



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

COMPARATIVO DE SOFTWARES DE RETROCÁLCULO DAPS Y ELMOD PARA LA OBTENCIÓN DE MÓDULOS ELÁSTICOS

Andrea del Pilar Salinas Acosta¹, Ana Laura Gressi Jurado²,
Gerardo Jiménez Martínez³, Carlos Adolfo Coria Gutiérrez⁴

¹ Innova Pavimentos de México, Puebla, México, andrea.salinas@innova3.com.mx

² Innova Pavimentos de México, Puebla, México, ana.gressi@innova3.com.mx

³ Innova Pavimentos de México, Puebla, México, gerardo.martinez@innova3.com.mx

⁴ Ergon Asfaltos México, Puebla, México, carlos.coria@ergon.com

Resumen

El retrocálculo se utiliza para determinar los módulos elásticos de la estructura del pavimento asfáltico a partir de las deflexiones realizadas mediante equipos de alto rendimiento. Sin embargo, la variedad de softwares de retrocálculo disponibles en la actualidad puede generar variaciones en los resultados y en las estrategias de conservación propuestas para las carreteras. Por ende, en este estudio se realiza una comparativa entre dos herramientas clave utilizadas en este proceso que permite conocer los módulos de las capas del pavimento: los softwares DAPS y ELMOD. Mediante la aplicación de un mismo conjunto de datos de deflexiones recolectadas en campo bajo condiciones similares, se analiza la dispersión de resultados entre ambos programas para identificar correlaciones y se contrasta con un tercer software para verificar la consistencia de las mediciones. Esta correlación es de gran utilidad en el análisis y diseño de pavimentos, mejorando la precisión en los programas de conservación y mantenimiento. De esta manera, se implementan prácticas que reducen el consumo de recursos y energía durante la construcción y mantenimiento de pavimentos a lo largo de su ciclo de vida.

Palabras Clave: Retrocálculo, módulo elástico, pavimento asfáltico

1 Introducción

El retrocálculo se lleva a cabo mediante la medición de deflexiones de la superficie del pavimento por métodos no destructivos realizada por el deflectómetro de impacto. Este equipo es ampliamente utilizado para evaluar la condición estructural que proporciona los datos necesarios para el retrocálculo.

La metodología del retrocálculo, también conocida como retroanálisis, permite determinar los módulos de las capas que conforman la estructura del pavimento. Esto se logra utilizando parámetros clave como espesores, módulos elásticos iniciales o semilla, coeficiente de Poisson y otra información relevante necesaria para llevar a cabo el estudio.

Esta herramienta consiste en realizar comparaciones entre la cuenca de deflexiones medida en campo y la teórica. La cuenca teórica puede ser determinada por varios métodos: por programas de computación, por el conjunto de estructuras evaluadas y almacenadas en un banco de datos o por regresión estadística, mientras los métodos simplificados son aquellos que se realizan por medio de la utilización de ecuaciones, tablas y gráficos basados en la teoría de elasticidad. (Andrade Neto, Machado López, & Rufino, 2015). Sin embargo, en el proceso del retrocálculo existen dos técnicas para la evaluación de la capacidad estructural: La primera es retrocalcular los módulos in situ de todas las capas usando las deflexiones o la segunda es determinar su capacidad estructural mediante el módulo de la subrasante y la deflexión máxima.

En el diseño de pavimentos el retrocálculo juega un papel muy importante debido a que ha surgido mucho interés en enfocarse en la caracterización de insumos de diseño como el tráfico, clima y las condiciones de los materiales (Wulff, Hellrung, Ng, & Ksaibati, 2016). Resulta muy importante conocer las propiedades del suelo de soporte como lo son los módulos del pavimento debido a que a través de la obtención de ellos



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

se pueden establecer ciertas medidas y ayuda en la toma de decisiones para la rehabilitación. Por ejemplo, el módulo de la subrasante afecta en los espesores de las demás capas del pavimento. A partir de este, se define que tan robusta será la estructura, un suelo de soporte bueno, reducirá los demás espesores de las capas superiores. Esto no solo afecta en los costos, sino que también en la parte ambiental. Tener espesores de terracerías y carpeta más delgados se considera ecológico en el aspecto que el volumen de material que compone el pavimento es menor, lo cual reduce el consumo de energía desde la extracción hasta la colocación, reduce la generación de residuos y genera menor impacto a ecosistemas naturales ya que se reduce la necesidad de nuevas áreas de extracción y expansión de actividades asociadas con la construcción de carreteras.

A pesar de que existen varios métodos de rehabilitación de pavimentos, es necesario tener una metodología clara en la toma de decisiones considerando los recursos monetarios y ambientales destinados a la preservación de los pavimentos. Parte de establecer metodologías para el análisis del pavimento, está en minimizar la variación que existe dentro de las herramientas computacionales relacionadas al área de pavimentos. Existe una variación considerable en los resultados del retrocálculo por la variación del espesor de la capa de asfalto y la carga dinámica. No obstante, la variación de estos resultados también puede verse afectada por la cantidad de softwares relacionados al retrocálculo de módulos que hay en el mercado. Por ello, en este artículo se busca comparar dos softwares usados en México para el análisis de módulos como son el software DAPS y ELMOD. Ambas son herramientas computacionales utilizada para el diseño y dimensionamiento de pavimentos basadas en la metodología de multicapa elástica pero que pudieran llegar a tener variación en el análisis de módulos.

La implementación de prácticas que minimicen el uso de recursos y energía refleja un compromiso con la eficiencia y la responsabilidad. Este enfoque no solo mejora la sostenibilidad ambiental de las carreteras, sino que también optimiza los costos asociados con su construcción y mantenimiento a lo largo de su ciclo de vida.

2 Antecedentes

El procedimiento del retrocálculo es una metodología para determinar el módulo elástico de un material por medio de la medición de las deflexiones de la superficie del pavimento.

El retrocálculo es empleado debido a tres grandes avances en la ingeniería de pavimentos (Urbáez, 2007):

- a) El comportamiento del pavimento con la deflexión medida relaciona que los pavimentos con mayor rigidez tengan menores deflexiones y pavimentos con menor rigidez tengan mayores deflexiones. (1935 a 1960)
- b) El desarrollo de teorías mecanicistas que relacionan propiedades fundamentales de los materiales como esfuerzos, deformaciones y deflexiones en un sistema multicapas (1940 a 1970)
- c) El desarrollo de equipos de medición de deflexiones precisos, compactos, versátiles y transportables. (1955 a 1980).

Principalmente, la técnica del retrocálculo se emplea para que un conjunto inicial de valores característicos del módulo de elasticidad de las capas del pavimento realice el ajuste continuo hasta que la cuenca de deflexión estimada se aproxime lo suficiente a la cuenca de deflexión medida. Para ello, se requiere determinar la medida cuadrática que relaciona ambas cuencas de deflexiones mencionadas anteriormente mediante la ecuación 1 mostrada a continuación:

$$RMS (\%) = 100 \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \quad (1)$$

Donde:

RMS (Root Mean Square) = Media cuadrática.



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

n_d = Número de mediciones sobre la cuenca de deflexiones a diferentes distancias.

d_{ci} = Deflexión calculada.

d_{mi} = Deflexión medida.

Para realizar el análisis del retrocálculo, se requieren los espesores de las capas del pavimento de la carretera a analizar. Estos espesores pueden obtenerse mediante PCA (pozos a cielo abierto) o calas a distancias predeterminadas. También, puede utilizarse un equipo más sofisticado, no destructivo como lo es el GPR (Georradar).

Una vez obtenidos los espesores de las capas del pavimento, se realiza un larguillo donde se detalla el cadenamiento de la carretera y la estructura del pavimento.

El retrocálculo se realiza de forma iterativa tal y como se describe a continuación:

1. Parte de una estimación inicial de los módulos elásticos de las capas (módulos semilla)
2. A partir de los módulos, se calculan las deflexiones mediante el software de cálculo estructural.
3. Se comparan las deflexiones calculadas con las medidas. En caso de que sean suficientemente parecidas, se aceptan como válidos los módulos.
4. En caso de que el ajuste no sea satisfactorio se reajustan los módulos y se repite el proceso.

La forma o proceso de reajuste de los módulos está basado en métodos matemáticos para la resolución de sistemas no lineales y es el núcleo del proceso de retrocálculo. (Coria Gutierrez & Arciga Ramírez, 2017)

3 Desarrollo

3.1 Selección del sitio

El tramo de estudio, denominado Santa Bárbara-Izúcar de Matamoros, ha sido dividido en dos archivos distintos: Santa Bárbara 1 y Santa Bárbara 2. La selección de este tramo se basó en una serie de criterios específicos que debían cumplirse: disponibilidad de información de deflectometría y estratigrafía, pavimento asfáltico con un aporte estructural significativo, y acceso conveniente a datos climatológicos y de tránsito.

Este tramo carretero se encuentra ubicado en la parte suroeste del estado de Puebla, abarcando el trayecto desde Izúcar de Matamoros, Puebla hasta Jiutepec, Morelos. Es parte de la carretera federal No. 160, conocida como Libramiento Cuautla-Cuernavaca, la cual fue construida con el propósito de establecer una conexión entre la carretera México Cuautla con la carretera México Cuernavaca. El tramo seleccionado abarca desde el cadenamiento 110+700 hasta el cadenamiento 131+900, con una longitud total de 21.2 kilómetros. Se trata de una carretera tipo B2, caracterizada por contar con un carril por sentido de circulación y un ancho de calzada de 3.5 metros. La ubicación geográfica de la zona de estudio puede observarse en la Figura 1, la cual muestra la referencia en Google Earth.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

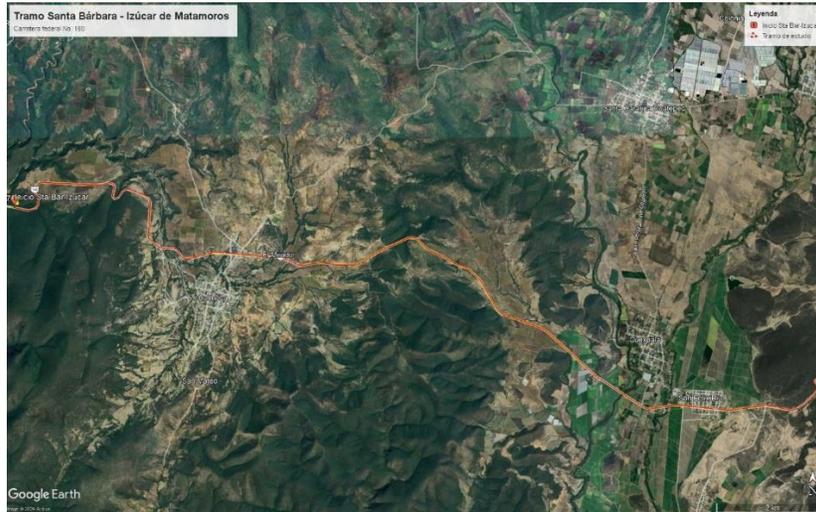


Figura 1. Tramo de estudio

3.2 Sección del pavimento

La estratigrafía del tramo de estudio está compuesta por una carpeta asfáltica con un espesor total de 21 cm, que contiene sobrecarpetas. Además, se identifica una base hidráulica con un espesor de 22 cm y una subrasante de igual espesor. El espesor del terraplén no es conocido. Para más detalles, consultar la Figura 2, la cual proporciona una representación detallada de la sección del pavimento asfáltico.

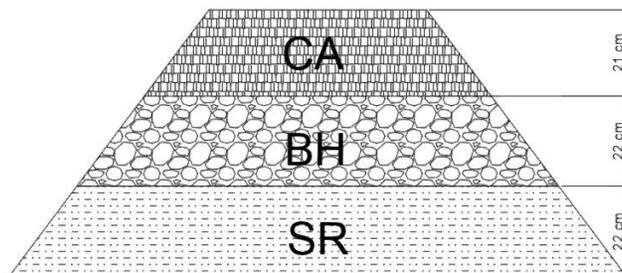


Figura 2. Estratigrafía del tramo de estudio

3.3 Clima de la zona

El tramo de estudio se encuentra ubicado en la región de la Mixteca Baja Poblana, caracterizada por pertenecer al trópico seco. Esta área experimenta lluvias principalmente durante los meses de verano y otoño. El ecosistema predominante en esta región es de tipo boscoso.

3.4 Procedimiento de retrocálculo

3.4.1 Retrocálculo en software *DAPS*



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

El DAPS (Deflection Analysis of Pavement Structures) es un método eficaz, preciso y fiable utilizado para realizar un análisis retroactivo de los resultados de deflexión de pavimentos. Este método se fundamenta en la teoría de la multicapa elástica, un enfoque matemático que calcula las respuestas de una estructura compuesta por múltiples capas de espesor finito, excluyendo la capa más superficial (Trejos Castillo, Rojas Perez, Loria Salazar, & Aguiar Moya). DAPS permite retrocalcular las pruebas realizadas por deflectómetros de impacto en estructuras de pavimento que constan de subrasante y hasta cuatro capas adicionales. Además, ofrece la opción de considerar un estrato rocoso representativo o de subdividir la capa de subrasante cuando sea necesario.

Se dispone de la opción de seleccionar diversos modelos de suelo para ajustar el cálculo según las propiedades específicas del suelo correspondientes a cada tipo de prueba. En este artículo, se utilizará el modelo CB/KS (Constant Depth to Bedrock/Known half-space).

Para llevar a cabo el procedimiento de retrocálculo de los datos obtenidos, se siguen los siguientes pasos:

1. Iniciar el software y cargar el archivo de datos crudos correspondiente (ver Figura 3).
2. Seleccionar el modelo de retrocálculo que se utilizará para el análisis de la última capa y definir la configuración del equipo utilizado para las deflexiones, incluyendo la distancia entre los geófonos bajo el arreglo de 0.00, 0.20, 0.30, 0.45, 0.6, 0.9 y 1.20 metros.
3. Establecer la estructura del pavimento, especificando el número de secciones del tramo de estudio, el número de capas, los módulos elásticos iniciales y los espesores de cada capa (ver Figura 4).
4. Una vez configurado, ejecutar el análisis y posteriormente el software mostrará los resultados en la pantalla principal después de un período de tiempo (ver Figura 5).

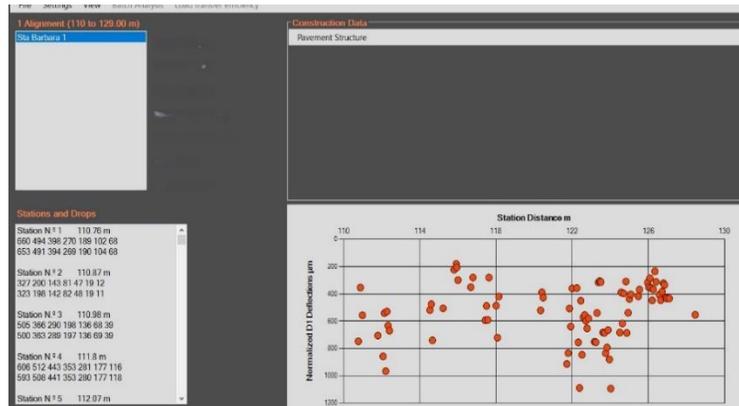


Figura 3. Interfaz inicial al seleccionar datos crudos



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.



Figura 4. Definición de la estructura del pavimento

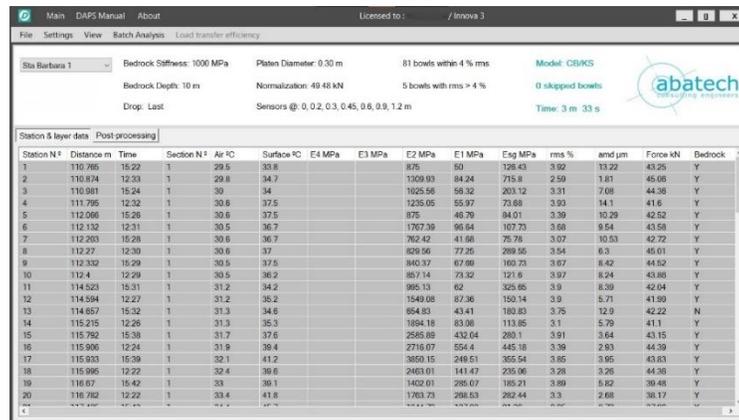


Figura 5. Ventana de resultados del retrocálculo

3.4.2 Retrocálculo en software *ELMOD*

El software Elmod 6.0, cuyas siglas corresponden a Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design (Evaluación de Módulos de Capa y Diseño de Sobrecapas), se utiliza para realizar el retrocálculo de datos obtenidos del equipo FWD, dado que el formato de archivo está limitado a los datos generados por este equipo. El análisis en Elmod se fundamenta en la teoría de Odemark, utilizando el método de espesores equivalentes para el retrocálculo.

Para llevar a cabo el procedimiento de retrocálculo de los datos obtenidos, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Iniciar el software Elmod y cargar el archivo de datos crudos correspondiente (ver Figura 6).
2. Establecer la estratigrafía del pavimento, incluyendo el número de secciones del tramo de estudio, el número de capas, los módulos elásticos iniciales y los espesores de cada capa (ver Figura 7).
3. Seleccionar el modelo de retrocálculo con el cual se realizará el análisis (ver Figura 8) y definir la teoría bajo la cual se realizará el análisis, ya sea Teoría de Elementos Finitos (FEM), Teoría Elástica Lineal (LET) o Método de Espesores Equivalentes (MET), utilizando un valor semilla. En este análisis de retrocálculo, se optó por la teoría LET.
4. Finalmente, ejecutar el retroanálisis y revisar los resultados obtenidos (ver Figura 9).



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Data view and editing

File: Sta Barbara-Izucar 1
Database: G:\shortcut-targets-by-id\19VWV5v7apGYNoANAjBkC5Pvea\HqaBaQ\Auscultacion\Articulo seminario AMAAC\Santa barbara 1 pr1.mde

Number of data points: 86
Number of drops: 2
Start Station: 110.765
End Station: 128.454
Date: miércoles, 24 de agosto

Number of active geophones: 7
Plate radius: 150

Geophone distances: 1: 0 2: 200 3: 200 4: 300 5: 300 6: 450 7: 600 8: 900 9: 1200

Chainage	Point	Drop	Stress	Load	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	T _{asp}	T _{surf}	T _{air}	Time	JointID
110.765	1	1	607	42.91	660.5	493.8	495.1	396.2	382.8	269.5	188.6	102.5	67.6		33.8	29.5	11:28	C
	2	1	612	43.26	653.4	491.4	496.0	394.0	383.1	269.2	189.9	103.5	67.5					
110.874	2	1	638	45.10	327.4	199.9	214.4	142.7	143.1	80.9	47.3	18.7	12.2		34.7	29.8	11:30	C
	2	1	638	45.10	322.6	198.0	212.8	142.5	142.9	81.7	48.3	19.2	11.2					
110.981	3	1	627	44.32	505.0	366.0	374.3	290.1	284.9	197.6	136.2	68.4	38.8		34.0	30.0	11:31	C
	2	1	628	44.39	499.7	363.4	372.4	289.3	284.4	196.6	135.9	68.8	39.0					
111.795	4	1	591	41.78	605.7	512.5	483.8	442.7	408.8	353.3	280.7	177.0	116.2		37.5	30.6	11:34	C
	2	1	589	41.63	593.2	507.7	474.9	441.2	401.5	352.8	280.4	176.7	117.5					
112.066	5	1	602	42.55	748.9	584.6	575.8	468.4	466.0	336.2	251.5	159.2	105.7		37.5	30.6	11:36	C
	2	1	602	42.55	737.3	576.5	570.2	463.1	460.9	332.8	249.0	157.4	104.6					
112.132	6	1	616	43.54	477.8	354.4	370.1	297.0	304.1	228.4	180.5	119.3	85.0		36.7	30.5	11:37	C
	2	1	617	43.61	476.8	354.2	368.7	296.6	303.2	228.3	180.8	119.5	83.9					
112.203	7	1	604	42.69	844.9	653.3	664.7	529.4	532.2	380.4	283.4	174.8	116.5		36.7	30.6	11:38	C

Figura 6. Archivo de datos crudos

Structure: Sta Barbara-Izucar 1_mdb

Section: 1

From: 110.765 To: 128.454 Use parameter setup: SI_PCN-Flex

Layer	Thickness (mm)	Seed Modulus (MPa)	Material
1	210	3500	AC
2	220	200	Base
3		350	E2/E3: Subgrade
4			E3/E4: Subgrade
5			E4/E5: Subgrade

Max depth to rigid layer: mm PCC is layer no.: None Use GPR Data: Get mean GPR thicknesses:

Use PCC Joint ID Numbers

Change channels for joint calculation:

Figura 7. Establecer estratigrafía



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

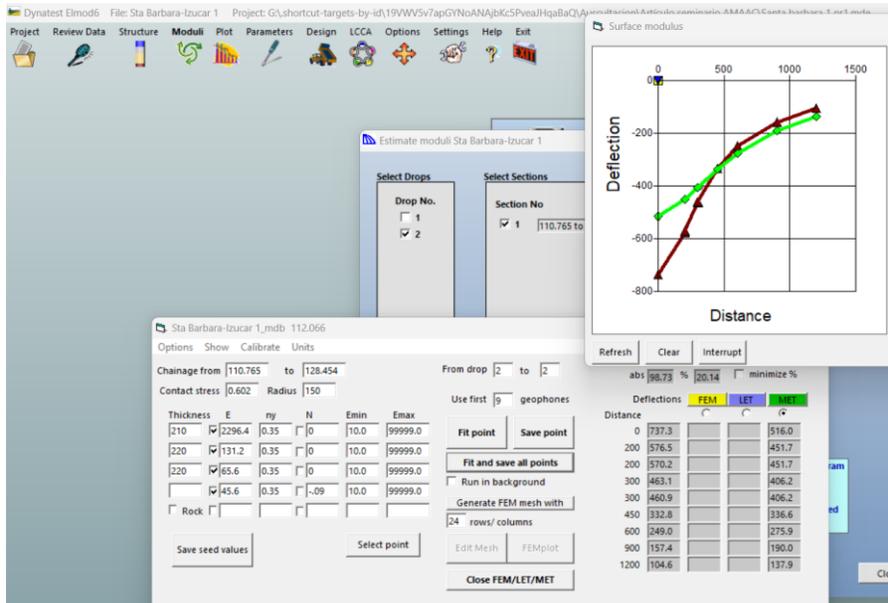


Figura 8. Selección del método de análisis

Elastic Moduli Section: 1 Drop: 2				
Station	E1	E2	E3	Esub
110.874	1098	155	154	226
110.981	2835	162	81	79
111.795	1431	96	96	57
112.066	801	78	78	69
112.132	1160	196	136	102
112.203	730	67	67	58
112.27	1474	123	124	105
112.332	831	88	87	115
112.4	821	102	100	107

Figura 9. Resultados de módulos elásticos

4 Resultados

A partir del retrocálculo realizado en ambos softwares antes mencionados se obtuvieron los módulos de cada una de las capas analizadas y se graficaron los módulos resultantes como se muestra en la Figura 10. En el caso del software DAPS, se encontró que el 81% de los puntos analizados tenía un error RMS (raíz cuadrática media) por debajo del 4%. Por otro lado, en el software ELMOD se utilizó la Teoría Elástica Lineal (LET, por sus siglas en inglés) para asegurar que ambas comparativas se realizaran bajo el mismo principio.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

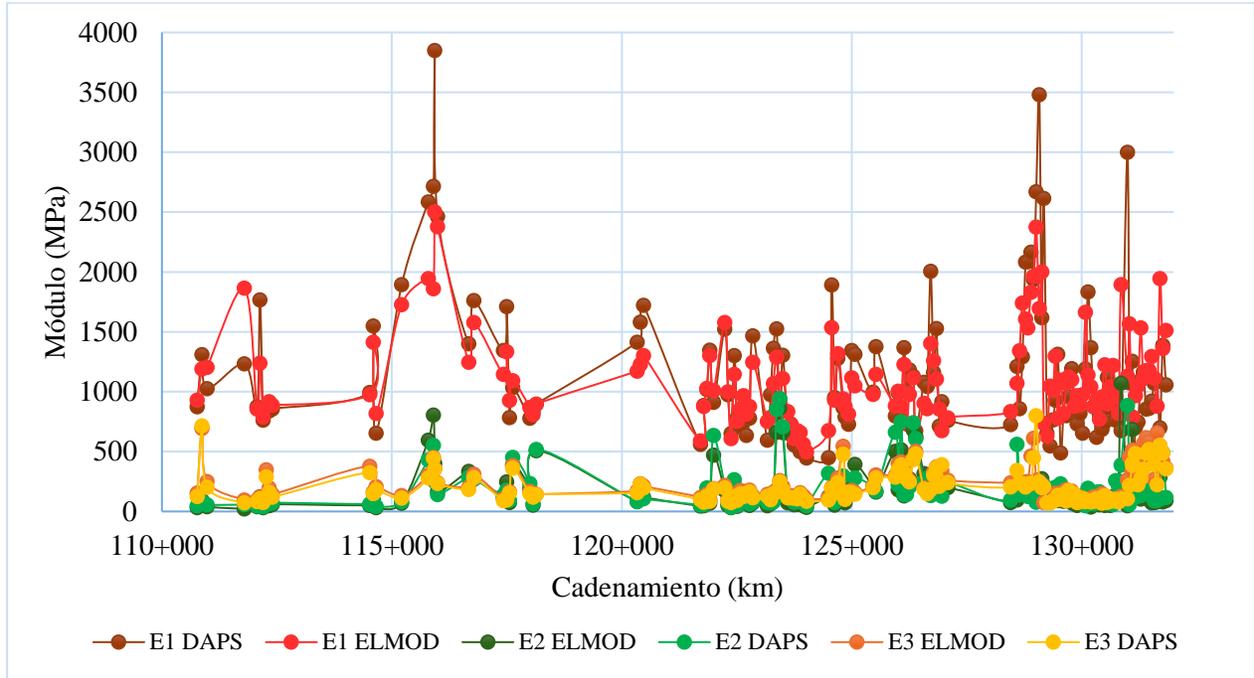


Figura 10. Comparativa ELMOD y DAPS tramo de estudio

Se llevó a cabo un análisis individual de cada capa que compone el pavimento debido a la dispersión observada. Esto permitió obtener una comparativa detallada por cada capa, como se muestra en las Figuras 11, 12 y 13.

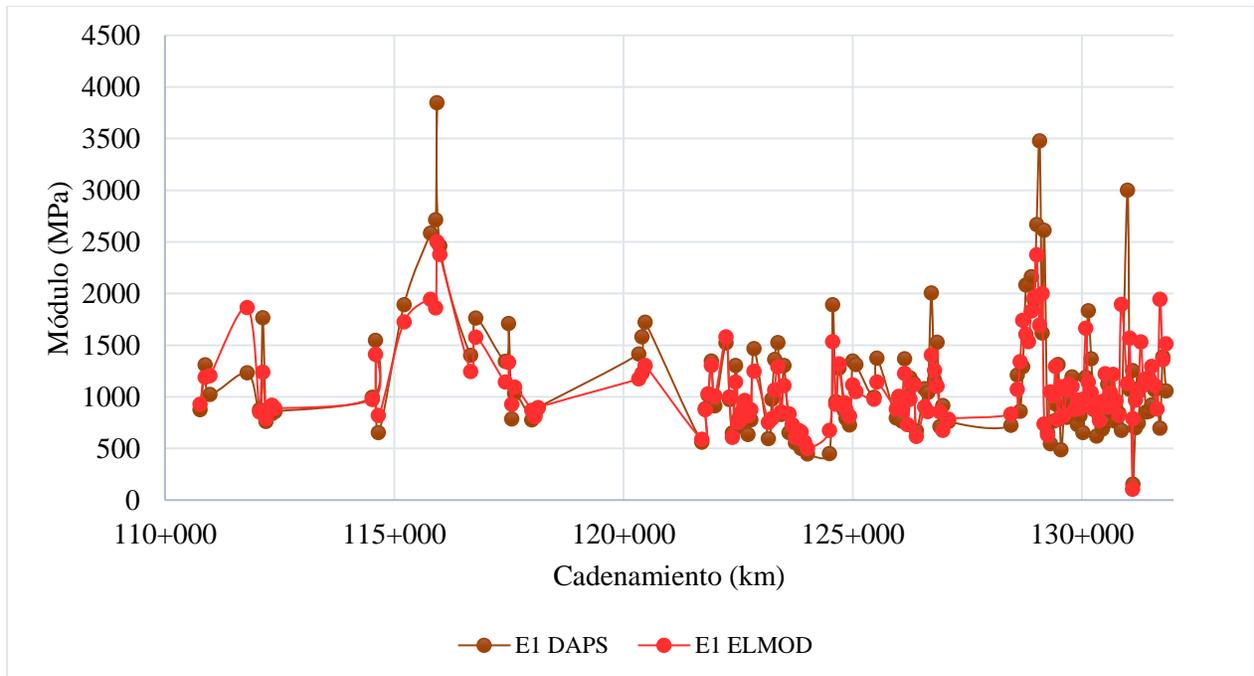


Figura 11. Comparativa ELMOD y DAPS. Capa carpeta asfáltica



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

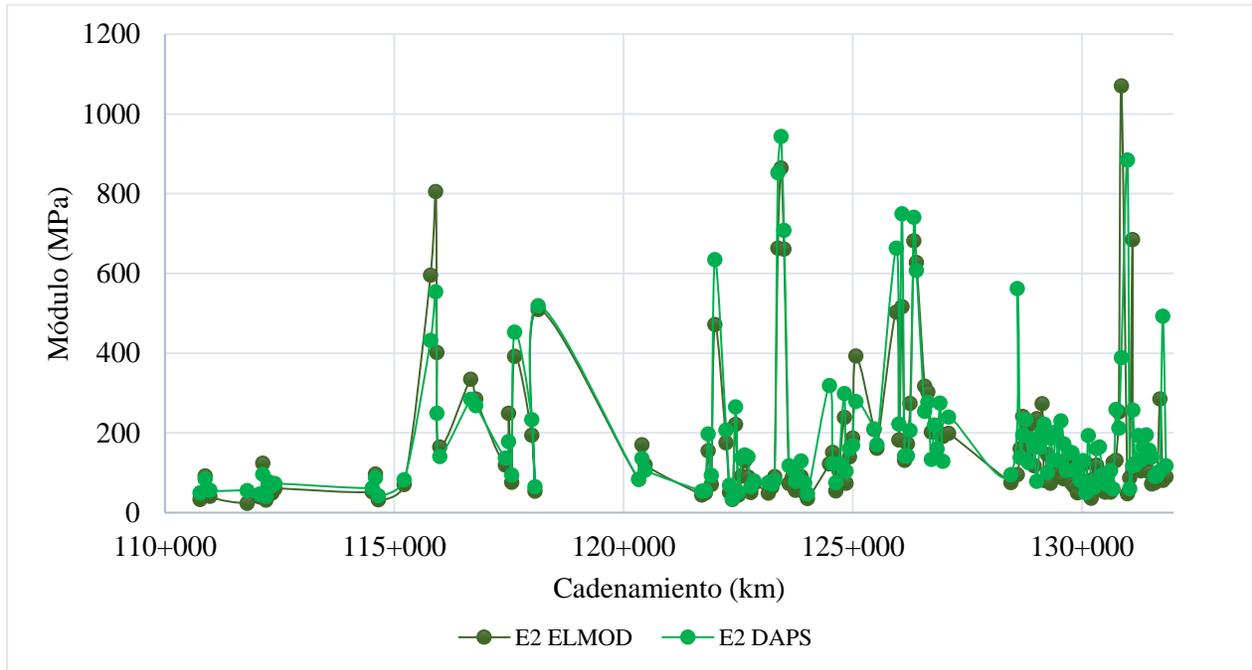


Figura 12. Comparativa ELMOD y DAPS. Capa Base hidráulica

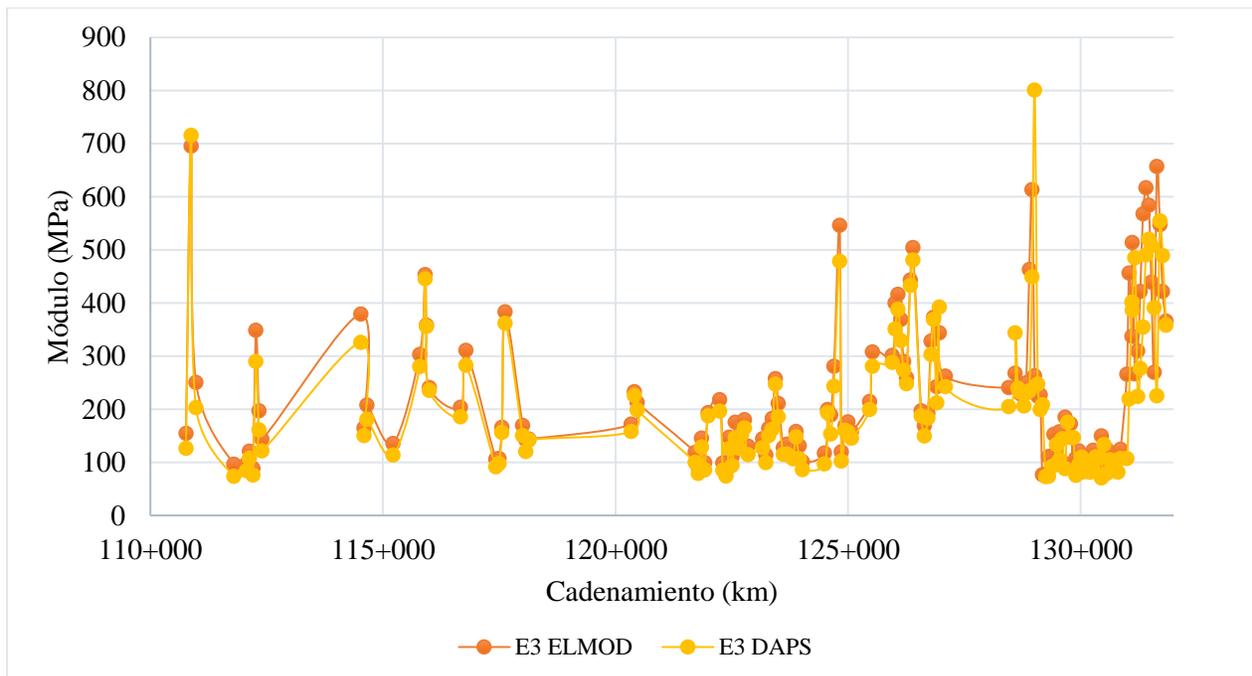


Figura 13. Comparativa ELMOD VS DAPS. Capa Subrasante

En la comparativa realizada, se observó una mayor dispersión en la capa asfáltica. Con el objetivo de reducir la incertidumbre entre los resultados obtenidos por los softwares DAPS y ELMOD, se llevó a cabo una



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

comparativa adicional utilizando un tercer software conocido como PITRA-BACK. Este software también emplea la metodología de multicapa elástica, similar a la utilizada en las comparaciones anteriores. Ver Figura 14.

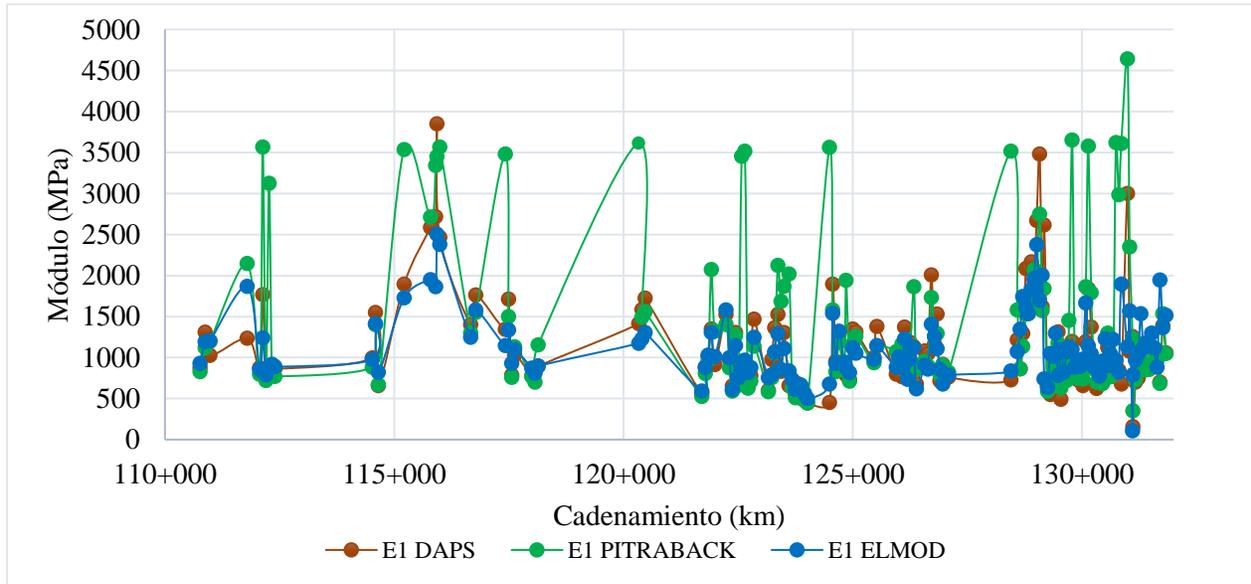


Figura 14. Comparativa ELMOD, DAPS y PITRABACK. Capa Carpeta asfáltica

5 Conclusiones

Para concluir, del análisis comparativo entre los softwares ELMOD y DAPS, se observa una notable similitud en los resultados obtenidos para los módulos resultantes en las tres capas que conforman la estructura del pavimento. No obstante, al verificar estos resultados con un tercer software, se observa una mayor dispersión, especialmente en la primera capa de la carpeta asfáltica, donde algunos módulos muestran tendencias considerablemente elevadas.

Hay un error intrínseco al suponer un comportamiento homogéneo en todo el espesor de la carpeta asfáltica. Esta capa está formada por sobrecarpetas asfálticas que tienen distintos niveles de envejecimiento y deterioro. Si bien es complejo simular este comportamiento en cualquier software de retrocálculo, tomar un solo espesor para la carpeta desencadena una gran dispersión de resultados que son difícilmente comparables. Deben de proponerse realizar pruebas de módulos resilientes en capas asfálticas de las extracciones o corazones de campo, para conocer su verdadero comportamiento y con ello tener una estimación más realista de los módulos semillas de estas capas. Sigue siendo altamente recomendable no realizar el retrocálculo en pavimentos con un alto nivel de deterioro debido a esta discontinuidad presentada a lo largo de la profundidad del pavimento.

Existen diversas ventajas en el uso de cada uno de los softwares. DAPS destaca por su facilidad de uso, ya que los pasos para el retrocálculo son directos y proporciona un análisis del error RMS para cada módulo retrocalculado, junto con un resumen de los RMS de los módulos por cada ejecución realizada. En contraste, ELMOD ofrece una gama más amplia de componentes y emplea varios modelos de retrocálculo, incluyendo la opción de la Teoría de Elementos Finitos (FEM), Teoría Elástica Lineal (LET) y el Método de Espesores Equivalentes (MET). Además, ELMOD permite ajustarse específicamente a la cuenca de deflexiones, proporcionando así una mayor flexibilidad y capacidad de adaptación en el análisis de pavimentos.

Es importante encontrar una buena técnica de retrocálculo de módulos debido a que un pavimento con módulos elásticos adecuadamente calculados puede optimizar el diseño estructural, reduciendo el consumo



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

de materiales y la energía necesaria para la construcción y mantenimiento, lo cual tiene un impacto directo en la huella de carbono y la eficiencia energética. No obstante, puede prolongar la vida útil del pavimento al asegurar que se utilicen materiales de manera más eficiente y se diseñe para soportar mejor las condiciones ambientales cambiantes, reduciendo así la necesidad de reemplazos frecuentes y minimizando el desperdicio de materiales.

Finalmente, relacionar el retrocálculo de módulos elásticos del pavimento con aspectos ambientales implica considerar cómo la optimización del diseño estructural puede contribuir a la eficiencia de recursos, la durabilidad, la gestión del agua y la conservación de la biodiversidad. Esto no solo mejora la infraestructura vial, sino que también promueve prácticas más sostenibles y responsables.

6 Referencias

- Andrade Neto, C., Machado López, I., & Rufino, J. (2015). Metodología de análisis de la condición del pavimento a partir del cuenco de deflexión. *Scielo*.
- Coria Gutierrez, C., & Árciga Ramírez, L. (2017). Recomendaciones prácticas para el uso de retrocálculo en la revisión estructural de pavimentos flexibles bajo los esquemas de conservación de carreteras tipo Asociación Público Privadas (APP).
- Trejos Castillo, C., Rojas Perez, F., Loria Salazar, L., & Aguiar Moya, J. (s.f.). Solución a la teoría Multicapa Elástica y software de cálculo de las respuestas del pavimento PITRA PAVE.
- Urbáez, E. (2007). Determinación del valor "C" para la estimación del módulo resiliente de la sub-rasante obtenido por retrocálculo según la metodología AASHTO-93.
- Wulff, S., Hellrung, D., Ng, K., & Ksaibati, K. (2016). Systematic back-calculation protocol and prediction of resilient modulus for MEPDG.