

## Administración de la conservación de pavimentos: un caso de transferencia y adaptación de tecnología

**Carlos Videla C.**

Profesor, Departamento de Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 306, Santiago, Chile.

**Gerardo Echeverría**

Profesor, Departamento de Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 306, Santiago, Chile.

**RESUMEN:** La importante magnitud de las inversiones involucradas en la conservación de caminos ha llevado al desarrollo de una nueva disciplina, "La Administración de Pavimentos", que a través de sofisticados sistemas de auscultación y modelos de predicción del comportamiento, permite la planificación de los trabajos y la optimización de los recursos destinados a conservación. Estas técnicas han tenido su origen y desarrollo en países industrializados, tanto en cuanto a los conceptos teóricos de su concepción, como al diseño y fabricación de equipos de alta tecnología y al establecimiento de modelos que permiten simular el comportamiento de los pavimentos a lo largo de su vida útil. Los países en desarrollo, cuyos recursos financieros son más escasos que los de los industrializados, requieren con mayor razón disponer de sistemas de administración de pavimentos. La tecnología involucrada obliga a la incorporación en el sistema de equipos fabricados en los países desarrollados y el alto costo de la investigación a gran escala, necesaria para la formulación de modelos de deterioro, obliga a la adaptación de los creados por instituciones internacionales. En este trabajo se presentan los principales elementos que configuran el sistema de administración de pavimentos desarrollado en Chile (GIMP) y se describen las acciones específicas relacionadas con los procesos de adaptación de tecnología que fue necesario realizar. A través de la descripción del Sistema GIMP y de la metodología de adaptación utilizada, se espera entregar una experiencia que pueda ser útil a otros países interesados en desarrollar su propio sistema de administración de pavimentos.

## I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico y social de un país está íntimamente relacionado con el estado de sus vías de comunicación, en particular con la existencia de una red de caminos cuyo estado permita minimizar los costos de transporte de personas y mercaderías. De aquí la necesidad de realizar, en forma permanente, inversiones en la conservación de los pavimentos de la red. La importante magnitud de las inversiones involucradas ha llevado al desarrollo de una nueva disciplina, "La Administración de Pavimentos", que a través de sofisticados sistemas de auscultación y modelos de predicción del comportamiento, permite la planificación de los trabajos y la optimización de los recursos destinados a conservación. Estas técnicas han tenido su origen y desarrollo en países industrializados, tanto en cuanto al diseño y fabricación de equipos de alto rendimiento, como a la ejecución de extensas investigaciones en distintos países, para el establecimiento de relaciones matemáticas que permiten simular el comportamiento de los pavimentos a lo largo de su vida útil.

La necesidad de contar con sistemas de administración de pavimentos en los países en vías de desarrollo es imperiosa, toda vez que en dichos países los recursos financieros son más escasos, en particular los destinados a conservación de infraestructura. Es aquí donde la transferencia tecnológica juega un importantísimo rol, puesto que estos países no disponen de la tecnología requerida, especialmente en cuanto a la fabricación de equipos de auscultación, ni de los fondos necesarios para cubrir el alto costo de la investigación a gran escala necesaria para la formulación de los modelos de deterioro.

Junto con las acciones de transferencia tecnológica y adaptación de modelos, se hace necesario el desarrollo local de un sistema integral que comprenda todas las etapas de la administración de pavimentos, desde la toma de datos en terreno hasta la formulación de los programas de conservación a nivel nacional.

En este trabajo se presentan los principales elementos que configuran el sistema de administración de pavimentos desarrollado en Chile (GIMP), describiendo en especial el diseño lógico del sistema y las acciones específicas relacionadas con la transferencia de tecnología. A través de la descripción del Sistema GIMP y la metodología de adaptación utilizada, se espera entregar una experiencia que pueda ser útil a otros países interesados en desarrollar su propio sistema de administración de pavimentos.

## II. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN DE PAVIMENTOS (SAP)

### 2.1 Elementos básicos de un SAP.

Los elementos básicos que configuran un sistema de administración de pavimentos (SAP) se pueden sintetizar en :

- Información de inventario de la red.
- Información del estado funcional y estructural de los caminos.

# Revista Ingeniería de Construcción, N° 10, Enero-Junio 1991

- Modelos de predicción del comportamiento durante su vida útil.
- Acciones de conservación para el deterioro actual y previsto.
- Evaluación económica de las alternativas de conservación y configuración de un programa de actuaciones.

El inventario de la red se refiere al catastro de aquellas características de los pavimentos que permanecen relativamente constantes en el tiempo, como son: individualización de los caminos, tipo de pavimento, capas constitutivas, suelo de fundación, número de pistas, ancho de pistas, pendientes, curvaturas, etc.

La información del estado de los caminos consigna la evaluación periódica de los pavimentos, registrando antecedentes de deterioro superficial, calidad de rodadura y capacidad estructural.

Los modelos de predicción de la evolución del comportamiento de los pavimentos son relaciones matemáticas, que a partir de los antecedentes de inventario y estado actual del pavimento, permiten predecir su deterioro futuro año a año, en función de las solicitaciones a que estarán sometidos.

El conocimiento del estado de los pavimentos y la predicción de su deterioro en el tiempo, permiten definir el tipo de falla y asignar las acciones de conservación técnicamente adecuadas y lo que es más importante, con la anticipación suficiente para que su programación física y financiera asegure su ejecución en el momento oportuno.

La evaluación económica considera como beneficio el ahorro de costos de operación de los vehículos, originado por el mejoramiento de la serviciabilidad de los pavimentos resultante de la aplicación de acciones de conservación, entregando indicadores de rentabilidad que permiten optimizar la inversión en conservación, tanto desde el punto de vista técnico como económico, y de esta manera configurar un programa de conservación a nivel regional y/o nacional, que considere las restricciones presupuestarias propias del país.

La implementación de un sistema como el descrito, crea la necesidad de computarizar la gestión vial, para posibilitar la administración de la abundante información requerida para el diagnóstico del estado de los pavimentos, la asignación de opciones de conservación y la evaluación técnico-económica de las distintas alternativas consideradas (Figura 1).

## 2.2 Aspectos necesarios en el desarrollo e implementación de un SAP.

Se puede señalar, sin lugar a dudas, que la condición principal para un país pueda establecer su propio sistema de administración de pavimentos, es la voluntad decidida de sus autoridades a financiarlo y a crear la organización necesaria para su funcionamiento.

Un país que desee establecer un Sistema de Administración de Pavimentos debe considerar al menos tres aspectos fundamentales:

- Organización,
- Equipamiento
- Investigación.

### 2.2.1 Organización

La organización de un SAP debe cubrir todas las actividades del sistema, desde la toma de datos en terreno hasta la toma de decisiones a alto nivel, sin omitir las instancias de investigación aplicada que serán de fundamental importancia a la hora de actualizar el sistema a través de desarrollos locales y de la adaptación de tecnologías foráneas, tanto en cuanto a equipos de auscultación, como a nuevos modelos y conceptos teóricos. La estructura específica de la organización dependerá de las condiciones propias de cada país.

En el caso chileno y en el de la mayoría de los países en desarrollo, la administración de pavimentos depende de una entidad gubernamental centralizada, Dirección de Vialidad, que define las inversiones que se harán en infraestructura vial y asigna los fondos correspondientes. El SAP tiene por objeto apoyar la toma de decisiones de las autoridades de dicha entidad, para lo cual la organización del sistema deberá considerar las peculiaridades administrativas propias, haciendo participar a las distintas estructuras que componen la Dirección de Vialidad, tales como: unidades de proyecto, construcción, explotación, conservación, etc., coordinadas por una oficina central que administre el sistema.

### 2.2.2 Equipamiento

Uno de los aspectos que caracteriza a los actuales sistemas de administración de pavimentos es su concepción estadístico-probabilística, lo cual exige medir y manejar una gran cantidad de datos, obtenidos en campañas realizadas cada uno o dos años. Esto implica la necesidad de utilizar equipos mecanizados para la auscultación periódica de los pavimentos y equipos computacionales adecuados para la transferencia de los datos y su manejo dentro del sistema.

El avance tecnológico de las últimas décadas ha permitido incorporar equipos de alto rendimiento en las actividades de auscultación de caminos. La operación de estos equipos requiere un período de adiestramiento, en el cual deberán participar los operadores propiamente tales, para familiarizarse con los distintos comandos y formas de medición, y los investigadores para calibrar los equipos a las condiciones locales. En esta etapa, además de la calibración se deberá desarrollar los programas computacionales para la transferencia de los datos medidos en terreno a bases de datos estándar utilizables por el sistema. Los programas de transferencia a su vez deberán incluir las expresiones matemáticas que permitan normalizar las medidas llevándolas a una base común de comparación.

## 2.2.3 Investigación

Como se señalara anteriormente, las actividades de investigación son de fundamental importancia, tanto en la fase inicial de formulación del sistema como durante su desarrollo. Es importante que el sistema sea de una complejidad compatible con el nivel de conocimientos de los profesionales que lo utilizarán.

En la fase inicial se requiere comenzar con una concepción general del sistema, para lo cual es posible basarse en desarrollos realizados en otros países. En esta etapa deberá ser lo suficientemente simple para que sea asimilado con facilidad y adoptado como herramienta de apoyo por las distintas unidades que participan en su funcionamiento. Paralelamente es necesario elevar el nivel de conocimientos de los profesionales del área de la ingeniería de caminos, especialmente en aspectos relativos a sistemas mecanicistas de diseño estructural y sistemas modernos de auscultación no destructiva de pavimentos.

A medida que el sistema sea puesto en operación surgirán nuevas necesidades provenientes de los propios usuarios, que llevarán a sucesivos mejoramientos y a la complejidad progresiva del sistema.

Tanto para la formulación y calibración del sistema de administración de pavimentos, como para la satisfacción de las demandas por desarrollos más sofisticados, la adaptación de nuevas tecnologías y formación de profesionales especializados, es de primera importancia considerar dentro de la organización una instancia de investigación. En el caso chileno, la investigación es realizada fundamentalmente por las universidades locales y su financiamiento considerado dentro de los planes nacionales de inversión en conservación de pavimentos.

## III. EL SISTEMA CHILENO DE ADMINISTRACIÓN DE PAVIMENTOS

En enero de 1984 el Ministerio de Obras Públicas de Chile dio inicio al desarrollo de un sistema de gestión de pavimentos contratando a dos universidades para la realización de la investigación necesaria y la estructuración del sistema, la Universidad de Chile en lo relacionado con pavimentos de hormigón y la Pontificia Universidad Católica de Chile en lo referente a pavimentos asfálticos.

### 3.1 Organización

La organización adoptada para el desarrollo del Sistema de Gestión de los Pavimentos, se basó en una estructura que integra los campos de Dirección, Asesoría, Coordinación y Ejecución, utilizando distintas unidades existentes en la Dirección Nacional de Vialidad y a universidades para realizar la investigación necesaria para la estructuración del sistema, las actividades de transferencia tecnológica, los desarrollos locales y la creación de los programas computacionales que se requieren para su funcionamiento.

La actuación de las universidades, en estrecha colaboración con los profesionales de la Dirección de Vialidad, sirvió para elevar el conocimiento teórico de los operadores del sistema y para detectar las carencias y necesidades de formación de profesionales, lo cual se tradujo en la formulación de nuevos planes de docencia en Ingeniería Vial.

En la Figura 2 se muestra la organización adoptada, señalando los distintos campos de acción, los organismos involucrados y las relaciones funcionales. A continuación se describe brevemente cada una de las unidades participantes.

El Comité Directivo tiene a su cargo la tuición general del proyecto, siendo sus principales funciones la definición de objetivos, orientación del programa, evaluación de los avances e introducción de cambios en el programa.

El Comité Ejecutivo fiscaliza la ejecución del programa, planifica los trabajos, coordina los medios necesarios y actualiza los programas de trabajo.

La Asesoría Externa actúa en todos los niveles, orientando a los distintos organismos, especificando las modificaciones o correcciones necesarias y aportando información para la capacitación y especialización de los profesionales involucrados en el proyecto.

La Unidad Coordinadora del Sistema de Gestión (UCSG) tiene por objetivo central coordinar las acciones de los distintos organismos que participan en el sistema y adicionalmente es la encargada de desarrollar las actividades de inventario, modelación de tránsito y de costos de construcción y operación.

El Sub-Departamento de Planificación de la Conservación (SDPC) realiza la normalización de las técnicas de conservación y la determinación de los costos de conservación de los caminos.

El Laboratorio Nacional de Vialidad (LNV) efectúa las mediciones periódicas de evaluación del estado de los pavimentos, a través del uso de equipo mecanizado de alto rendimiento.

Finalmente, las universidades tienen a su cargo la realización de la investigación pertinente, la auscultación localizada de pavimentos, el desarrollo y adaptación de modelos de deterioro y clima y el desarrollo de los distintos programas computacionales.

### 3.2 Equipamiento

El sistema utiliza elementos existentes en el país: plazas de peaje automático de vehículos, contadores de tránsito, red de estaciones meteorológicas y laboratorios de resistencia de materiales, y los equipos adquiridos especialmente para su desarrollo e implementación que se indican a continuación.

El equipamiento de laboratorio, se complementó adquiriendo una prensa computarizada MTS para la caracterización de las propiedades dinámicas de los materiales.

## Revista Ingeniería de Construcción, N° 10, Enero-Junio 1991

La auscultación periódica de los pavimentos, actividad fundamental del sistema, requiere el uso de equipos motorizados de alto rendimiento. Para ésto se adquirió el material que se señala a continuación. Deflectómetro transitivo, para la evaluación estructural del pavimento. Perfilómetro óptico, que permite registrar el perfil real del pavimento transitando a la velocidad de circulación normal de los vehículos. A partir del perfil real se obtiene el índice de irregularidad superficial IRI, que mide la calidad de rodadura del pavimento desde el punto de vista de los usuarios del camino. Mays-Meter, equipo que mide la irregularidad superficial del pavimento con una precisión menor que el perfilómetro óptico, pero que sirve para complementar al anterior en la prospección de toda la red. Mu-Meter, para medir la resistencia al deslizamiento de los neumáticos sobre el pavimento.

### 3.3 Investigación

Como se señalara anteriormente, la investigación estuvo a cargo de dos universidades y cubrió los distintos aspectos necesarios para la selección y adaptación de tecnologías provenientes de otros países y los desarrollos propios necesarios para permitir el funcionamiento integrado del sistema. Entre las principales actividades realizadas en este sentido, cabe destacar las siguientes:

- **Banco de datos de la construcción.** Se creó un banco de datos de la construcción que permite registrar los antecedentes de construcción y conservación de los caminos. Se cargaron los registros disponibles y se desarrolló el programa computacional que permite la incorporación de nueva información, su actualización y explotación.

- **Mediciones en tramos testigo.** Se seleccionaron e instrumentaron tramos de pavimentos de caminos en uso, con el objeto de efectuar mediciones localizadas que permitieran estudiar relaciones entre los distintos parámetros que definen el comportamiento de los pavimentos. Los tramos testigo se ubicaron a lo largo de Chile entre los paralelos 23° y 40° latitud sur, en una extensión de 2.300 km aproximadamente, cubriendo distintos tipos de clima, suelos de fundación y estructuras de pavimento. Las mediciones realizadas sirvieron entre otros, para los siguientes desarrollos:

- Calibrar los equipos de medición de alto rendimiento.
- Determinar relaciones de normalización de mediciones de equipos de alto rendimiento.
- Crear un modelo de clima que permite estimar la curva de variación horaria de la temperatura del pavimento, a partir de antecedentes proporcionados por las estaciones meteorológicas.
- Determinar una relación Deflexión-Número Estructural, que permite, a través de la medición de deflexiones, evaluar los cambios en la resistencia estructural del pavimento debidos tanto a su deterioro como a las acciones de conservación que sobre él se ejecuten.
- Verificar y calibrar de las relaciones de deterioro utilizadas por el modelo HDM-III del Banco Mundial.
- Desarrollar un modelo mecanicista para la evaluación estructural de pavimentos.

- **Creación de un Sistema de Gestión Integral de la Conservación de Pavimentos.**

Se definió un sistema integral que cubre la recolección de antecedentes, la evaluación de los pavimentos, la predicción de su deterioro futuro, la asignación de acciones de conservación, la evaluación económica de las alternativas estudiadas y la formulación de un programa de conservación considerando condiciones de restricción presupuestaria.

- **Adaptación del modelo de costos de operación de los vehículos.** Se estudiaron las relaciones internas del modelo de costos de operación de los vehículos (VOC) que forma parte de HDM-III. Se adaptó dicho modelo a las condiciones locales modificando algunas relaciones internas.

### 3.4 Costos de desarrollo del sistema

El costo involucrado en el desarrollo del Sistema de Gestión de Pavimentos chileno alcanza a 4 millones de dólares y ha sido financiado con préstamos del Banco Mundial y aportes nacionales. En esta cifra se considera el total de la inversión realizada, incluyendo costos de adquisición de equipos y repuestos necesarios para la evaluación periódica de los pavimentos, capacitación del personal operador, equipamiento de laboratorios de la Dirección de Vialidad cuyas prestaciones se extienden más allá del desarrollo del sistema, y recursos destinados a la investigación relacionada directamente con el desarrollo del sistema en su etapa inicial de definición e implementación.

Es interesante señalar que el costo considerado equivale, para las condiciones chilenas, a una inversión de 80 US\$/km al año en la red pavimentada, durante los cinco años en que se desarrolló el sistema. El costo total señalado se desglosa en las partidas que se muestran en la Tabla 1.

**TABLA 1 COSTOS DEL DESARROLLO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS CHILENO**

PARTIDAS	MILES DE US\$
Equipos de auscultación de pavimentos	
- Deflectómetro	498,70
- Perfilómetro	494,97
- Mu-Meter	53,59
- Mays-Meter	33,98
<b>Total Equipos de Auscultación</b>	<b>1.081,24</b>
Equipamiento de Laboratorios Dirección de Vialidad	
- Laboratorios Regionales	597,48
- Prensa ensayos dinámicos	903,19
<b>Total Equipamiento de Laboratorios</b>	<b>1.500,67</b>
Investigación y desarrollo	
- Asesoría externa	141,36
- Universidad de Chile (pavimentos de hormigón)	607,32
- Pontificia Universidad Católica de Chile (pavimentos asfálticos)	647,16
<b>Total Investigación y Desarrollo</b>	<b>1.395,84</b>
<b><u>TOTAL DE COSTOS SISTEMA DE GESTIÓN</u></b>	<b><u>3.977,75</u></b>

Actualmente se está llevando a cabo una investigación para el estudio de la eficacia de las distintas acciones de conservación utilizadas en el sistema. Esta investigación tiene una duración de tres años, involucra a dos universidades y alcanza a un costo total de US\$ 500.000.

#### **IV. ADAPTACIÓN DEL MODELO HDM-III**

Chile ha estado desarrollando un Sistema de Administración de Pavimentos usando el marco de referencia del Modelo HDM-JJI, ajustado a las condiciones locales principalmente en los campos de los costos de operación de vehículos y del comportamiento de los pavimentos.

##### **4.1 Costos de Operación de Vehículos**

Entre 1989 y 1990, el Ministerio de Obras Públicas calibró, para las condiciones chilenas, el sub-modelo de costos de operación de vehículos de HDM-III.

La estructura de las ecuaciones incluidas en HDM están basadas en las características físicas y mecánicas de los vehículos, siendo posible, por lo tanto, introducir los patrones de la flota vehicular local y del comportamiento de los conductores. Se estableció los parámetros relevantes incluidos en el modelo y se realizó su seguimiento detallado directamente en terreno y/o por medio de cuestionarios entre conductores y proveedores de vehículos. Se determinó nueve categorías de vehículos, cada una claramente caracterizada tanto física como mecánicamente, las velocidades de operación deseadas, los diferentes parámetros de uso de vehículos y el consumo de repuestos y mano de obra de reparación. La información, después de procesada, fue introducida en las fórmulas correspondientes y se recalculó sus constantes de calibración.

Durante el mismo período se ejecutó un proceso similar para ajustar el modelo TRARR australiano, el que calcula tiempos de viaje y consumo de combustibles bajo congestión. Se calibró el TRARR para obtener idénticos resultados que HDM bajo condiciones de flujo libre.

Se diseñó una metodología para determinar y posteriormente actualizar los precios sociales y de mercado de los ítems que afectan los costos de operación.

## 4.2 Comportamiento de Pavimentos

La predicción del comportamiento de los pavimentos asfálticos se abordó a partir de los modelos de deterioro del Sistema HDM-III, para lo cual se analizaron y reformularon las principales relaciones que gobiernan dichos modelos y se definió metodologías para la adquisición y normalización de los valores de ingreso a los modelos. Para el caso de pavimentos de hormigón, que requieren el desarrollo de criterios no incluidos en HDM, se está estudiando el diseño de otros modelos que reflejen el comportamiento observado.

En lo que sigue, se describen los principales análisis efectuados y se presentan los resultados obtenidos.

### 4.2.1 Calibración de factores de ajuste $k_i$

Los modelos de predicción del deterioro del sistema HDM-III corresponden a expresiones empíricas obtenidas por regresión entre sollicitación y resistencia de la estructura del pavimento, a partir de mediciones efectuadas principalmente en Brasil; por ello, cada modelo incluye un factor  $k_i$  de adaptación local, que debe ser calibrado para las condiciones propias del país en que se aplique el sistema. Estos modelos se encuentran interrelacionados, de modo que los valores de salida de uno sirven de parámetros de ingreso al modelo siguiente, como se ilustra en la Figura 3.

Por otra parte, las ecuaciones que definen los distintos modelos son de tipo exponencial, por lo que sus niveles de confianza en la predicción decaen rápidamente a medida que se aplican a períodos de largo plazo. Esto lleva a la necesidad de una calibración periódica de los modelos, que permita ir corrigiendo las curvas de manera que mantengan su calidad de predicción a través de toda la vida útil del pavimento.

Dado que el Sistema de Administración de la Conservación implementado en Chile, considera la utilización de equipos de auscultación de alto rendimiento, que permitirán la evaluación de la red año a año, se desarrolló una metodología de cálculo de los factores de calibración que permitirá su redefinición en forma anual. Los algoritmos que efectúan los cálculos se incorporaron al programa computacional central del Sistema de Administración de la Conservación.

El método de cálculo se basa en la minimización de la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores pronosticados por el modelo y los efectivamente medidos en terreno, las que se distribuyen en forma parabólica en las cercanías del punto óptimo.

La Figura 4 muestra la aplicación de esta metodología al modelo de progresión de la irregularidad superficial de un pavimento de un tramo particular en estudio. La calibración de los otros modelos (agrietamiento, pérdida de áridos, baches y ahuellamiento) y para otras estructuras de pavimento, siguen el mismo procedimiento. El principal beneficio de esta metodología es el mejoramiento progresivo de la precisión en la predicción del deterioro, al menos en el corto y mediano plazo.

### 4.2.2 Relación Número Estructural Corregido-Deflexión Viga Benkelman

Las principales variables utilizadas en los modelos de deterioro son el Número Estructural del pavimento y la deflexión elástica de su superficie. Estas variables deben ser frecuentemente revaloradas durante el período de análisis, para incorporar en los cálculos los efectos del deterioro efectivamente producido y de las acciones de mantenimiento ejecutadas. La dificultad de evaluar en forma directa los cambios en el Número Estructural llevó al desarrollo de expresiones matemáticas que relacionan ambas variables, basando la evaluación de ellas sólo en la medida de deflexiones. Dada la alta sensibilidad de los modelos de predicción a las variables señaladas, se estudió la relación Número Estructural-Deflexión. Este análisis se basó en la simulación con un programa multicapa (ELSYM5) y la relación se verificó con mediciones de deflexión efectuadas en tramos de prueba.

Las deflexiones teóricas se calcularon con un programa multicapa y los números estructurales se determinaron en función de las propiedades elásticas de las capas constitutivas de diferentes estructuras de pavimento seleccionadas. Los pavimentos reales se caracterizaron, en cuanto a sus propiedades elásticas, por retroanálisis de sus cuencos de deflexión medidos en terreno. Esta metodología permitió ampliar el espacio de inferencia a una gama de estructuraciones posibles, mayor que la representada por los tramos de prueba y se consideraron dos tipos de estructura: estructuras flexibles, compuestas por capas asfálticas, base granular y sub-rasante y estructuras rígidas, compuestas por una capa asfáltica, pavimento antiguo de hormigón, sub-base granular y sub-rasante.

Para cada estructura se calculó su Número Estructural Corregido (SNC), de acuerdo a la definición de HDM-III:

$$SNC = SN + SNSG$$

donde:  $SN =$  Número Estructural

$$SNSG = \text{Número Estructural de la sub-rasante}$$

Los valores de SN se calcularon a partir de los módulos elásticos de las capas, de acuerdo con la Guía AASHTO de diseño 1986. El valor SNSG se calculó con la expresión HDM- III, en función del módulo del suelo. Las deflexiones absolutas se calcularon con el programa ELSYM5, utilizando como carga un eje estándar de 18 kip. El valor de la deflexión correspondiente a viga Benkelman (DEF), se estimó utilizando una expresión desarrollada en nuestro estudio, la que se presenta en el acápite 4.2 c).

Se estudiaron diversas regresiones entre las variables SNC y DEF, encontrándose el mejor ajuste para una curva exponencial del mismo tipo que la propuesta por HDM-III, pero con coeficientes algo distintos. La expresión encontrada fue

$$DEF = 14.8 (SNC)^{-1.45}$$

en que DEF = Deflexión medida con Viga Benkelman (mm)  
SNC = Número Estructural Corregido (cm)  
R = 0.974 (coeficiente de correlación)  
S = 0.07 mm (error estándar)

Esta curva se comparó con valores de terreno medidos en tramos testigo (Figura 5). El buen ajuste de la curva y la representatividad de su expresión matemática respecto de los valores medidos en terreno, hizo conveniente su incorporación en el programa HDM-III, en reemplazo de las existentes.

### 4.2.3 Normalización de Deflexiones

Dada la fuerte incidencia de los valores de deflexión en los modelos de comportamiento, se dio especial importancia a la evaluación de dicho parámetro, tanto en cuanto al sistema de medición en terreno, como a la normalización del valor obtenido.

El valor de la deflexión elástica de un pavimento asfáltico bajo carga se encuentra influenciado, entre otros factores, por las características geométricas del dispositivo de medición y por la temperatura de las capas asfálticas. De allí la necesidad de normalizar los valores de deflexión medidos con distintos dispositivos y en distintas condiciones climáticas, a fin de permitir su comparación sobre bases comunes.

#### - Corrección Geométrica

El estudio de normalización por geometría del dispositivo de medición se efectuó haciendo las mediciones sobre una base de referencia profunda, anclada 3 m bajo el pavimento y registrando los valores de deflexión en forma simultánea, con el dispositivo correspondiente y con un transductor instalado en la base de referencia profunda. Se estudiaron dos dispositivos de medición, el deflectómetro transitivo que se usará en la auscultación periódica de los pavimentos y la viga Benkelman, considerada como sistema de referencia en el modelo HDM-III. Las relaciones entre los distintos sistemas, definidas en función del módulo de la sub-rasante, son las siguientes:

$$DEF = \frac{Do}{Es} 626.4$$

$$DTD = \frac{Do}{Es} 1005.8$$

donde: DEF = Deflexión medida con Viga Benkelman (mm/100)  
DTD = Deflexión medida con Deflectómetro Transitivo (mm/100)  
Do = Deflexión medida en Base de Referencia Profunda (mm/100)  
Es = Módulo de la sub-rasante (MPa)  
626.4 y 1005.8: son constantes para una carga de 18 kip

La comparación se muestra en la Figura 6 para el caso del deflectómetro transitivo.

#### - Corrección por Temperatura

Debido a la condición termo-sensible de los asfaltos, la magnitud de la deflexión de un pavimento, para las mismas condiciones de carga, será distinta según la temperatura que presenten las capas asfálticas durante el proceso de medición. Por esta razón es necesario contar con expresiones que permitan, a partir de una deflexión máxima medida a una temperatura cualquiera, obtener el valor que le correspondería a una cierta temperatura de referencia. La influencia de la temperatura en la deflexión del pavimento se estudió desagregándola en dos aspectos claramente diferenciables: sensibilidad térmica de la mezcla asfáltica e importancia relativa de la capa asfáltica en la deflexión total del pavimento.

La sensibilidad térmica de las capas asfálticas se definió como la variación que experimenta su módulo de elasticidad frente a variaciones en la temperatura de la capa. Se estableció una correlación entre temperatura y módulo de elasticidad, en cada tramo testigo, la que se muestra en la Figura 7.

Para cuantificar la importancia relativa del módulo de elasticidad de las capas asfálticas sobre la deflexión total del pavimento, se estudió una correlación entre ambas variables. La expresión final encontrada para la normalización de deflexiones medidas bajo una carga de 18 kip, obtenida combinando ambas regresiones, es la siguiente:

$$DEF = (DTD + \frac{1005.8}{Es}) * (1.054^{(T-20/u)}) - \frac{626.4}{Es}$$

donde: DEF = Deflexión medida con Viga Benkelman a 20°C (mm/100)  
DTD = Deflexión medida con Deflectómetro Transitivo a T°C (mm/100)  
Es = Módulo de la sub-rasante (MPa)

# Revista Ingeniería de Construcción, N° 10, Enero-Junio 1991

T = Temperatura de la capa asfáltica (C°)  
u = Parámetro de ajuste, función del espesor h (cm) de las capas asfálticas:

$$u = -34.123 * (h)^{-0.725} \text{ bases flexibles}$$

$$u = -35.649 * (h)^{-0.624} \text{ bases rígidas}$$

## V. CONCLUSIONES

El proceso de creación y desarrollo de un Sistema de Administración de Pavimentos en Chile implicó la adopción y adaptación de tecnologías provenientes de los países industrializados, desde los aspectos conceptuales inherentes a este tipo de sistemas, hasta la calibración y uso de equipos sofisticados de medición y la modificación y calibración de modelos de comportamiento de pavimentos.

El trabajo desarrollado permite establecer las siguientes conclusiones:

- Para que un país pueda establecer su propio sistema de administración de pavimentos es indispensable contar con la voluntad decidida de las autoridades a financiarlo y a crear la organización necesaria para su funcionamiento.
- La organización de un Sistema de Administración de Pavimentos debe cubrir desde la toma de datos en terreno hasta la toma de decisiones a alto nivel, sin omitir las instancias de investigación aplicada que serán de fundamental importancia para la mantención y actualización del sistema
- El sistema que se desarrolle deberá ser de una complejidad compatible con el nivel de conocimientos de los profesionales que lo utilizarán.
- Es de primera importancia la preparación de profesionales idóneos para la operación del sistema
- A medida que el sistema opere, surgirán nuevas necesidades, provenientes de los propios usuarios, que llevarán a sucesivos mejoramientos y a la complejidad progresiva del sistema. Para satisfacer ésto, es importante la existencia de una instancia de investigación.
- Como conclusión final se destaca la alta conveniencia de realizar este tipo de transferencia tecnológica, debido a que con ello no sólo se logra el beneficio proveniente de la aplicación de la tecnología específica transferida, sino que el proceso de adaptación, si es llevado en la forma correcta, contribuye a la elevación del nivel de conocimientos, disminuyendo así la brecha tecnológica entre países en desarrollo y países industrializados.

## BIBLIOGRAFIA

1. Ahlborn, G., "ELSYM5 3/72-3, Elastic Layered System with one to ten normal Identical Circular Uniform Load", Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California at Berkeley, 1972.
2. AASHTO, "Guide for Design of Pavement Structures", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, U.S.A, 1986.
3. DICTUC, "Modelos de Comportamiento de Pavimentos Asfálticos", Anales del Seminario Internacional "Gestión de Pavimentos", Departamento de Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 1990.
4. Echeverría, G. y Videla, C., "Evaluación de la Capacidad Estructural Efectiva de un Pavimento a partir de medidas de Deflexión", VI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Tomo II, Trabajo T3-19, Santiago, Chile, 1991.
5. Echeverría, G., De Solminihac, H. y Gutierrez, P., "Corrección de la Deflexión de Pavimentos Asfálticos por Efecto de la Temperatura", V Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Punta del Este, Uruguay, 1989.
6. Paterson, W., "Road Deterioration and Maintenance Effects; Models for Planning and Management", The Highway Design and Maintenance Standards Series, Vol. III, The World Bank, Washington, U.S.A, 1987.
7. Pontificia Universidad Católica de Chile, "Estudio para la Evaluación de la Eficacia de la Conservación en Pavimentos Asfálticos", Informe Anual N°1, Departamento de Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 1990.
8. Pontificia Universidad Católica de Chile, "Plan de Control y Seguimiento de Pavimentos Asfálticos", Informe Final, Vols. I-XII, Departamento de Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 1989.
9. Salgado, J., Gutierrez, P. y Romero, F., "Sistema de Gestión y Seguimiento de Pavimentos - Dirección de Vialidad MOP", Revista Ingeniería de Construcción, N°2, 1987.
10. Videla, C., Echeverría, G. y Gaete, R., "Calibration of Asphalt Pavement Behaviour Models in Chile". Eleventh Annual Transportation Convention ATC 91, Vol.4B Pavement Engineering, Paper 4, CSIR Conference Centre, Pretoria, Sud-Africa, 1991.
11. Watanatada, T. et al., "The Highway Design and Maintenance Standards Model", The Highway Design and Maintenance Standards Series, Vol. IV, The World Bank, Washington, U.S.A, 1985.

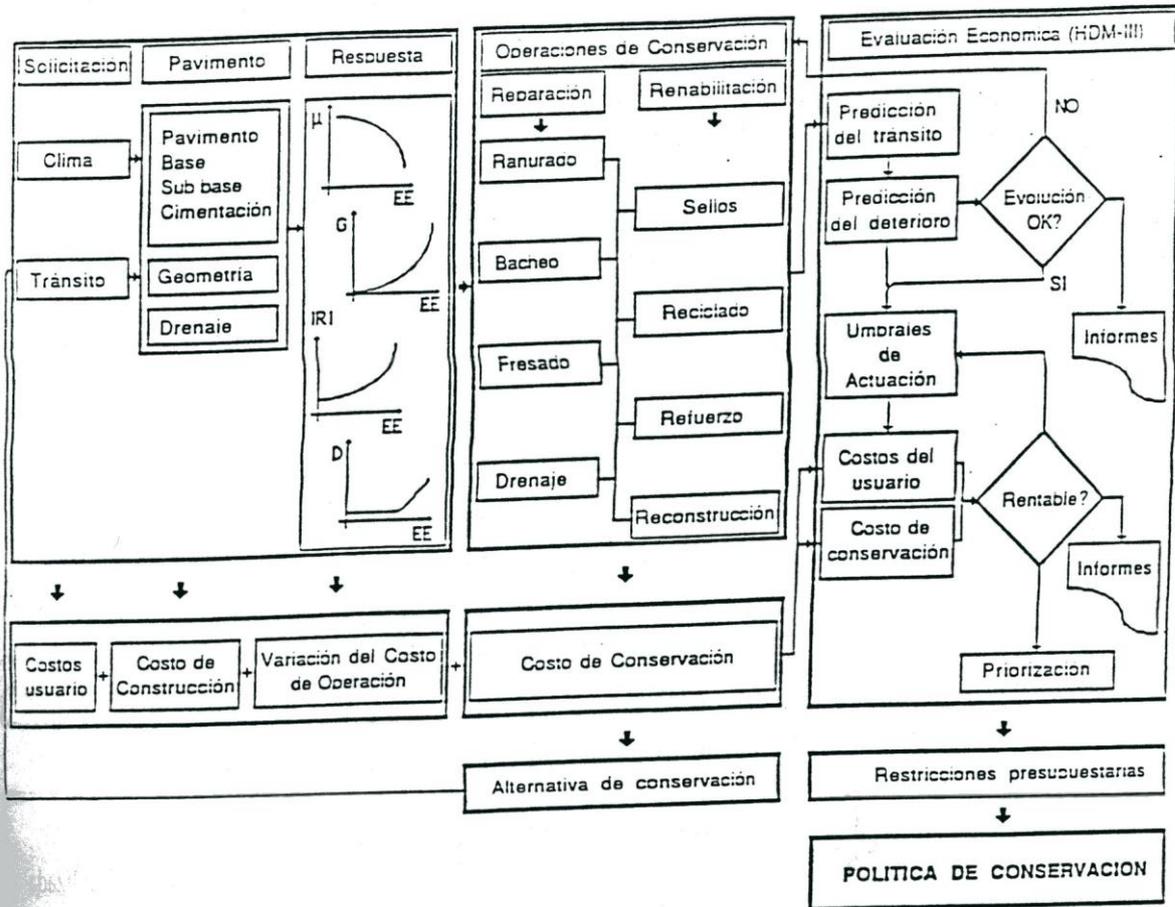


Figura 1 Diseño lógico del sistema chileno de administración de pavimentos

ORGANIZACION PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA DE GESTION DE PAVIMENTOS CHILENO

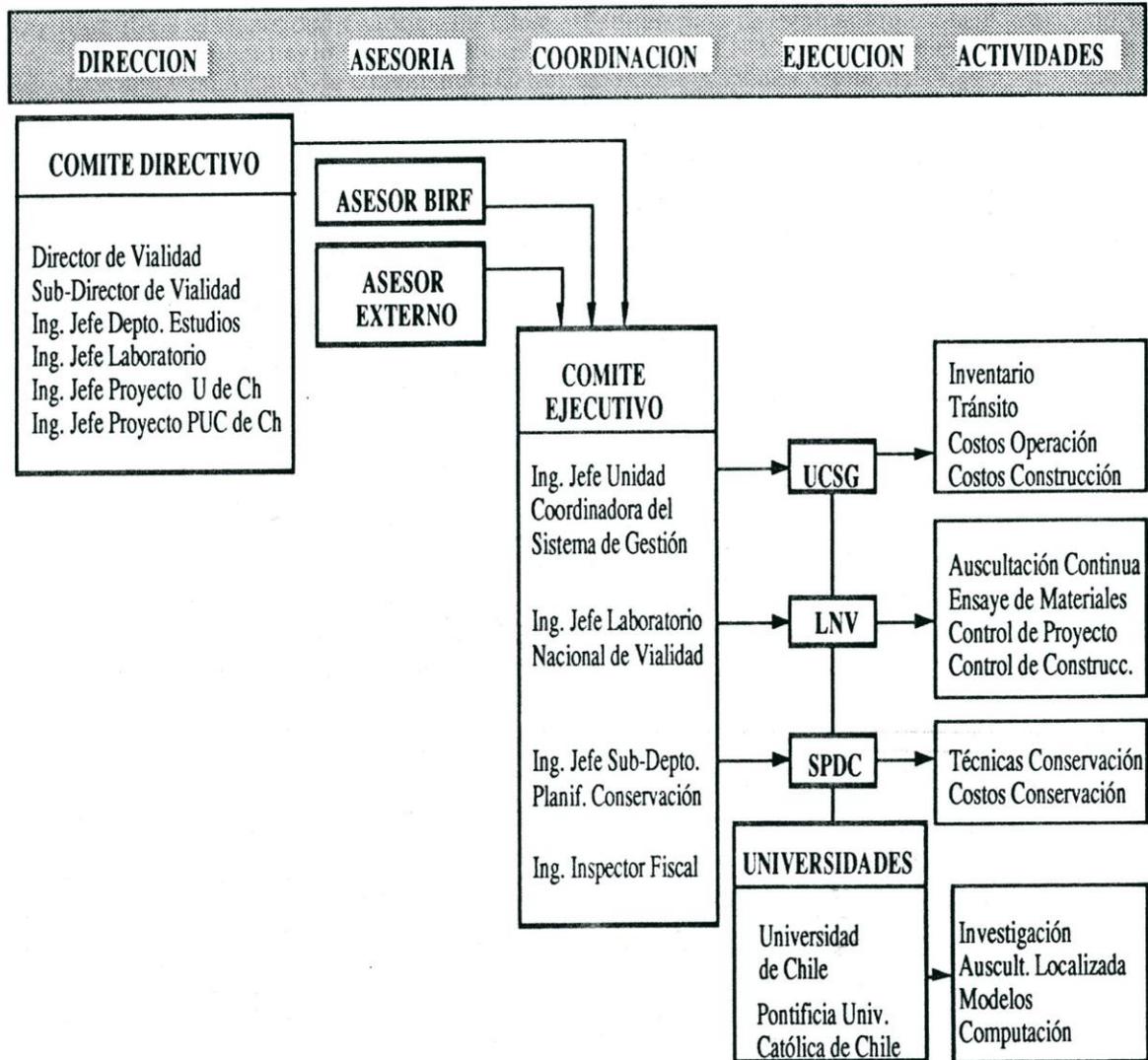


Figura 2 Organización para el desarrollo del sistema de gestión de pavimentos chileno

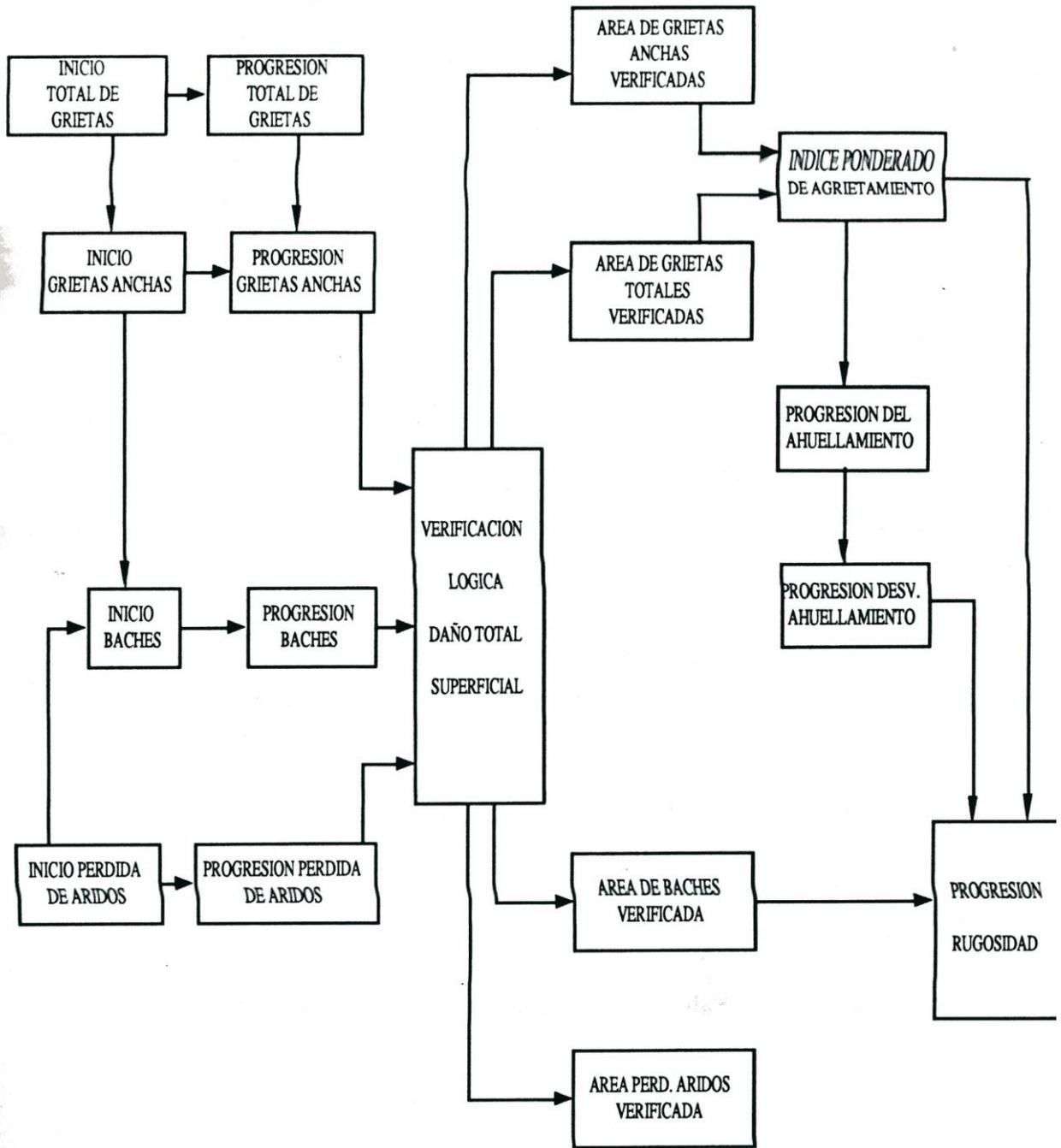


Fig. 3 Relación entre los modelos de deterioro del HDM-III

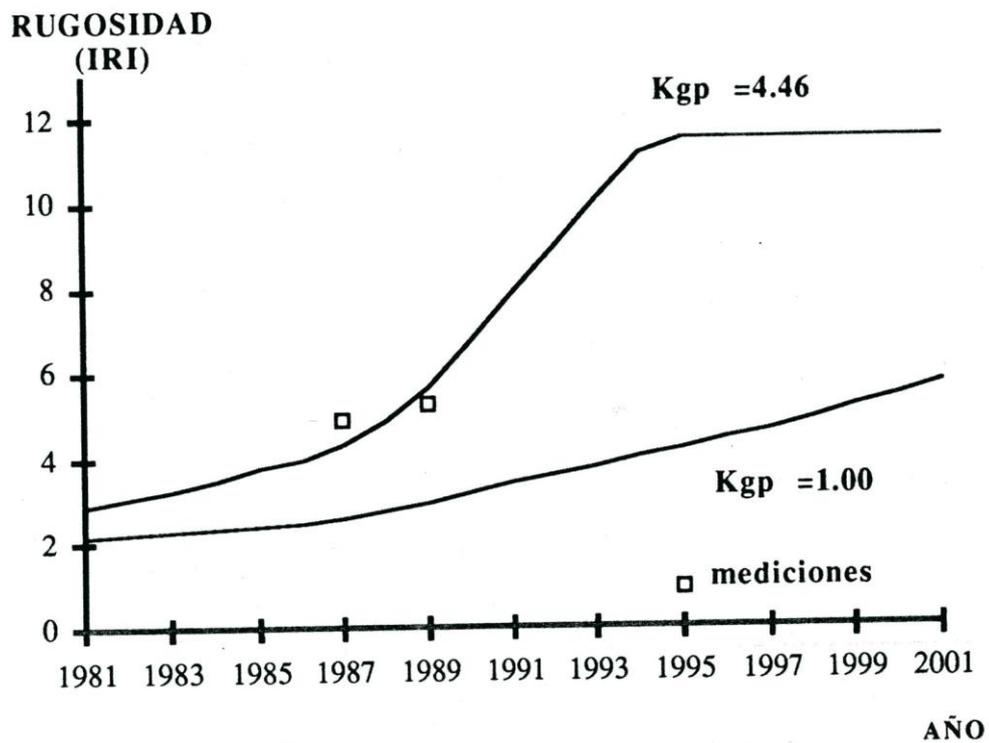


Fig. 4. Ajuste del modelo de irregularidad superficial

Figura 4 Ajuste del modelo de irregularidad superficial

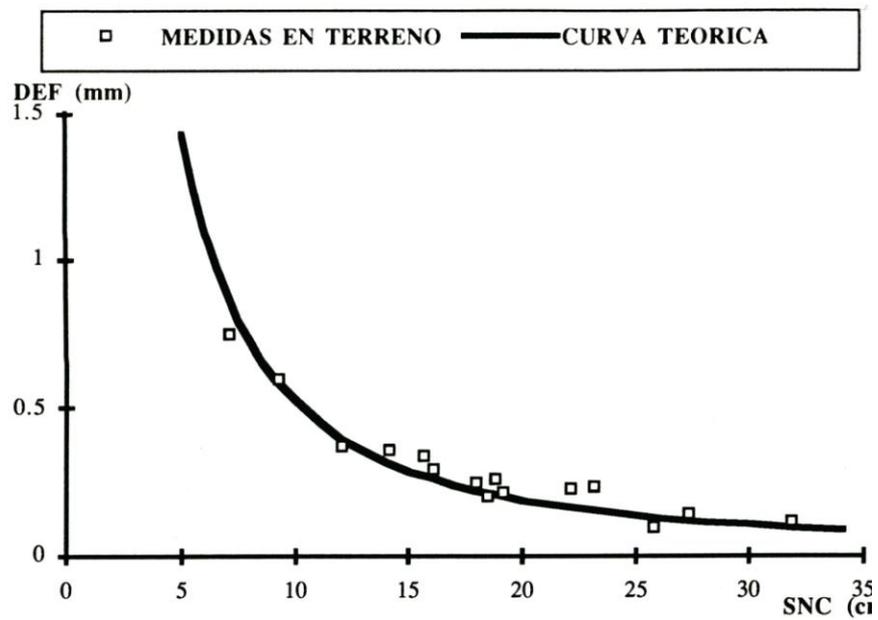


Fig. 5. Relación entre la deflexión con viga Benkelman y el número estructural corregido

Figura 5 Relación entre la deflexión con viga Benkelman y el número estructural corregido

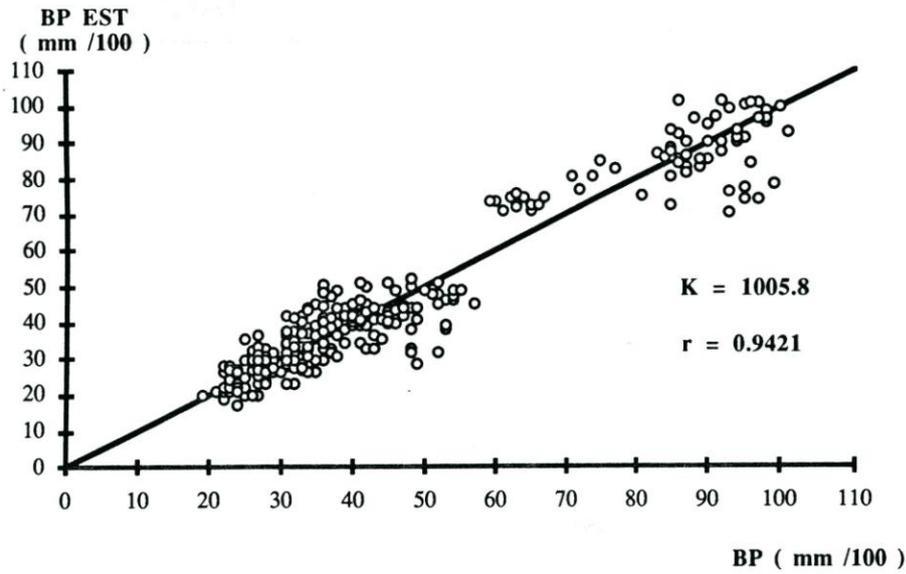


Fig. 6. Comparación entre las deflexiones medidas con base de referencia profunda y las estimadas mediante corrección geométrica del deflectómetro transitivo

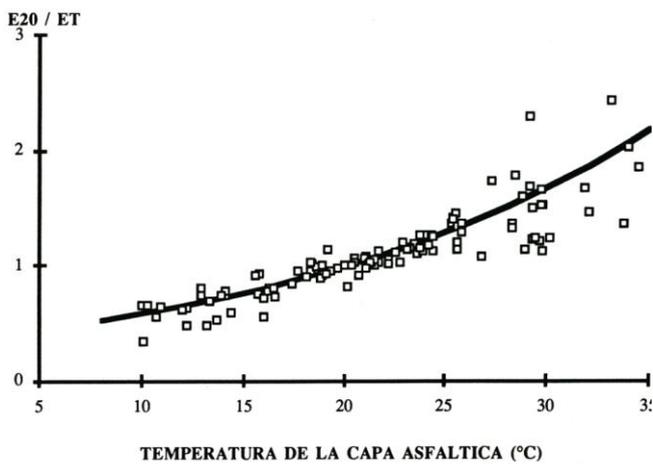


Fig. 7. Variación del módulo de elasticidad con la temperatura

Figura 7 Variación del módulo de elasticidad con la temperatura