, d_1$  = deflexiones en mm medidas a la distancia 0 y 300, mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga

Kilareski y Anani (1982) realizaron un proyecto de investigación diseñado para determinar los valores del módulo in-situ y la vida útil remanente del pavimento, basado en el cuenco de deflexión obtenido de un equipo Road Rater. En dicho estudio fueron presentados los parámetros denominados indicador de curvatura base (BCI, por sus siglas en inglés) e indicador de daño base (BDI, por sus siglas en inglés). El BCI según afirman los autores es el encargado de presentar la rigidez de la parte inferior del pavimento.

Además, según Horak (2008), Talvik y Aavik (2009) el BCI representa la caracterización de la condición estructural de la capa de subrasante. En la Figura 2 se muestra la susceptibilidad al cambio de módulo en la subrasante, considerando la diferencia de deflexión entre la distancia de 600 mm y 900mm. Este gráfico fue presentado por Kilareski & Anani en dicho estudio como demostración de la efectividad para la evaluación estructural de dicho parámetro (Horak, 1987). En la ecuación 7 se presenta la expresión para el cálculo de dicho indicador.

$$BCI = d_2 - d_3$$

7

Donde:

BCI = Indicador de curvatura base

$d_2, d_3$  = deflexiones en mm medidas a la distancia 600 y 900 mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga

El BDI fue presentado por Kilareski y Anani (1982) como una necesidad de crear otro indicador, que pudiera complementar la información que arrojaba el indicador SCI y el BCI. Este indicador es el encargado de caracterizar la rigidez de la parte intermedia de la estructura de pavimento, lo que puede corresponder a la capa de base y subbase (Horak, 2008; Talvik & Aavik, 2009). Los valores del BDI cambian con el incremento de las repeticiones de ejes equivalentes que pasan sobre la estructura (Horak, 1987). En la ecuación 8 se presenta la expresión para el cálculo de dicho indicador.

$$BDI = d_1 - d_2$$

8

Donde:

LM-PI-UMP-083-R1	Octubre, 2018	Página 13 de 39
------------------	---------------	-----------------



BDI = Indicador de daño base

$d_1$ ,  $d_2$  = deflexiones en mm medidas a la distancia 300 y 600 mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga.

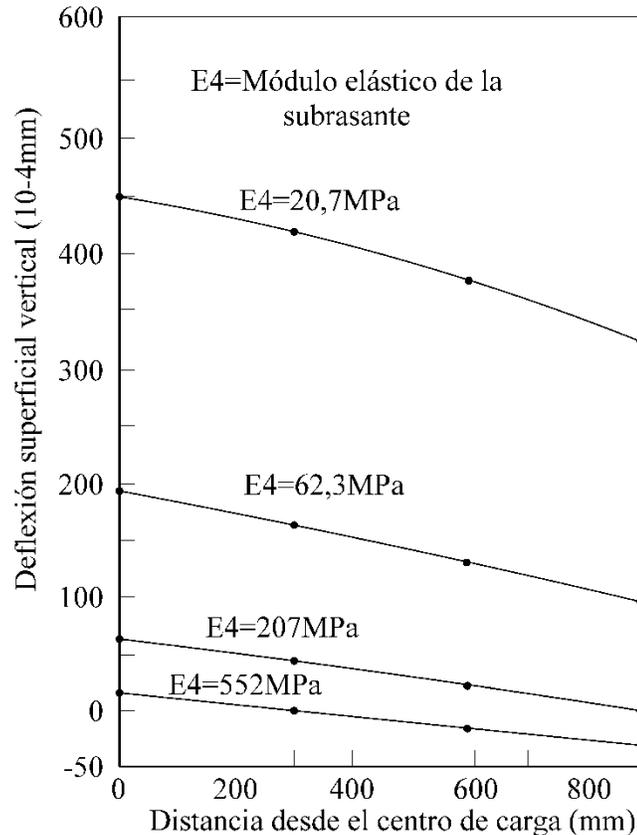


Figura 2. Variación del cuenco de deflexión superficial con respecto al módulo de la subrasante (Kilareski & Anani, 1982)

Horak (2008) propuso una metodología para la evaluación de pavimentos utilizando los parámetros SCI, BDI y BCI, los cuales fueron renombrados como los indicadores de capas base, media e inferior respectivamente (BLI, MLI, LLI). En dicho estudio se realizaron evaluaciones a distintas estructuras de pavimento en Sudáfrica, utilizando esta metodología. Se pudo encontrar que el indicador BLI (SCI) mostró gran correlación con la parte que posee la curvatura positiva cercana al punto de aplicación de carga, esta zona normalmente está contenida entre el punto de aplicación de la carga y una distancia de 300 mm desde ese punto y se refiere a la capa superficial y la capa base de la estructura de pavimento.

El indicador MLI (BDI) mostró una gran correlación con la zona intermedia o de inflexión, esta zona normalmente está contenida entre una distancia de 300 mm hasta 600 mm desde el punto de aplicación de la carga. El indicador se refiere principalmente a la capa subbase de pavimento. El indicador LLI (BCI) mostro una gran correlación con la zona de curva reversa, esta zona normalmente está contenida entre una distancia de 600 mm hasta 2000 mm desde el punto de aplicación de la carga y se refiere a la capa subrasante de la estructura de pavimento.

En este estudio también se pudo notar que los módulos superficiales a la distancia 0, 300 y 600 mm presentaron un excelente vínculo con las zonas anteriormente mencionadas y por lo tanto con los indicadores BLI, MLI y LLI respectivamente. De hecho, los parámetros mostraron una relación inversa con los módulos superficiales en las vías evaluadas, tal como se aprecia en la Figura 3.

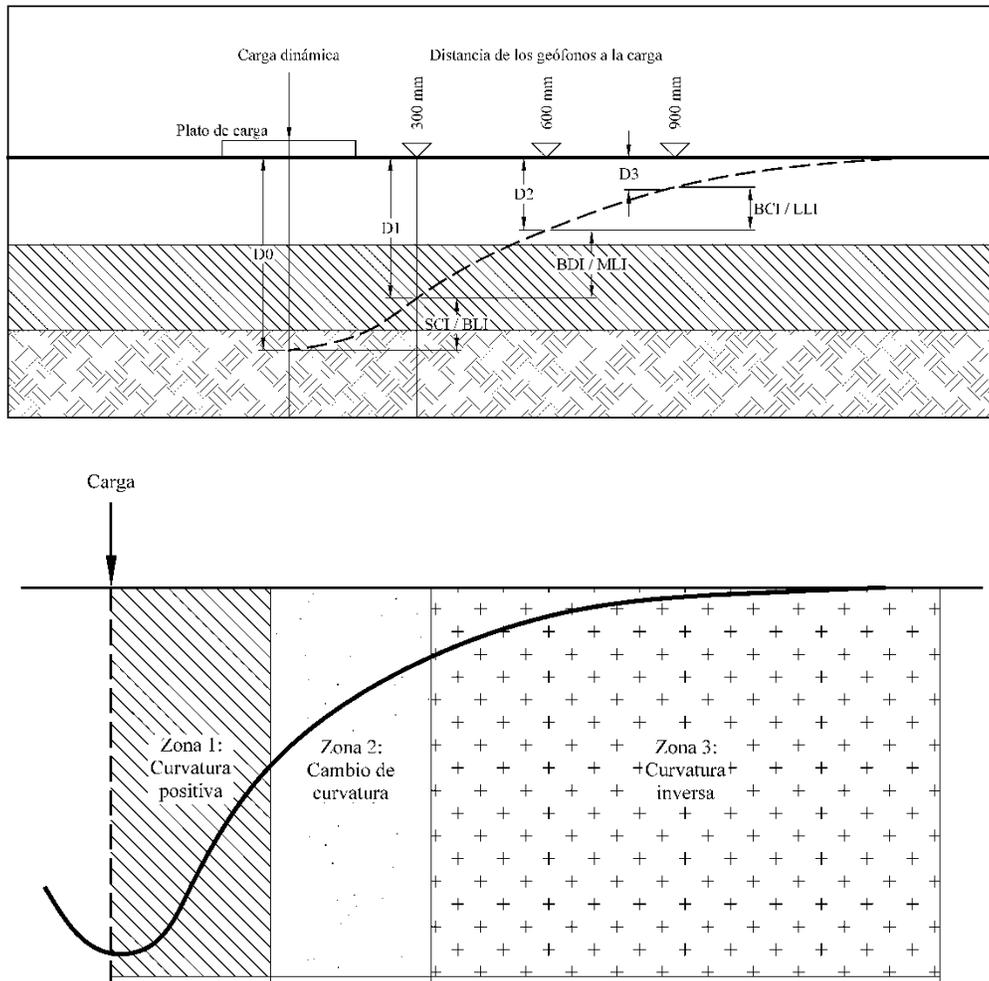


Figura 3. Indicadores y zonas del cuenco de deflexión  
(Horak & Emery, 2006; Horak E., 2008)



La Tabla 1 presenta una clasificación de la condición estructural para varios tipos de pavimentos, la cual fue presentado por Horak (2008). En dicha clasificación se utilizan tres colores distintos, esta codificación de colores está ligada con un sistema de clasificación considerando los parámetros BLI, MLI, LLI, D<sub>0</sub> (deflexión máxima) y R<sub>0</sub>C (radio de curvatura).

Horak (2008) afirma que el uso de dicha metodología de clasificación puede ayudar a identificar de manera acertada tanto secciones uniformes como también, puntos específicos de deterioro en la evaluación estructural del pavimento. Por lo tanto, es una metodología enfocada para realizar investigaciones para la rehabilitación de pavimentos de manera eficiente y detallada, la cual no requiere un análisis complejo, ni tampoco necesita gran cantidad de información como los espesores o información del material perteneciente a la estructura de pavimento.

Tabla 1. Clasificación de la condición estructural considerando los parámetros de cuencos de deflexión para varios tipos de pavimentos

	Clasificación de condición estructural	Parámetros del cuenco de deflexión				
		D <sub>0</sub> (µm)	R <sub>0</sub> C (µm)	BLI (µm)	MLI (µm)	LLI (µm)
Base granular	Buena	<500	>100	<200	<100	<50
	Regular	500-750	50-100	200-400	100-200	50-100
	Severa	>750	<50	>400	>200	>100
Base estabilizada con cemento	Buena	<200	>150	<100	<50	<40
	Regular	200-400	80-150	100-300	50-100	40-80
	Severa	>400	<80	>300	>100	>80
Base bituminosa	Buena	<400	>250	<200	<100	<50
	Regular	400-600	100-250	200-400	100-150	50-80
	Severa	>600	<100	>400	>150	>80

(Horak, 2008)

#### 2.1.4 Área debajo del perfil de pavimento (AUPP)

Thompson (1989) presentó el parámetro denominado Área debajo del perfil de pavimento (AUPP, por sus siglas en inglés). El objetivo de este, es la caracterización estructural de las capas superiores de pavimento; además, también puede ser usado para predecir con gran precisión la deformación unitaria a tensión presentada en la fibra inferior de la capa asfáltica (Thompson & Garg, 1997; Saleh F., 2016b; Burhani, 2016).

$$AUPP = \frac{\text{(Area de bajo del cuenco de deflexión)}}{300} = \frac{(5d_0 - 2d_1 - 2d_2 - d_3)}{2} \quad 9$$

Donde:

LM-PI-UMP-083-R1	Octubre, 2018	Página 16 de 39
------------------	---------------	-----------------

AUPP = Área debajo del perfil de pavimento

$d_0, d_1, d_2, d_3$  = deflexiones en mm medidas a la distancia 0, 300, 600 y 900 mm, respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga

El AUPP no se ve afectado por el tipo de estructura de pavimento, ni tampoco el tipo de subrasante que conforma la misma (Thompson & Garg, 1997; Kim & Park, 2002). La predicción de la deformación a tensión es mucho más certera en las estructuras de pavimentos que poseen una capa gruesa de concreto asfáltico (mayores a 120 mm) (Thompson & Garg, 1997). La Figura 4 muestra un diagrama representando el AUPP.

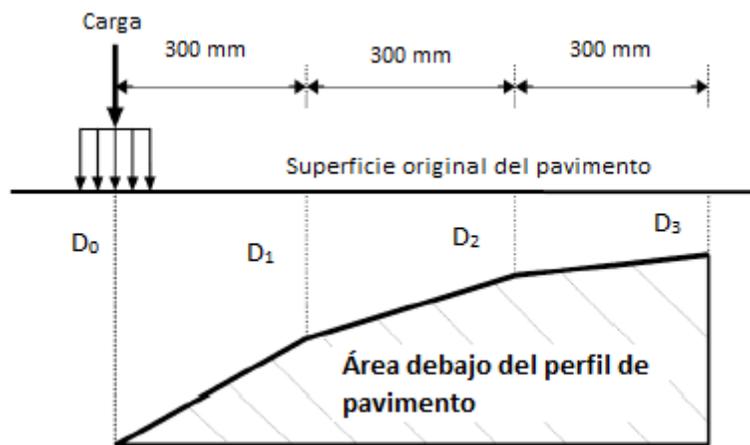


Figura 4. Área debajo del perfil de pavimento  
(Thompson & Garg, 1997)

### 2.1.5 Deflexión máxima

La deflexión máxima tomada en el centro de la carga aplicada es un indicador altamente utilizado por diversas agencias y metodologías tanto para el proceso de retrocálculo como para el análisis total de la estructura de pavimento, debido a que es reflejado el aporte (deflexiones) de todas las capas (Saleh F., 2016b). De igual manera la deflexión máxima refleja la condición estructural de la subrasante; Ullidtz (1987) estipula que entre el 60% y el 80% de la deflexión máxima medida es producto de la deflexión de la subrasante; una deflexión máxima alta suele estar asociada con una subrasante débil o una mala condición de drenaje (Saleh F., 2015).

Es importante tener en cuenta que el uso de esta deflexión es fundamental para una adecuada evaluación estructural del pavimento, considerando que la deflexión máxima representa la rigidez total del pavimento, esta se vuelve un indicador ineficiente para la evaluación de la condición estructural de las otras capas que conforman el pavimento (Hoffman & Thompson, 1981; Horak & Emery, 2006).



Adicional a lo anterior la deflexión máxima representa solo un punto del cuenco de deflexión generado por una carga aplicada, ignorando el comportamiento del pavimento en los puntos que están a cierta distancia de la aplicación de la carga. Esto indiscutiblemente puede llevar a una inadecuada caracterización del pavimento evaluado (rigidez, características de drenaje de las capas, entre otras).

### 3 DATOS ANALIZADOS DE DIFERENTES ESTRUCTURAS

#### 3.1 Ensayo de pavimentos a escala real 2013-2018

Los esfuerzos que se han desarrollado en Costa Rica mediante los ensayos de pavimentos a escala real han generado una base de datos única en Latinoamérica y zonas tropicales, donde se incluyen datos en deformación permanente (incluyendo regularidad superficial) y deformación instantánea ante el paso de cargas (deflexiones) para la vida útil de cada estructura.

El Simulador de Vehículos Pesados (HVS, por sus siglas en inglés) es un equipo especializado de la Universidad de Costa Rica a cargo del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). Los ensayos desarrollados permiten obtener respuestas en cuanto al desempeño de las estructuras de forma acelerada.



Figura 5. Simulador de Vehículos Pesados (HVS) del LanammeUCR.

Este equipo está clasificado dentro de los Ensayos Acelerados de Pavimentos (APT, por sus siglas en inglés) a nivel mundial. La subcategoría de clasificación corresponde a un equipo lineal móvil, el cual tiene la particularidad de poder ser utilizado dentro de las instalaciones especializadas y construidas



para este fin, así como también cuenta con la posibilidad de desplazarse a diferentes sitios para realizar los ensayos.

### 3.1.1 Tramos de ensayo

Los tramos de ensayo usados en el análisis son parte del grupo inicial del ensayo desarrollado en el PaveLab en Costa Rica y corresponden a 4 estructuras que fueron construidas en marzo de 2012 (Camacho-Garita, 2014). El ensayo de las pistas con el HVS inició en Julio de 2013. Las estructuras de pavimento están compuestas por dos espesores diferentes de mezcla asfáltica en caliente (MAC) sobre una base estabilizada con cemento (BEC) o una base granular (BG). Todo fue construido sobre una subbase granular y una subrasante.

La capa superior consiste en una mezcla de concreto asfáltico, con un tamaño máximo nominal de 19.0 mm con un contenido óptimo de 4.9% de asfalto por peso de la mezcla. La BEC fue diseñada para una resistencia de 35kg/cm<sup>2</sup> con un contenido óptimo de cemento de 1.7% por volumen de agregado, con una densidad máxima de 2013kg/m<sup>3</sup>. El material de base y subbase granular fueron colocados a una densidad máxima de 2217kg/m<sup>3</sup> con un contenido de humedad óptimo de 8.6%. El material de subbase tuvo un CBR de 95%. Finalmente, el material de la subrasante (MH, A-7-5) fue construido para una densidad máxima de 1056 kg/m<sup>3</sup> con una humedad óptima de 52% (humedad típica para Costa Rica) y un CBR de 6.6%. Ambos, subbase y subrasante fueron iguales para todos los tramos de ensayo.

El control del nivel freático fue desarrollado mediante un sistema de distribución operado por gravedad, que fue construido en conjunto con el área de ensayo. El diseño general del área de ensayos estuvo basado en la experiencia de otras instalaciones de ensayos acelerados de pavimentos (Camacho-Garita, 2014).

Tabla 2. Características constructivas de las pistas de ensayo

Propiedades \ Secciones	001 AC1 008AC1H	003AC2 007AC2H	004AC3 010AC3H	002AC4 009AC4H
MAC espesores (H1), cm	6.1	6.3	13.2	13.2
Base espesores (H2), cm	21.9	21.2	31.0	24.9
Subbase espesores (H3), cm	30.1	30.1	30.1	30.1

Pistas ensayadas en condición de mayor humedad: 007AC2H, 008AC1H, 009AC4H y 010AC3H.



Para efectos de este trabajo se utilizarán los datos recolectados del experimento a escala natural del LanammeUCR con el deflectómetro de superficie, RSD (según las siglas en inglés). Este equipo es una adaptación desarrollada por el CSIR (Consejo Sudafricano para la investigación) con el cual se puede medir la deflexión causada en una estructura de pavimento ante el paso de la rueda del equipo HVS.

Es necesario señalar que en el LanammeUCR se han desarrollado las herramientas necesarias para realizar los procesamientos y cálculos intermedios de los datos. Las mismas permiten apreciar y aprovechar los datos, particularmente se han calculado los diferentes parámetros para cada una de las mediciones realizadas.

El principal aporte de los ensayos acelerados es poder apreciar la evolución de la condición de las estructuras a lo largo de toda la vida útil. Las Figuras 6 y 7 muestran cómo varían los indicadores estructurales BLI y Radio de Curvatura a lo largo del proceso de ensayo en el PaveLab (Laboratorio de Pavimentos) del LanammeUCR, utilizando la fosa de ensayos con humedad incluida.

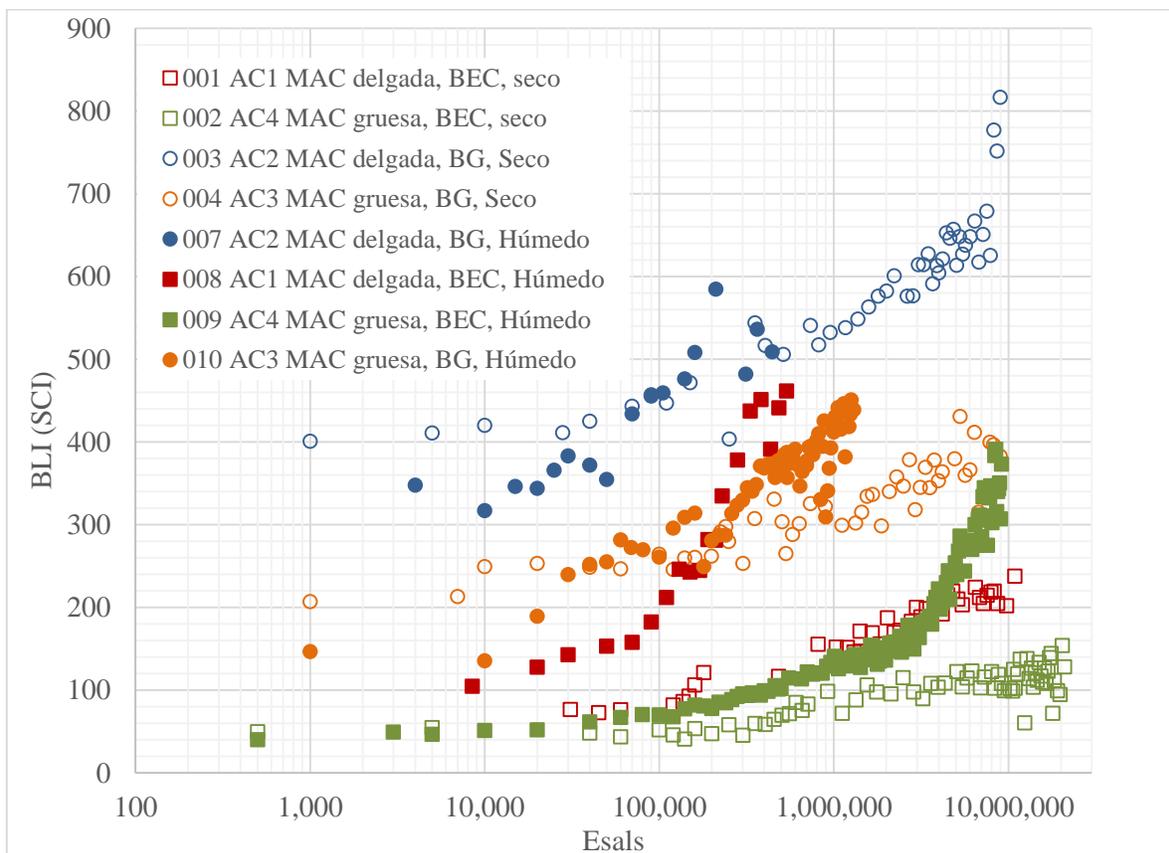


Figura 6. Variación del parámetro BLI para los diferentes tramos ensayado con el HVS

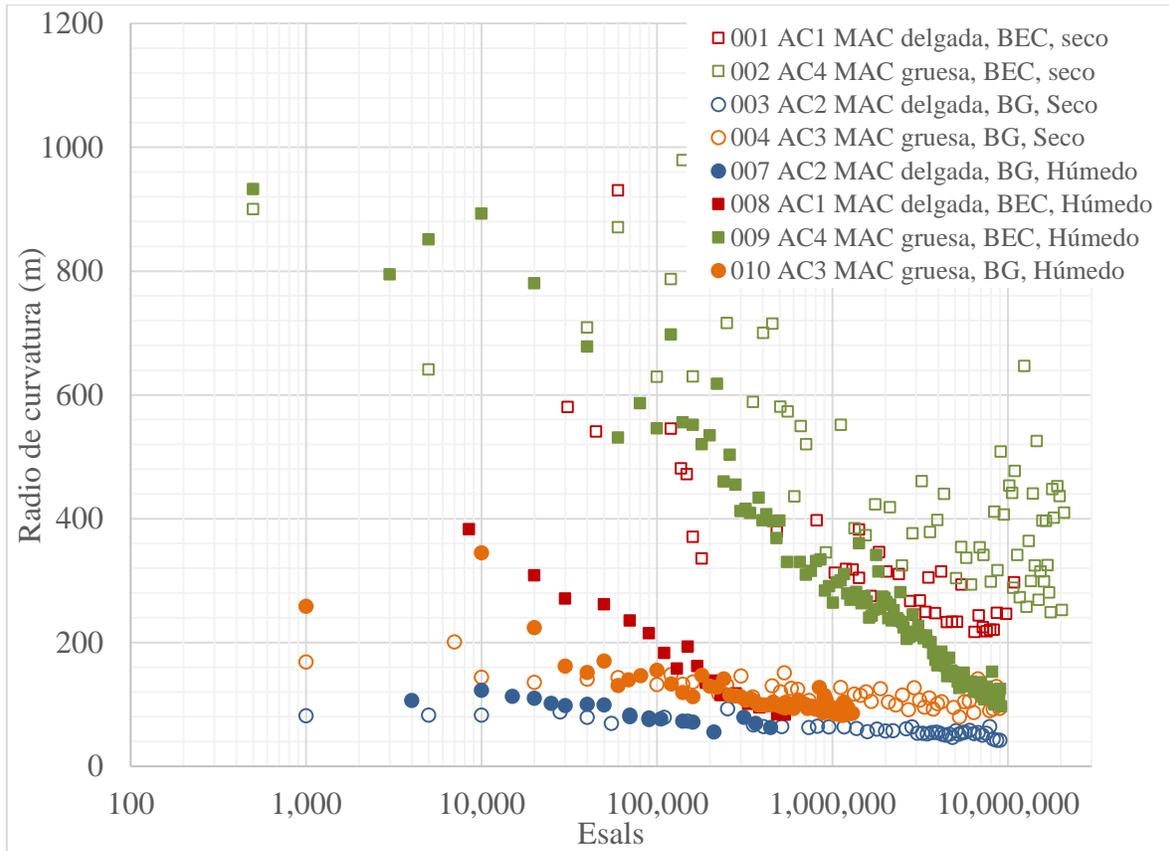


Figura 7. Ejemplo de variación del parámetro MLI para el tramo 009AC4H

### 3.1.2 Análisis mediante relación de AREA normalizada

El principal inconveniente presentado por el parámetro AREA introducido por los autores Hoffman y Thompson (1981), fue ignorar el aporte estructural de la subrasante a la rigidez conjunta del pavimento, por lo tanto, este parámetro debe ser usado en conjunción con algún otro indicador de rigidez para solventar dicha falencia. Por otro lado, diversos autores tales como Ullidtz (1987), Appea (2003) y Saleh (2015), han concluido que la contribución de la subrasante está entre el 60 y 80% de la deflexión máxima, incluso a veces hasta el 95% (Mehta & Roque, 2003). Igual que en el caso anterior, es ineficiente si es utilizado exclusivamente para la evaluación estructural del pavimento.

Saleh (2015) afirma que la relación de AREA normalizada ( $A_r'$ ), a diferencia de su antecesor el parámetro AREA, posee la capacidad de incluir el efecto causado por la subrasante dentro de la evaluación de la rigidez conjunta del pavimento. Por lo tanto, un pavimento que presenta valores bajos de esta relación está constituido de capas débiles por encima de la subrasante, así como también de una subrasante débil. Por el contrario, si los valores son altos se traduce en capas fuertes colocadas



sobre una subrasante fuerte. Esta estrecha relación entre el aporte de la subrasante y la relación de AREA normalizada se pudo apreciar en las pistas del PaveLab, la Figura 8 evidencia una alta correlación entre la deflexión máxima medida y la relación de AREA normalizada; lo que reafirma lo expuesto previamente.

Como era de esperarse, la inclusión de agua en las estructuras en forma de nivel freático permite apreciar las diferencias en cuanto al comportamiento estructural. En el estado seco se marca notablemente la diferencia de rigideces entre las estructuras con base estabilizada y las que poseen base granular; por otro lado, en el estado húmedo se puede apreciar que el comportamiento entre los dos tipos de estructuras está significativamente influenciado por la pérdida de capacidad de las capas inferiores y de mayor sensibilidad a la humedad (subbase y subrasante).

Otra de las ventajas que presenta el parámetro AREA normalizada, es la gran sensibilidad que posee para presentar los contrastes entre estructuras con diferente espesor en la capa de rodadura (capa delgada o gruesa), material en alguna de las capas. En este caso la base (estabilizada con cemento y granular), condiciones de humedad, así como también anomalías debidas a limitaciones o variaciones en la etapa constructiva que comprometen la capacidad estructural conjunta del pavimento.

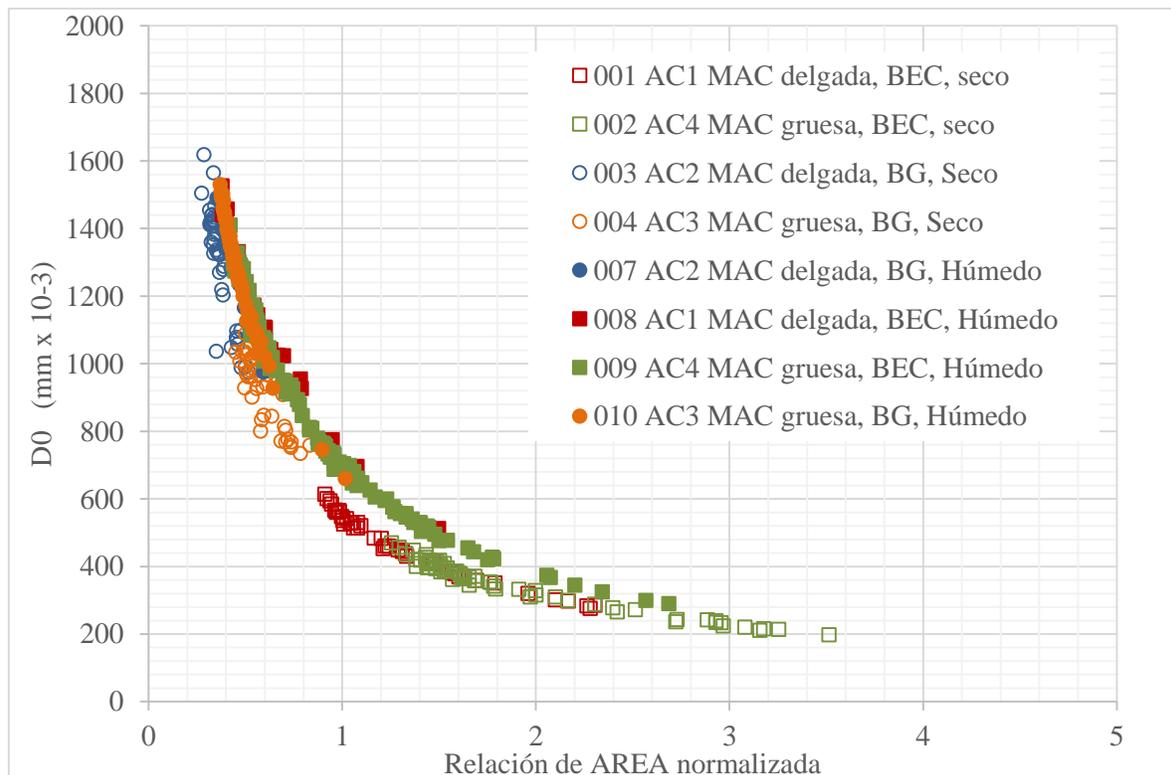


Figura 8. Parámetro AREA normalizada contra deflexión máxima medida para los diferentes tramos de ensayo.



En la Figura 9, se puede visualizar el deterioro de las estructuras en estado seco utilizando este parámetro. En las estructuras con capas delgadas es evidente que la rigidez conjunta es menor que las presentadas en las estructuras con capas gruesas, lo anterior repercute en la cantidad ejes equivalentes (carga de las ruedas) que pueden soportar.

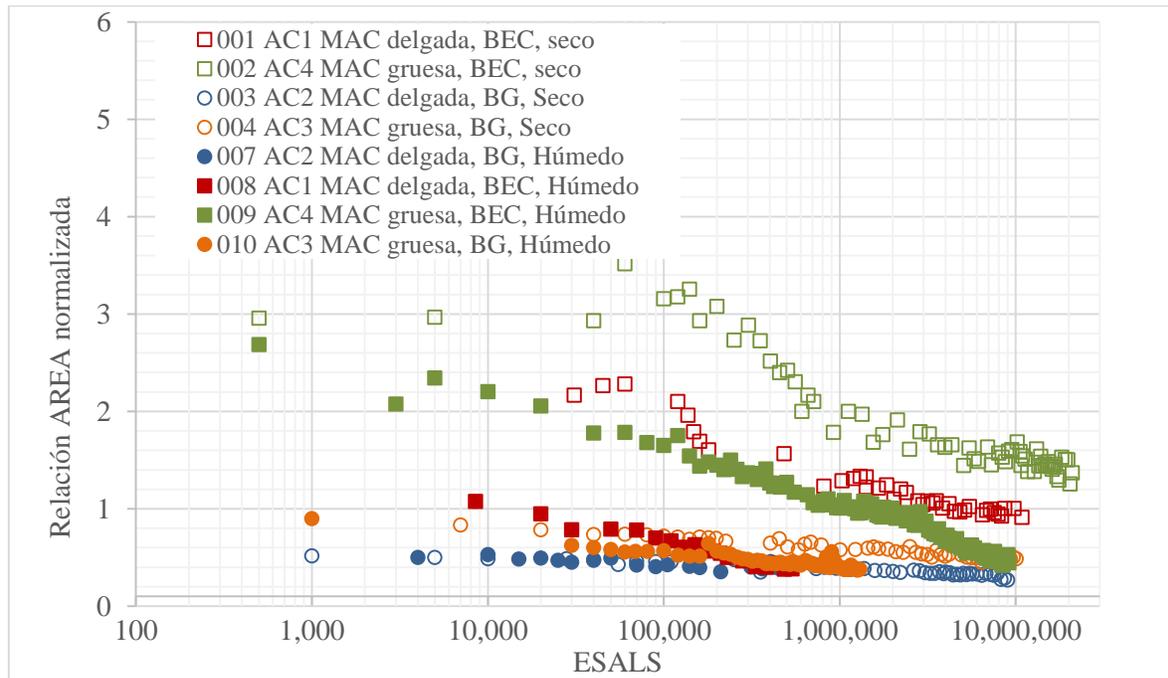


Figura 9. ESALS contra Relación de AREA normalizada para los diferentes tramos ensayados.

Además, en la Figura 9 es posible apreciar disminución de la capacidad estructural en una sección de las pistas que poseen base estabilizada en condición seca, esto se puede apreciar especialmente a las pistas con capa delgada de mezcla asfáltica. Lo cual se asocia a la pérdida gradual de rigidez de las capas.

En la Figura 9 se observa también la disminución considerable en los valores de la relación de AREA normalizada, pasando de valores máximos cercanos a 3.5 (capa gruesa) en estado seco a valores máximos cercanos a 2.7 en valores húmedos (capa gruesa); también es posible visualizar la caída significativa de magnitud en la rigidez, la cual se puede asociar a diferentes factores dentro de los cuales se encuentran el efecto de incompresibilidad y presión de poros en las épocas tempranas de la estructura.

Esta aparente rigidez disminuye considerablemente a medida que el pavimento sufre deterioro debido a las cargas, ya que se generan grietas por donde el agua puede ser evacuada al exterior. Otro factor que influye es la poca capacidad que muestran las capas inferiores ante la presencia de humedad, causando un deterioro de las capas frágiles de la estructura.



La deformación permanente es un deterioro que está altamente relacionado con las deformaciones unitarias a compresión presentadas tanto en las capas subyacentes a la subrasante; por lo tanto, muchos modelos de ahuellamiento encontrados en la literatura contemplan como principales variables la utilización de dichas deformaciones unitarias a compresión. Leiva et al. (2017) presentaron un modelo de deformación permanente a partir de las deflexiones superficiales medidas en un ensayo acelerado de pavimento. En este estudio se probó la alta correlación presentada entre las deflexiones superficiales y la deformación permanente, lo que evidencia el potencial de las evaluaciones de los ensayos no destructivos en los pavimentos.

Saleh (2016b) presentó la alta correlación existente entre la deformación unitaria a compresión elástica en la fibra superior de la subrasante con la relación de AREA normalizada, alcanzando valores de coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9047, lo que también presentaría una fuerte correlación con la deformación permanente de la estructura de pavimento.

En la Figura 10 se presenta la relación entre la deformación permanente y la relación AREA normalizada para las pistas del PaveLab tanto en estado seco como en el húmedo. Es posible apreciar la gran correlación entre estas variables, lo que reafirma lo expresado por Saleh (2016b) con relación a la utilización de este parámetro como indicador para el deterioro y la vida útil de la estructura de pavimento.

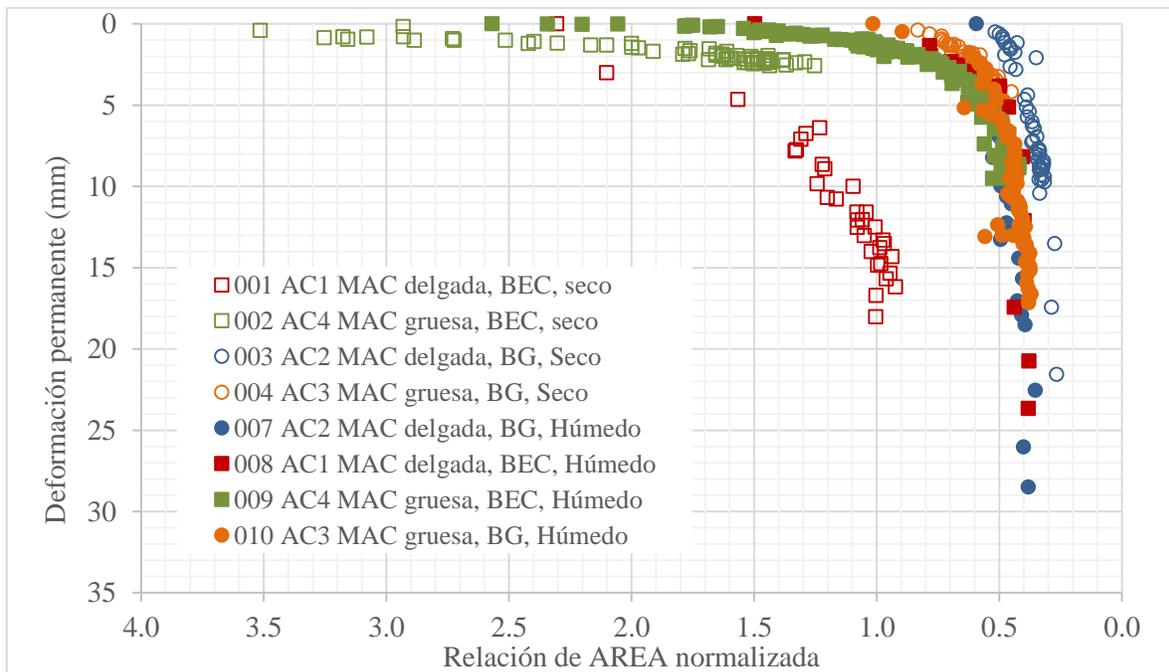


Figura 10. Relación de AREA normalizada vs deformación permanente para las pistas



### 3.1.3 Análisis mediante BLI, MLI y LLI

Los parámetros BLI, MLI y LLI permiten la visualización de la capacidad estructural presentada en la parte superior, medio e inferior respectivamente del pavimento evaluado. El parámetro BLI (SCI) es el altamente sensible a las propiedades de la capa de mezcla asfáltica, mientras que es mucho menos sensible a las propiedades de la capa base. El parámetro MLI (BDI) presenta una elevada sensibilidad a las propiedades de la capa base, mientras que el parámetro LLI (BCI) presenta alguna sensibilidad a la capa base y subbase y una elevada sensibilidad a la capa subrasante (Xu, et.al., 2002).

En la Figura 11 se presenta la evolución del parámetro BLI a medida que es aplicada la carga de las llantas a través del tiempo. En el estado seco se puede apreciar la gran diferencia en rigidez al aumentar el espesor de la capa de mezcla asfáltica en la estructura que utiliza material granular como capa de base, este mismo comportamiento se evidencia al incluir el agua a nivel freático en el sistema (estado húmedo), lo cual sugiere un aumento en la rigidez aparente de la estructura con humedad, el deterioro para este tipo de pavimentos ocurre en las capas inferiores de forma acelerada, presumiblemente debido a la presión de poro.

Por otro lado, en estado seco los tramos de pavimento que poseen base estabilizada con cemento tienen comportamientos similares. En estado húmedo se nota un gran desmejoramiento en la rigidez en comparación con el estado seco, lo que sugiere que el aumento de humedad afecta notablemente la capacidad estructural en las capas superiores de este tipo de pavimentos.

En las Figura 12 y 14 se presenta la evolución del parámetro MLI y LLI, respectivamente. Tanto en el estado seco como en el húmedo a través del tiempo. En el caso del MLI se puede notar un cambio significativo en el valor de la rigidez cuando se utiliza base estabilizada con cemento (marcadores cuadrado en el gráfico); con la excepción del tramo 008 donde se apreciaron bombeos de material de las capas inferiores, producto de la presión de poro existente.

En el caso del LLI se puede apreciar el efecto que tiene la rigidez de las diferentes estructuras y la respectiva reacción del suelo y capas inferiores debido a la condición de esfuerzos a la que están sometidos. En condiciones secas las estructuras con base estabilizada generan una reacción similar, con valores cercanos a 50; de forma similar los tramos ensayados en condición seca y base granular se mueven entre valores de 100 y 170.

La baja variación en los valores de rigidez para las estructuras lo que confirma lo observado en los parámetros BLI y MLI para el estado seco, en el que el mayor deterioro ocurre en las capas superiores e intermedias del pavimento.

Por otra parte, en estado húmedo el comportamiento es diferente debido a que las estructuras han sufrido una pérdida significativa en rigidez, a lo largo de las aplicaciones de las cargas, en especial en los pavimentos con capas gruesas. Lo que indica que al incluir humedad al sistema las capas de



pavimento se comportan de manera conjunta, disminuyendo de manera similar la rigidez en todas las capas del pavimento.

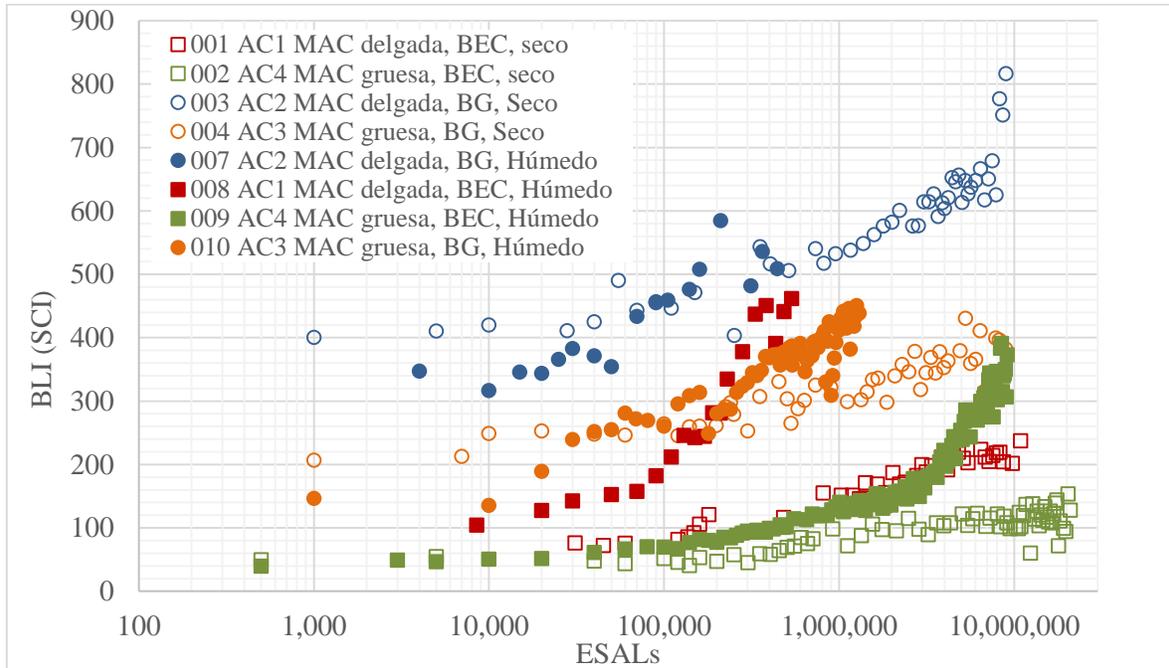


Figura 11. ESALs vs BLI para los diferentes tramos ensayados.

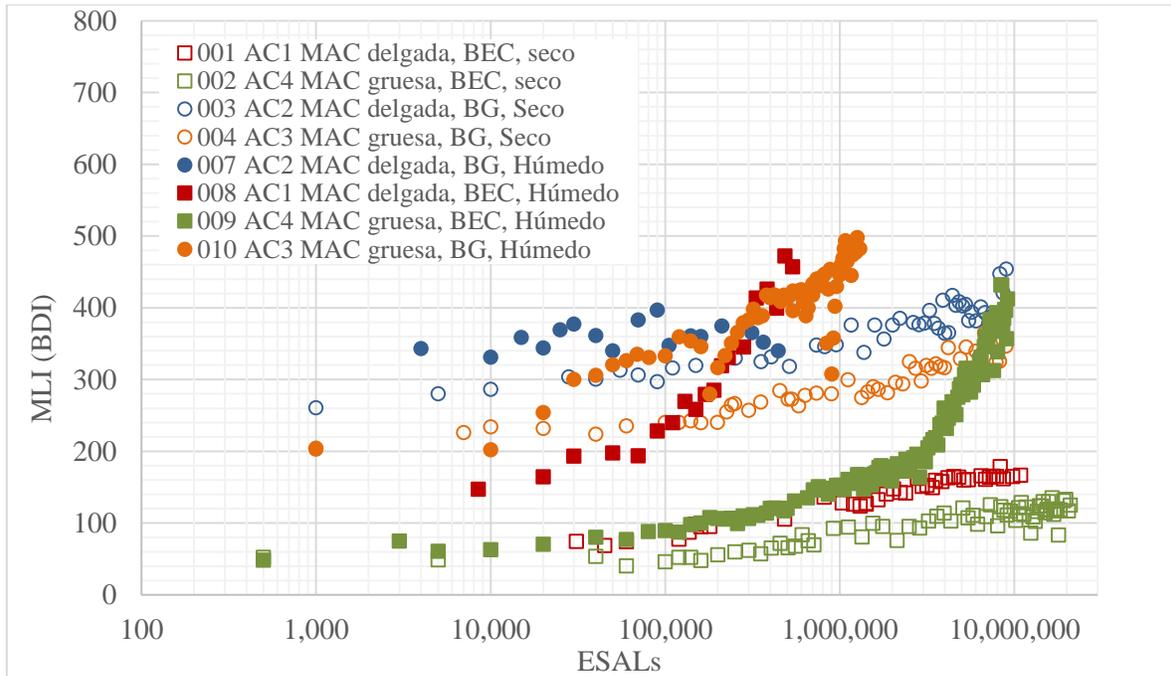


Figura 12. ESALs vs MLI para los diferentes tramos ensayados.

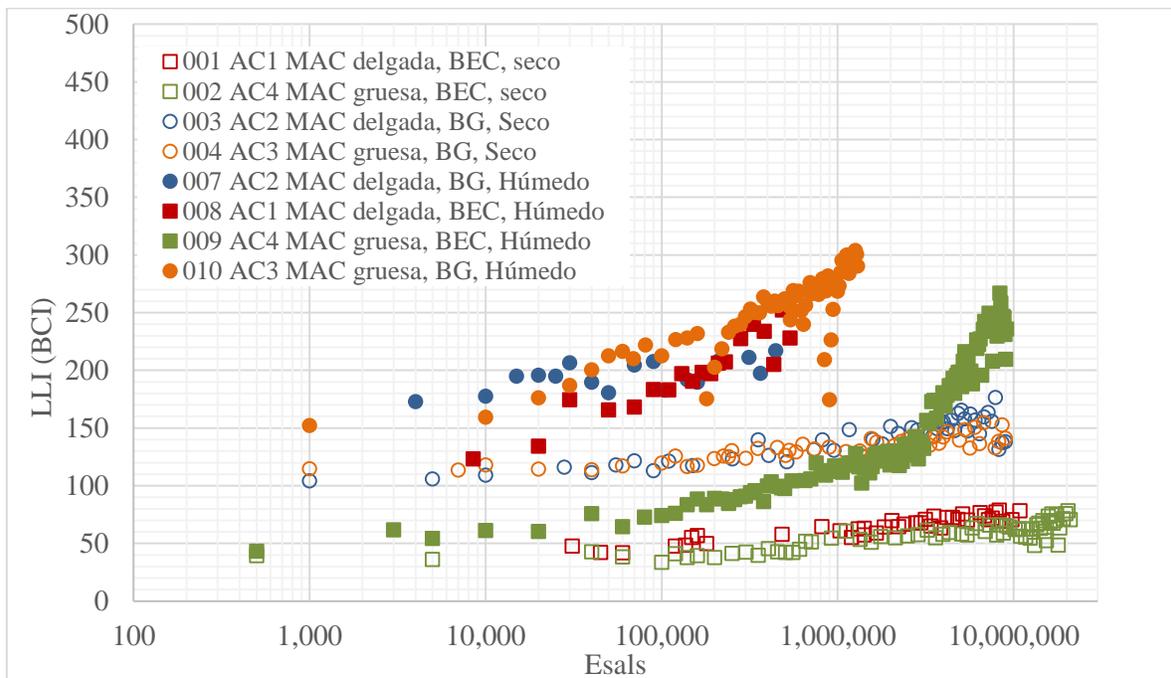


Figura 13. ESALs vs LLI para los diferentes tramos ensayados



### 3.2 Evaluación de la Red Vial Nacional de Costa Rica 2004-2016

Desde el año 2004 Costa Rica, mediante el LanammeUCR recolecta información de la condición estructural de las rutas mediante FWD (Figura 14) que componen la Red Vial Nacional. Estos datos son aprovechados en diferentes niveles, siendo el primer paso el análisis que se ha venido realizando respecto de los cambios en la deflexión principal.



Figura 14. Deflectómetro de Impacto (FWD)

A nivel de la red evaluada, no se cuenta con datos suficientes de las características de las capas que conforman las estructuras (espesores, condición, características físicas y otros). Debido a lo anterior, es complejo que se pueda analizar la condición de las estructuras mediante procesos de retrocálculo de módulos, modelaciones u otros criterios mecánicos tradicionales para diagnosticar la condición estructural.

A forma de referencia se muestran a continuación algunos gráficos (Figuras 16 a 20) preparados a partir de los datos de FWD por parte del LanammeUCR para las evaluaciones de la red vial nacional de los años 2004 y 2016, utilizando los parámetros producto de las deflexiones indicados anteriormente (Sanabria-Sandino, Barrantes-Jimenez, & Loría-Salazar, 2017).

Como referencia se incluyen los rangos de colores presentados por Horak (2008). Estos fueron desarrollados a partir de evaluaciones visuales de la condición de la superficie. Las variaciones en los rangos son definidas según el tipo de base utilizada en la estructura (granular, estabilizada con cemento o estabilizada con asfalto), se presentan los valores asignados para bases granulares como ejemplo.

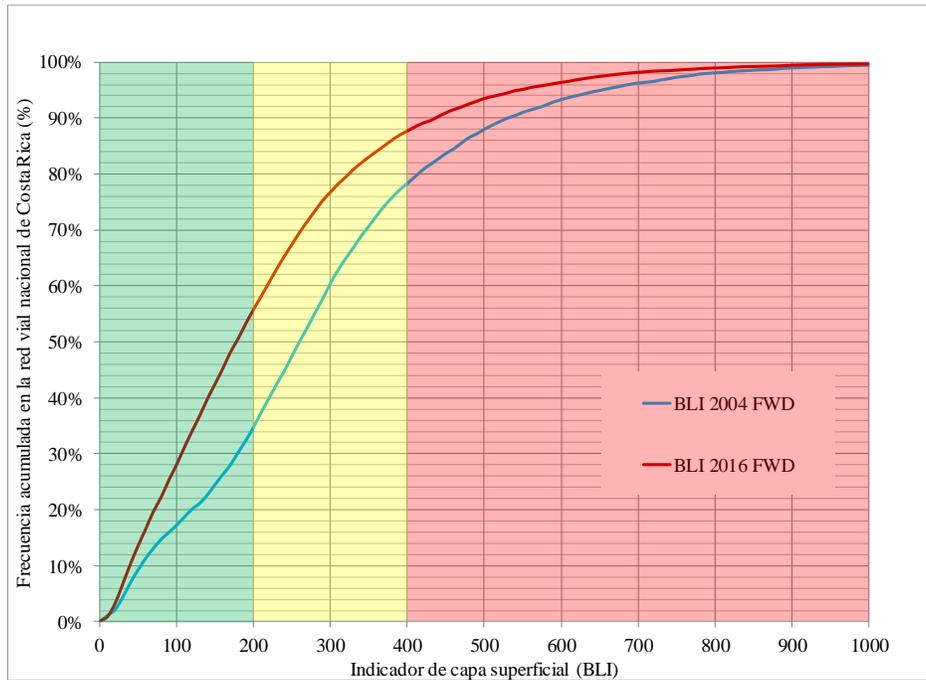


Figura 15. Frecuencia acumulada de los valores de BLI, a partir de los datos de deflectometría recolectados por LanammeUCR 2004 y 2016.

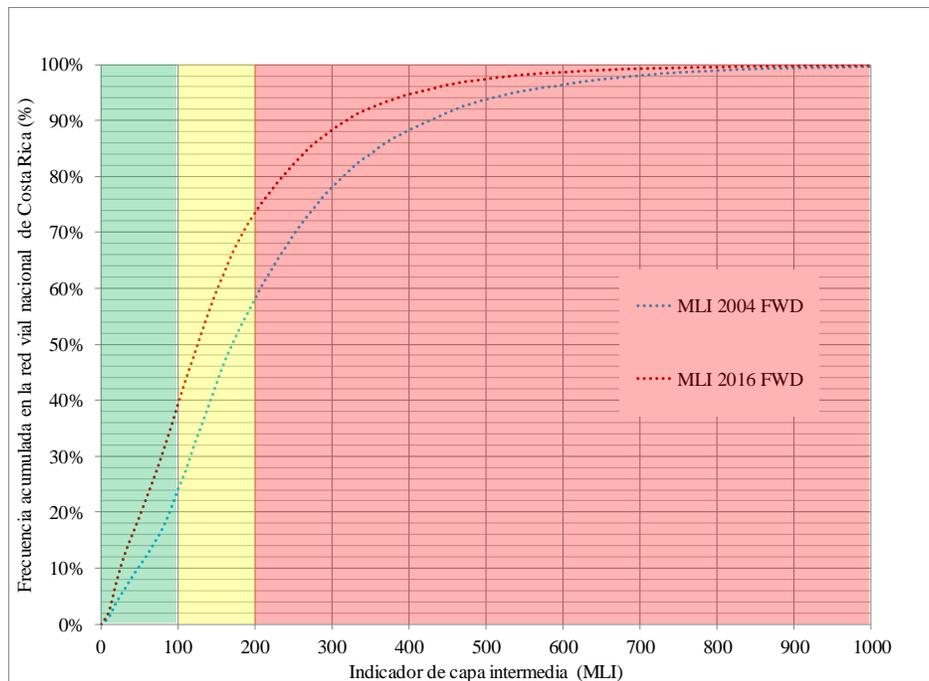


Figura 16. Frecuencia acumulada de los valores de MLI, a partir de los datos de deflectometría recolectados por LanammeUCR 2004 y 2016.

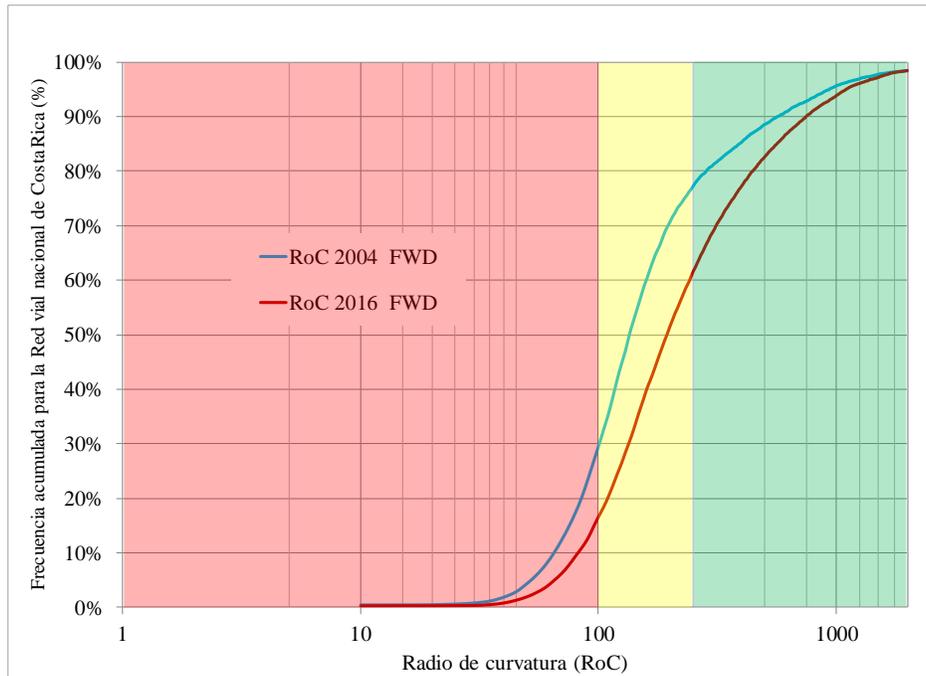


Figura 17. Frecuencia acumulada de los valores de Radio de Curvatura, a partir de los datos de deflectometría recolectados por LanammeUCR 2004 y 2016.

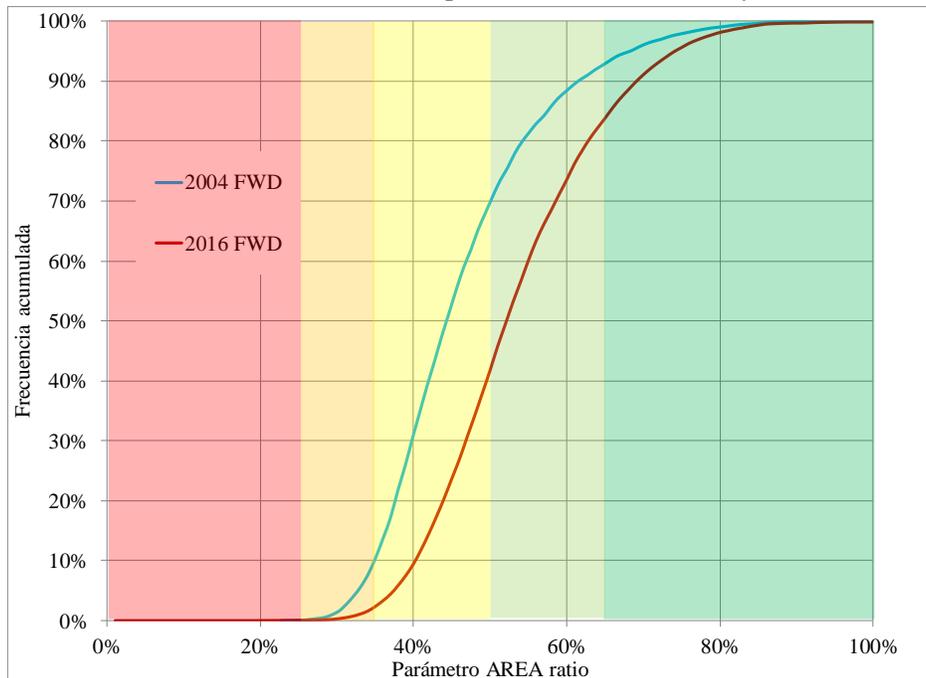


Figura 18. Frecuencia acumulada de los valores del parámetro relación de área (area ratio), a partir de los datos de deflectometría recolectados por LanammeUCR 2004 y 2016.

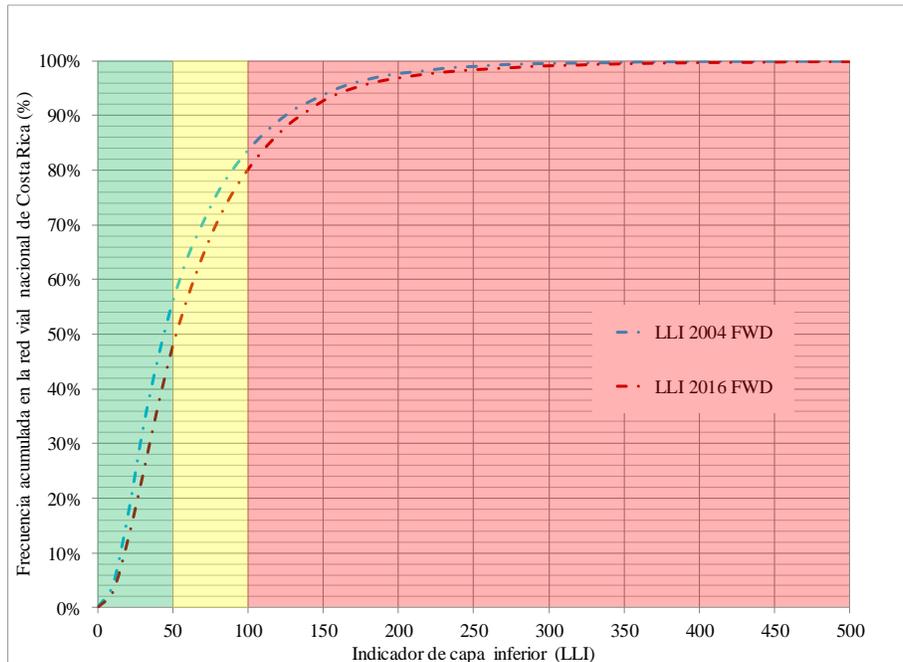


Figura 19. Frecuencia acumulada de los valores de LLI, a partir de los datos de deflectometría recolectados por LanammeUCR 2004 y 2016.

Los datos recolectados en las campañas de evaluación de la Red Vial Nacional evidencian una gran diversidad de estructuras, condiciones y evoluciones de la condición; esto producto de las políticas de mantenimiento y conservación vial durante al menos 12 años.

La Figura 15 muestra los valores de BLI para el período en referencia, en donde se puede apreciar cómo se han mejorado las condiciones de las capas superiores de toda la red vial. Estas capas están expuestas a las diferentes condiciones atmosféricas, causando oxidación y deterioros en los materiales, por lo que han sido objeto de las mayores inversiones producto de las estrategias de conservación desarrolladas en los últimos años.

El parámetro MLI ha resultado ser un indicador significativo del daño causado por el eje tipo tándem utilizado por el equipo HVS dentro del proyecto PaveLab. Esto asociado a la profundidad de la estructura que está siendo afectada por la forma de la carga y la magnitud de esta.

Además, en la Figura 16 se puede apreciar que para los datos a nivel de red analizados se observa una mejora en los datos de MLI. Sin embargo, es importante mencionar que solamente un 40% de los datos muestran valores inferiores a 100. Esta condición compromete el soporte de las capas superiores de las estructuras, aumenta las deflexiones y reduce la vida útil de una fracción significativa de la red vial.



En la Figura 17 se observa el cálculo del Radio de Curvatura, dicho indicador ha mostrado una buena correlación en el laboratorio. Particularmente se marca una diferencia entre estructuras de mayor rigidez como valores límite de 100 metros, y 50 metros para estructuras de mayor flexibilidad. Para el período analizado de los datos de red vial se observa una sensible mejora. Es importante notar que las políticas de intervención se han enfocado en las capas superiores; zona donde el indicador tiene mayor relevancia.

La Figura 18 muestra un aumento de las condiciones de rigidez global a nivel de red, esto como producto de la gran cantidad de recursos que se han invertido en los 12 años analizados. Como se ha observado en los ensayos acelerados este indicador se limita a mostrar la rigidez general de las estructuras. Es decir, puede existir un deterioro de las capas del pavimento, sin que exista una pérdida significativa de la rigidez global.

En la Figura 20 se resalta la pérdida de capacidad en capas inferiores, es importante apreciar que mejorar la condición de estas capas implicaría trabajos de profundidad significativa en las estructuras, condición que se podría estar marginando de las políticas actuales de conservación vial.

A continuación, la Figura 21 muestra una propuesta de combinación de indicadores, a partir de la cual se han generado diferentes comparaciones para mejorar la perspectiva en el análisis de los datos, estas permiten comparar indicadores y capas superficiales, intermedias o inferiores según se requiera.

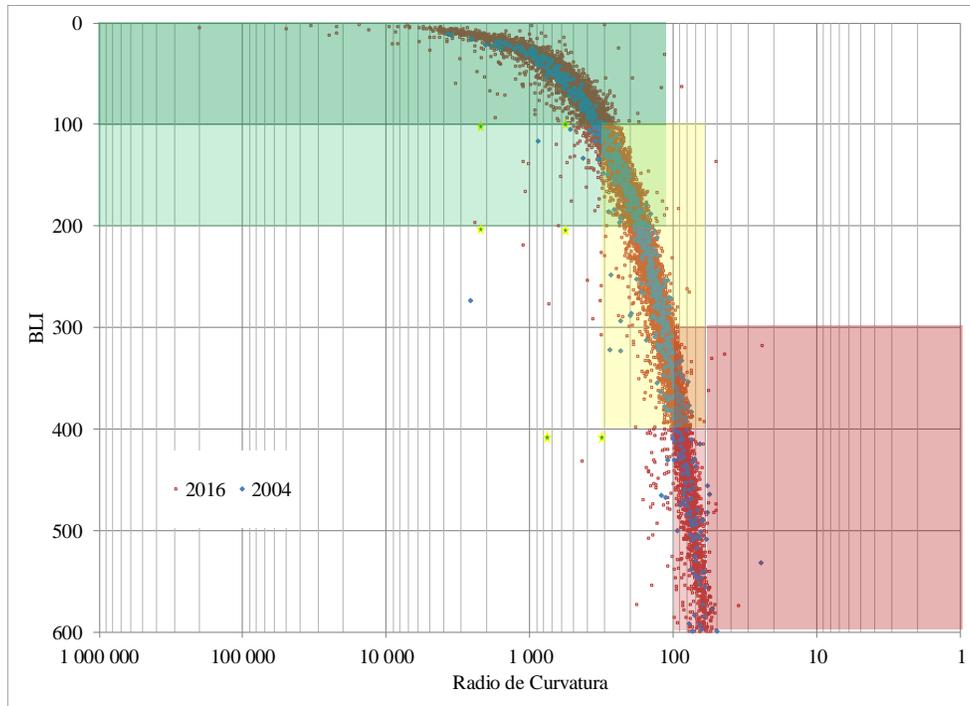


Figura 20. Relación entre el Radio de Curvatura y BLI, deflectometría recolectados por LanammeUCR 2004 y 2016.



Al combinar el Radio de Curvatura y el BLI se utilizan los tres primeros sensores del deflectómetro de impacto (FWD), o su equivalente en otros equipos. Esta relación permite evaluar la condición de la superficie de la estructura de pavimento, así como visualizar la forma en que el daño evoluciona conforme la vida útil de las capas superiores se reduce.

En las Figuras 21 a 23 se muestran los datos de las mediciones de FWD en las evaluaciones de la red vial nacional analizados (2004 y 2016) incluyendo zonas verdes, amarillas y rojas, basadas en los límites propuestos por Horak (2008). Con esto se puede apreciar la amplia variedad de condiciones estructurales presentes.

Un elemento que resalta es la variación entre los límites planteados por Horak, de los valores de relación obtenidos, estas variaciones dependen de la condición de daño de la estructura (como ya se mencionó) y también dependen de la rigidez de las diferentes capas.

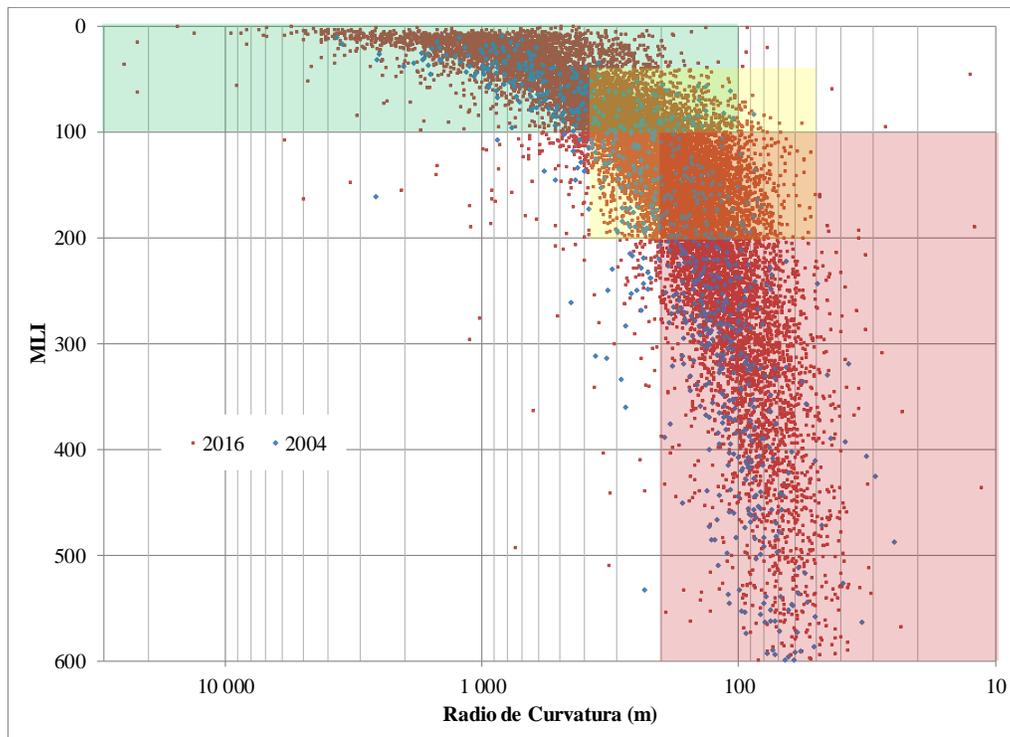


Figura 21. Relación entre el Radio de Curvatura y MLI, datos ERVN 2004 y 2016.

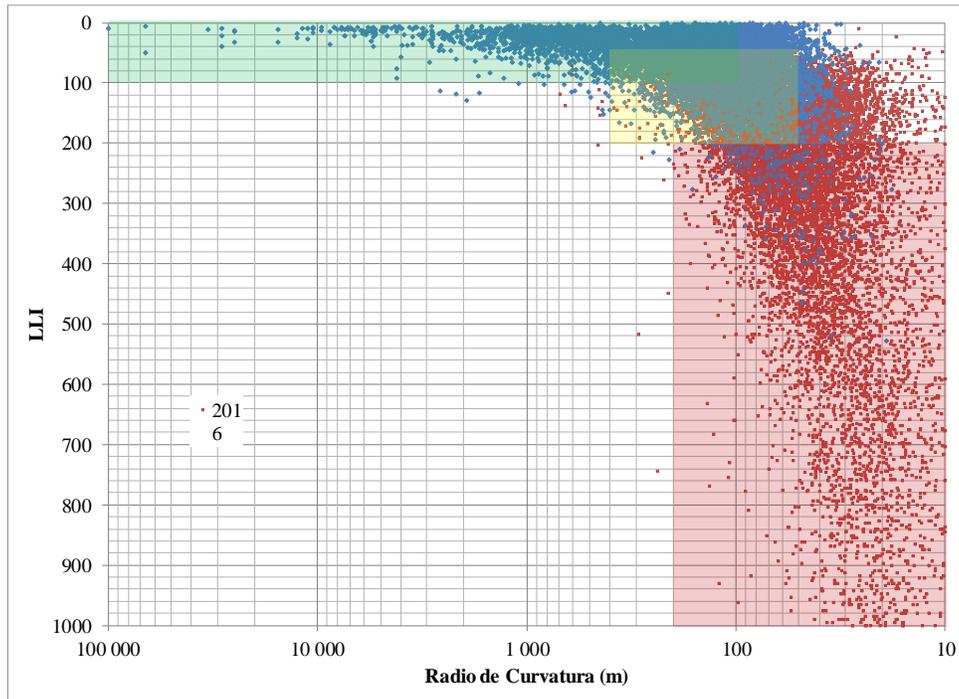


Figura 22. Relación entre el Radio de Curvatura y LLI, datos ERVN 2004 y 2016.

Mediante la aplicación detallada de los elementos indicados se podrían plantear estrategias de conservación vial orientadas a la atención de las zonas de las estructuras de pavimento que presenten deficiencias. Particularmente se debe notar que la mejora de las capas intermedias reducirá de forma significativa la magnitud de las deflexiones y el deterioro de las capas superiores, por lo tanto, limitará los agrietamientos y la necesidad de recurrir a estrategias de conservación vial con el uso intensivo de bacheos.



## 4 CONCLUSIONES

Se pudo demostrar que el uso de los indicadores y parámetros para el diagnóstico de estructura de pavimentos es un método numérico robusto, directo y confiable para el análisis de las estructuras. Particularmente resalta la capacidad de ser utilizado a diferentes niveles.

A nivel de Red Vial Nacional se han podido apreciar diferentes elementos de cómo ha evolucionado la red en los 12 años de datos apreciados con el uso de los indicadores. Sin embargo, es necesario profundizar en el análisis para realizar evaluaciones a nivel de las diferentes secciones de control en que el país está dividido.

Como un producto a futuro mediante el mejor uso de los diferentes indicadores presentados se espera una mejora en las políticas de conservación vial del país, particularmente en cuanto a identificar mejor la condición de las estructuras. Adicionalmente, se busca aplicar estrategias de conservación mejor dirigidas a atender la condición específica, o la zona de la estructura que presenta deterioro; así como identificar el momento más apropiado para realizarlo.

En lo inmediato, el uso de los parámetros ayudará a tener mayor claridad en los procesos de retrocálculo de módulos, particularmente para identificar tramos homogéneos y los sectores de la estructura que presenten mayor o menor deterioro. En razón de lo anterior se recomienda que previo a ejecutar los retro-cálculos se calculen y analicen los parámetros según sea el enfoque del análisis a realizar.

Capas de base varían su comportamiento según la rigidez que presenten, capas granulares admitirán valores límite más bajos (rangos donde la estructura presenta deflexiones altas, pero los deterioros no son graves). Es necesario ampliar el estudio de los límites para cada uno de los indicadores, particularmente para definir las ventanas de intervención de las estructuras.

La base de datos, tanto para datos a nivel de red vial, como en ensayos acelerados, continuará en desarrollo, y para esto se utilizarán los productos aquí mostrados como guía de la información. Así mismo es necesario aprovechar la información disponible en el mejor entendimiento del comportamiento de las estructuras.

Los indicadores estructurales presentados en este trabajo serán de gran ayuda en el análisis de las estructuras, por la posibilidad de comparar las condiciones y por ser aplicables a una amplia variedad de estructuras; principalmente por no requerirse la información de espesores y componentes detallados de la estructura para estimar de buena forma la condición.

Adicional a lo anterior estos indicadores poseen un gran potencial para ser incluidos eventualmente al proceso de diseño ya que la utilización de los ensayos acelerados permitiría la realización de funciones de transferencia más eficientes.



## 5 REFERENCIAS

- Ali, N. A., & Khosla, N. P. (1987). Determination of layer moduli using a falling weight deflectometer. En 1. Transportation research record, *Pavement evaluation and rehabilitation* (págs. 1-10). Washington, D. C.: Transportation Research Board.
- Anderson, D. (1977). The design of asphalt concrete overlays for flexible highway pavements. *Department of civil Engineering. University of California, Berkeley.*
- Appea, A. K. (2003). Validation of FWD testing results at the Virginia Smart Road: Theoretically and by instrument responses (Doctoral dissertation). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Aschuri, I., Yamin, A., & Widyasih, Y. D. (2016). *The use of waste plastic as a partial substitution aggregate in asphalt concrete pavement.* Indonesia.
- AUSTROADS. (1992). *Pavement Design. A Guide to the Structural Design of Road Pavements.* Sydney, Australia.
- Burhani, A. (2016). Correlation Study on the Falling Weight Deflectometer and Light Weight Deflectometer for the Local Pavement Systems (Doctoral dissertation). *Ohio University.*
- Camacho-Garita, E., Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J., & Loria-Salazar, L. (2014). *Proceso constructivo PaveLab (LM-PI-UMP-027-R1).* Costa Rica: Unidad de Materiales y Pavimentos\_Programa de infraestructura del transporte (PITRA)\_LanammeUCR.
- Ceylan, H., Guclu, A., Tutumluer, E., & Thompson, M. R. (2007). Backcalculation of full-depth asphalt pavement layer moduli considering nonlinear stress-dependent subgrade behavior. *International Journal of Pavement Engineering*, 171-182.  
doi:10.1080/10298430500150981
- Dehlen, G. (1962a). A simple instrument for measuring the curvature included in a road surfacing by a wheel load. *Civil Engineer in South Africa*, 4(9).
- Dehlen, G. (1962b). Flexure of road surfacings, its relation to fatigue cracking and factors determining its severity. *Highway Research Board Bulletin*.(321).
- Fontul, S. (2009). Structural Evaluation of Flexible Pavements using Non Destructive Tests. *Young Researchers Seminar 2009.* Torino.
- Fwa, T. F., Tan, K. H., & Li, S. (2000). Closed-Form and Semi-Closed-Form Algorithms for Backcalculation of Concrete Pavement Parameters. In *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Third Volume.* ASTM International.



- Hassani, A., Ganjidoust, H., & Maghanaki, A. A. (2005). *Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement*. Irán.
- Hoffman, M., & Thompson, M. (1981). *Mechanistic interpretation of nondestructive pavement testing deflections*. Interim Report Illinois Univ., Urbana-Champaign. Dept. of Civil Engineering.
- Horak, E. (1987). *Aspects of deflection basin parameters used in a mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavements in South Africa (Doctoral dissertation)*. University of Pretoria.
- Horak, E. (2008). Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 50(2), 2-9.
- Horak, E., & Emery, S. (2006). Falling weight deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavement structural evaluations. *In Research into Practice: 22nd ARRB Conference*.
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. New Jersey: Pearson Education.
- Irwin, L. H. (2002). Backcalculation: An overview and perspective. *Pavement Evaluation Conference, 2002*. Roanoke, Virginia, USA.
- Jameson, G. (2006). Austroads asphalt overlay fatigue life prediction. *En Research into Practice: 22nd ARRB Conference*. Canberra, Australia.
- Jordaan, G., & deBruin, P. (2004). Advanced use of the cumulative sum of deviations method to identify uniform pavement sections. *In Recent Advances in Materials Characterization and Modeling of Pavement Systems*, 193-208.
- Kilareski, W., & Anani, B. (1982). Evaluation of in situ moduli and pavement life from deflection basins. *Proc. 5th Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements. Vol. 1*.
- Kim, Y., & Park, H. (2002). Use of FWD multi-load level data for pavement strength estimation. (Report No. FHWA/NC/2002-006 for the North Carolina Department. *Raleigh, NC*.
- Kim, Y., Lee, Y., & Ranjithan, S. (2000). Flexible pavement condition evaluation using deflection basin parameters and dynamic finite element analysis implemented by artificial neural networks. *In Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Third Volume*, ASTM International.
- Leiva-Villacorta, F., Vargas-Nordbeck, A., & Aguiar-Moya, J. (2017). Permanent deformation and deflection relationship from pavement condition assessment. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(4), 352-359.



- Little, D. (1980). *The Dual Parametric Approach To The Analysis Of Surface Deflection Data*. College Station, Texas: Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System.
- Mallick, R., & El-Korchi, T. (2013). *Pavement Engineering Principles and Practice* (Second ed.). CRC Press.
- Mehta, Y., & Roque, R. (2003). Evaluation of FWD data for determination of layer moduli of pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1), 25-31.
- Moghaddam, T. B., Soltani, M., & Karim, M. R. (2013). *Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture*. Malasia: Journal of Engineering Science and Technology.
- Park, H. (2003). Use of FWD multi-load level data for pavement strength estimation (Doctoral dissertation). *North Carolina State University*.
- Rahman, W. M., & Wahab, A. F. (2013). *Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt*. Malasia: Elsevier Ltd.
- Rahman, W. M., Wahab, A. F., & Yahaya, F. (2014). *Optimisation of recycled high density polyethylene pellet as aggregate replacement for road pavement*. Malasia: Journal of Engineering and Technology.
- Saleh F., M. (2015). Multi-Scale Criteria for Structural Capacity Evaluation of Flexible Pavements at Network Level. *In Transportation Research Board 94th Annual Meeting (No. 15-2397)*.
- Saleh F., M. (2016b). A Mechanistic Empirical Approach for the Evaluation of the Structural Capacity and Remaining Service Life of Flexible Pavements at the Network Level. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(8), 749-758. doi:10.1139/cjce-2016-0060
- Saleh, M. (2016a). Simplified approach for structural capacity evaluation of flexible pavements at the network level. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(5), 440-448.
- Sanabria-Sandino, J., Barrantes-Jimenez, R., & Loría-Salazar, L. (2017). *Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica*. San Pedro, San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Sanghaleh, A., Pan, E., Green, R., Wang, R., Liu, X., & Cai, Y. (2013). Backcalculation of pavement layer elastic modulus and thickness with measurement errors. *International Journal of Pavement Engineering*, 521-531.
- Talvik, O., & Aavik, A. (2009). Use of FWD deflection basin parameters (SCI, BDI, BCI) for pavement condition assessment. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 4(4), 196-196.



- Thompson, M. (1989). Area Under the Pavement Profile to Predict Strain. *In Informal Presentation at FWD Users Group Annual Meeting, Indianapolis, IN.*
- Thompson, M., & Elliot, R. (1985). ILLI-PAVE based response algorithms for design of conventional flexible pavements. *Transportation Research Record, 1043*, 50-57.
- Thompson, M., & Garg, N. (1997). Mechanistic-Empirical Evaluation of the Mn/ROAD Low Volume Road Test Sections. *Project IHR-535, University of Illinois at Urbana-Champaign.*
- Ullidtz, P. (1987). *Pavement analysis. Developments in civil engineering.* Elsevier, Amestrdam, 3(5556), 034.
- Uzan, J., Lytton, R. L., & Germann, E. P. (1989). General procedure for Backcalculating Layer Moduli. En A. J. III, & G. Y. Baladi, *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM STP 1026* (págs. 217-228). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Vaswani, N. (1971). Method for separately evaluating structural performance of subgrades and overlaying flexible pavements. *HRB, Highway Research Record No. 362.*
- Xu, B., Ranji Ranjithan, S., & Richard Kim, Y. (2002). New relationships between falling weight deflectometer deflections and asphalt pavement layer condition indicators. *Transportation research record: journal of the transportation research board*(1806), 48-56.
- Zoorob, S., & Suparma, L. (2000). *Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt).* Reino Unido: Elvesier Science Ltd.