



LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES
Y MODELOS ESTRUCTURALES

METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO MODELOS DE DETERIORO PARA CAMINOS VECINALES DE LASTRE Y SUELO

Investigador:

Fabricio Leiva Villacorta

Diciembre 2004

TABLA DE CONTENIDOS

1. DEFINICIÓN DE MODELOS DE DETERIORO.....	3
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.2 APLICABILIDAD DE LOS MODELOS DE DETERIORO.....	3
1.3 TÉCNICAS PARA DESARROLLAR MODELOS	4
1.4 TÉCNICAS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE	4
2. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE MEDICIÓN.....	6
2.1 SOLICITACIONES DE TRÁNSITO Y EFECTO DE LAS CARGAS	6
2.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS CARGAS DE TRÁNSITO.....	6
2.3 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.....	8
3. DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE TRAMOS	15
3.1 SELECCIÓN DE TRAMOS.....	16
4. CRITERIOS DE VALORACIÓN MECANÍSTICA PARA LA FALLA.....	17
4.1 INTRODUCCIÓN.....	17
4.2 DISEÑO EMPÍRICO – MECANICÍSTICO DE PAVIMENTOS.....	17
4.3 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.....	18
5. CRITERIOS DE VALORACIÓN PARA EL DAÑO POR HUMEDAD	21
5.1 ÍNDICE DE CONDICIÓN DE CAMINOS NO PAVIMENTADOS URCI ...	21
5.2 ENSAYOS DE LABORATORIO.....	24
5.3 SEGUIMIENTO HISTÓRICO.....	25
5.4 DESARROLLO DE LOS MODELOS	25
5.5 CRITERIOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS:	26
6. REFERENCIAS.....	29
ANEXOS	30

1. DEFINICIÓN DE MODELOS DE DETERIORO

1.1 INTRODUCCIÓN

Los modelos de deterioro generalmente, corresponden a expresiones matemáticas que permiten predecir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo, con base en el conocimiento de las condiciones al momento de la puesta en servicio y al momento de la realización del análisis.

Los modelos de deterioro pueden surgir a partir de desarrollos empíricos o mecanísticos. Los desarrollos empíricos tienen su origen en bases de datos reales conformadas a partir de pavimentos existentes; en dichas bases se almacena información concerniente al diseño, datos de tránsito, condiciones climáticas y de deterioro a lo largo de su vida útil.

El desarrollo de modelos mecanísticos se basa no solo en datos de pavimentos existentes, sino que particularmente en características del comportamiento de las diversas capas y materiales que conforman los pavimentos, específicamente en las propiedades físicas y mecánicas.

De acuerdo a la forma de predicción que presentan los modelos, es posible diferenciar dos variedades de ellos, estas corresponden a modelos agregados (acumulados) e incrementales.

Los modelos de deterioro agregados, son aquellos que para predecir un deterioro futuro requieren conocer por completo la historia del comportamiento del pavimento, es decir, se necesita saber de datos tales como la tasa de crecimiento del tránsito a lo largo de la vida del pavimento, tránsito promedio diario al inicio del servicio del pavimento, ejes equivalentes acumulados al momento de la evaluación, nivel de servicio inicial, en muchos casos esto no es posible y por una u otra razón se cuenta sólo con datos parciales.

Los modelos de deterioro de tipo incremental, no requieren conocer la historia previa para predecir los comportamientos futuros, sino que permiten hacerlo con base en un conjunto de ecuaciones y operaciones lógicas, necesitando conocer sólo el estado actual del pavimento, además de las características estructurales, climáticas existentes y el tránsito que circula por dicho pavimento en el año de evaluación.

1.2 APLICABILIDAD DE LOS MODELOS DE DETERIORO

Los modelos de deterioro de pavimentos se aplican a diversos aspectos relacionados con la administración de pavimentos, entre los cuales se pueden mencionar:

- La creación de un sistema de administración de pavimentos, que aplique los modelos para predecir los futuros deterioros del pavimento y para evaluar los resultados de aplicar diversas alternativas de mantenimiento.
- La generación de un conjunto de políticas y estándares de mantenimiento basados en condiciones de deterioro relevantes del pavimento.
- La evaluación del efecto relativo de algunas características del diseño con respecto a otras.

Los modelos de deterioro deben cumplir con ciertos requerimientos, para poder ser calificados como confiables y bien cuantificados, como los siguientes:

- Los modelos matemáticos deben predecir la condición del camino en el tiempo, además de permitir conocer los efectos a corto y largo plazo de las actividades de mantenimiento y estimar el momento más adecuado para realizarlas.
- La calidad del nivel de servicio del pavimento y la tendencia de su condición, debe ser cuantificada de tal forma que tenga relación directa con los factores que provocan su cambio.
- Para su implementación, dentro de un sistema de administración de pavimentos, los modelos deben utilizar sólo parámetros que puedan ser medidos físicamente y obtenidos con facilidad.
- Deben tenerse en cuenta los conceptos estadísticos de probabilidad y confiabilidad asociados a las predicciones que realizan los modelos.

1.3 TÉCNICAS PARA DESARROLLAR MODELOS

Existen muchas técnicas para desarrollar modelos de deterioro de pavimentos. Entre las principales se encuentran: extrapolación lineal, regresión, mecánica-empírica, distribución probabilística y markoviano. Por cuestión de facilidad se le dará énfasis a la técnica de regresión, al igual que la mecánica-empírica por su aplicabilidad en el desarrollo de nuevas metodologías de diseño estructural de pavimentos.

a. Regresión

El análisis de regresión es usado para establecer una relación empírica entre dos o más variables. Cada variable es descrita en términos de media y su variación. Se pueden utilizar distintas formas de regresión: lineal entre dos variables, lineal múltiple y no lineal.

b. Modelo mecánico - empírico

Las tensiones y deformaciones calculadas por el método mecánico, como respuesta a las cargas de tránsito, clima y propiedades de los materiales, se pueden usar como parámetros de entrada (variables independientes) de los modelos empíricos de regresión.

1.4 TÉCNICAS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Esta técnica consiste en el ajuste de un conjunto de datos, con el propósito de estimar una variable independiente (respuesta), con base en una serie de variables dependientes.

Rige el criterio de mínimos cuadrados.

$$\textit{minimizar} - SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Ejemplo de ecuación de regresión lineal múltiple:

$$\hat{y}_i = f(x_1, x_2, x_3) = A + B_1 * x_{1i} + B_2 * x_{1i}^2 + B_3 * x_{1i}^3 + C_1 * x_{2i} + C_2 * x_{2i}^2 + D_1 * x_{3i} + D_2 * x_{3i}^2 +$$

$$E_1 * x_{1i} * x_{2i} + E_2 * x_{1i}^2 * x_{2i} + F_1 * x_{1i} * x_{3i} + G_1 * x_{1i} * x_{2i} * x_{3i}$$

$$\hat{y}_i = f(x_1, x_2, x_3)$$

$$y_i = f(x_1, x_2, x_3) + \varepsilon_i$$

$$\Rightarrow y_i = \hat{y}_i + \varepsilon_i$$

Para que una ecuación de regresión sea lineal es necesario que sea posible realizar una transformación de parámetros tal que las constantes y variables independientes transformadas tengan una configuración lineal.

El método de evaluación de la calidad del ajuste de regresión es mediante el coeficiente de determinación R^2 , que explica en que medida la variabilidad total en las observaciones (SST) es descrita por el modelo de regresión.

CRITERIO DE MINIMOS CUADRADOS

$[y] = [x] [B]$: en notación matricial.

$$[B] = [[x]^T [x]]^{-1} [x]^T [y]$$

$$[\varepsilon] = [y] - [x] * [B] =$$

$$SSE = [[y] - [x] * [B]]^T * [[y] - [x] * [B]]$$

$$SST = [[y] - [\bar{y}]]^T * [[y] - [\bar{y}]]$$

$$SSR = [[x][B] - [\bar{y}]]^T * [[x][B] * [\bar{y}]]$$

$$R^2 = SSR/SST$$

Donde:

[B]: matriz de coeficientes

[x]: matriz de variables independientes

[y]: matriz de variables dependientes

[ε]: matriz de error del modelo

SST: variabilidad total de las observaciones

SSR: variabilidad del modelo

SSR: variabilidad del error

R^2 : coeficiente de determinación

2. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE MEDICIÓN

2.1 SOLICITACIONES DE TRÁNSITO Y EFECTO DE LAS CARGAS

El tránsito solicitante es un factor de primera importancia a la hora de predecir el deterioro que sufrirá el pavimento con el paso del tiempo. Las solicitaciones de carga en los pavimentos son las principales causas del deterioro de los caminos, a lo cual se le agrega el efecto del clima.

Uno de los mayores problemas que se encuentran en las predicciones teóricas sobre el efecto destructivo de las cargas de tránsito, es el de decidir cuál es el criterio determinante a utilizar: tensión, deformación o serviciabilidad.

Los tipos de ejes más comunes de los vehículos son: eje simple, eje dual, eje tandem y eje triple en casos excepcionales. Por otro lado se define un eje estándar o eje equivalente mediante el cual se determina el efecto destructivo, dependiendo de las cargas y tipo de ejes de los vehículos. Este es un eje dual con una carga de 8200 kg y una presión de inflado de 690 kPa.

La estratigrafía vehicular corresponde a las características del tránsito de una zona o sección de carretera específica, a través de la cual se puede obtener el factor de equivalencia. La determinación de la estratigrafía consiste en el conteo y estimación de carga, ya sea por medio de pesaje o por clasificación según nivel de carga (inspección visual). Con los datos de carga, volumen y utilizando el método de la AASHTO para obtener los factores de equivalencia por eje, en función a los pesos registrados por las balanzas o bien a los pesos definidos en la inspección visual, se logra obtener el factor de eje equivalente para cada vehículo registrado.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS CARGAS DE TRÁNSITO

En la Tabla 2.1 se muestra la estratigrafía de vehículos utilizada en nuestro país, implementada por el MOPT y el LANAMME, con el respectivo factor camión o de equivalencia con ejes estandarizados de 8200 kg.

Tabla 2.1. Estratigrafía de vehículos utilizada en C.R para escenarios bajo, medio y alto de carga.

Tipo de vehículo	Factor camión			Descripción	Peso máximo (kg)
	Bajo	Medio	Alto		
Liviano	0,0001	0,0005	0,001	2 ejes simples	2000
Bus	0,65	0,85	1,05	1 eje simple, 1 eje dual	12000
CL	0,1	0,2	0,3	2 ejes simples	9000
C2	0,8	1	1,15	1 eje simple, 1 eje dual	12000
C3	1,4	1,6	1,75	1 eje simple, 1 eje tandem	20000
T3-S2	2,2	2,5	2,75	1 eje simple, 2 ejes tandem	32500

Metodología para la estimación de los Ejes Equivalentes de diseño

Para la determinación de los Ejes Equivalentes de diseño, se debe seguir el procedimiento descrito a continuación:

1. Definir el período de diseño.
2. Estimar el número de vehículos que transitan por el camino en un sentido (buses, camiones y vehículos livianos). Para la estimación de este valor es posible realizar una o más de las siguientes acciones:
 - Conteo de los vehículos en ambos sentidos durante 12 horas en horario diurno. Generalmente se recomienda realizar el conteo en una semana hábil normal, preferentemente lunes jueves o viernes.
 - Obtener una estimación analizando otros caminos cercanos al proyecto en estudio, de tal forma que se pueda concluir que poseen similar distribución vehicular.
 - Realizar encuestas origen destino en el mismo camino.
 - Definir la tasa de crecimiento de los vehículos. La metodología permite definir dos tasas de crecimiento, 4 y 7%. La elección de una u otra depende de quién realiza el análisis, sin embargo se recomienda la utilización de la tasa de 4% salvo en el caso en que se puede afirmar con seguridad que el cambio de estándar del camino producirá un tránsito generado significativo.

El cálculo de Ejes equivalentes se puede realizar con la siguiente ecuación:

$$EEq = TPD \left[\sum (\% D_i \cdot FC_i) \right] FD \cdot G \cdot 365$$
$$G = \frac{(1+r)^Y - 1}{r}$$

donde:

EEq = Ejes Equivalentes de diseño.

TPD = Tránsito promedio diario.

%D_i = porcentaje de distribución vehicular.

FC_i = Factor camión para cada tipo de vehículo.

FD = Factor de dirección o sentido (caminos de 2 vías igual a 0.5).

G = Factor de crecimiento.

r = Tasa de crecimiento.

Y = Período de diseño en años.

El factor de dirección se puede ver afectado por el número de carriles por sentido, como se observa en la Tabla 2.2 (Guía de diseño AASHTO 1993), donde se define el carril de diseño como el carril por donde pasará la mayoría de ejes equivalentes, en la mayoría de los casos se identifica en el carril por donde circulan los autobuses o el carril de tránsito lento.

Tabla 2.2. Porcentaje EEQ en el carril de diseño.

Número de carriles por sentido	Porcentaje de EEQ en el carril de diseño (%) (*)
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4	50 - 75

(*) Porcentajes según Guía de diseño AASHTO 1993.

2.3 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

El desempeño del pavimento es una función de su habilidad relativa para servir al tránsito durante un período de tiempo. El objetivo de la evaluación es cuantificar la condición del pavimento y ayudar en la toma de decisiones como las siguientes:

- Establecer prioridades de mantenimiento y determinar estrategias de mantenimiento y rehabilitación: rugosidad, deterioro de la superficie.
- Predecir el desempeño del pavimento: rugosidad, resistencia al deslizamiento, deterioro de la superficie.

2.3.1 DESEMPEÑO FUNCIONAL: EVALUACIÓN

REGULARIDAD SUPERFICIAL (RUGOSIDAD)

La rugosidad se define como el total de desviaciones de la superficie del pavimento con respecto a una superficie plana imaginaria. Determina tales características que afecta la dinámica del vehículo, la calidad de ruedo (confort), drenaje, etc.

Métodos para medirla:

- Perfil del pavimento (elevaciones contra distancia horizontal). Debe convertirse a una medición de rugosidad.
- Respuesta de un vehículo a la rugosidad (aceleración vertical). La respuesta debe ser calibrada y correlacionada con una medición de rugosidad.

Una forma de calcular la rugosidad es por medio del cálculo de varianza de la pendiente.

- Se requiere conocer el perfil (rugosidad vrs. distancia horizontal).
- Calcular la pendiente entre puntos sucesivos, separados 30 cm (1 ft).
- Utilizar los valores absolutos de las pendientes.
- Calcular la media de las pendientes.
- Calcular la varianza de las pendientes.

$$SV = \sum (si - \bar{s})^2 / (n - 1)$$

En el Estado de Washington se aplica una clasificación del tipo de pavimento dependiendo de la rugosidad, de las condiciones funcionales en que se encuentra, y de la velocidad normal a la que se puede transitar, como se observa en la Tabla 2.3.

Existen varios mecanismos para medir la rugosidad, estos mecanismos permiten reproducir el perfil real del pavimento, utilizando mecanismos de medición lentos, como son los niveles topográficos, el “dipstick”, y dispositivos automatizados que permiten medir el perfil del pavimento a la velocidad usual de ruedo (40 a 100 km/h).

El mecanismo más común es el “dipstick”, que consiste en una unidad manual, que mide las diferencias de elevación entre dos puntos situados 30 cm aparte. Rotando el dispositivo 180° se puede ir generando el perfil del pavimento.

Los mecanismos automatizados como el “perfilómetro láser” son mecanismos que miden la respuesta del vehículo a la rugosidad del pavimento (aceleración vertical).

Tabla 2.3. Escala de rugosidad IRI.

Tipo de pavimento	IRI (m/km)	Velocidad normal de uso (km/h)	Características del pavimento
Aeropuertos y autopistas	0.5 – 2.0	> 100	N/A
Pavimentos nuevos	1.5 – 3.5	90 – 100	N/A
Pavimentos viejos	2.5 – 6.0	80 – 100	Imperfecciones superficiales
Carreteras no pavimentadas	3.5 – 10	60 – 90	Depresiones menores frecuentes
Pavimentos dañados	4.0 – 11	50 – 90	Depresiones leves poco profundas
Carreteras no pavimentadas dañadas	> 8.0	< 70	Erosión y depresiones profundas

Fuente: Departamento de Transportes del Estado de Washington.

El mecanismo más sencillo y barato consiste en la estimación subjetiva de la rugosidad de un pavimento, hecha por un observador, utilizando una escala descriptiva, que aproxima el IRI, para diferentes condiciones, como es el caso del Índice de serviciabilidad presente (PSR) el cual considera el juicio de un observador con la habilidad suficiente para valorar la condición del tramo a evaluar en una escala de 5 (excelente) a 0 (intransitable).

La escala del índice de serviciabilidad presente va desde 0 (intransitable), 1 (calidad muy pobre del pavimento), 2 (calidad pobre), 3 (aceptable), 4 (buena) y 5 (muy buena o excelente). Además se han encontrado correlaciones entre el PSR y el IRI a partir de datos medidos en los estados de Indiana, Lousiana, Michigan, Nuevo México y Ohio, entre estas correlaciones se puede citar una desarrollada en 1986 (ecuación 1) y otra en 1992 (ecuación 2) para secciones tanto de pavimentos flexible como rígido:

$$PSR = 5e^{-0.18(IRI)}$$

$$PSR = 5e^{-0.26(IRI)}$$

2.3.2 DESEMPEÑO ESTRUCTURAL

Tipos de sondeos:

- Auscultación visual de superficie.
- Deformación (respuesta ante la carga).

a. Auscultación visual de superficie

ELEMENTOS BÁSICOS:

- TIPO DE FALLA. La cantidad de tipos de falla a considerar depende del uso final de la información y debe ser definida en el momento de establecer las necesidades de datos. Muchos datos sobrecargan el sistema, muy pocos pueden ser de poco uso.
- SEVERIDAD. Para cada tipo de falla se deben definir niveles de severidad, tomando en cuenta lo que se considera crítico, depende del uso final de la información. Típicamente se utilizan tres tipos de categorías: baja, media y alta.
- EXTENSION. Cuantificación del área con el tipo de falla y la severidad identificadas. Depende del tipo de falla. Puede ser una cantidad por superficie, o un porcentaje del área, por ejemplo.

Métodos de colección de datos

1. Procedimientos manuales.

- Caminar la sección.
- Método del parabrisas. Recorrer la carretera por el espaldón, en un vehículo.

2. Procedimientos automatizados:

- Por imágenes fotográficas. Proceso estático, utilizando una cámara fotográfica se van tomando fotografías de la carretera, a la velocidad normal de operación de los vehículos.
- Por imagen de video. Filmación en video de la superficie del pavimento a la velocidad normal de operación de los vehículos.
- Por láser. Permite detectar los cambios en profundidad, detectando las grietas y deformaciones. Se utiliza un arreglo de láseres para cubrir áreas grandes. No es muy preciso, pero permite la identificación de grietas, así como la medición de la rugosidad.

Índices de evaluación

Permiten establecer cuál es la condición general del pavimento, a partir de la información recopilada en la auscultación del pavimento. Pueden contener parámetros únicamente estructurales, así como funcionales, dependiendo de las necesidades de información.

Hay dos tipos:

- Índices individuales para evaluar los pavimentos en sus características críticas.
- Índices combinados para evaluar el pavimento en su totalidad.

índices individuales

Aplican para los tipos de falla críticos. Se utilizan cuando los modos de falla son evaluados individualmente y, por si solos, son determinantes de una acción correctiva o reparación.

Como por ejemplo en una agencia de transportes se considera que debe colocarse una sobrecapa estructural en los casos donde la profundidad de roderas supere 1.8 cm o ¾ de pulgada (severidad alta). Pavimentos con un 10 % del área superficial agrietada, o con un 10 % del área con baches (ya tapados), son determinantes de una reparación previa y una sobrecapa delgada.

índices combinados para pavimentos

1. Índice de habilidad de servicio de la AASHTO.

Para pavimentos flexibles:

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + SV) - 1.38 \overline{RD}^2 - 0.01 * (C + P)^{0.5}$$

Donde:

PSI: índice de habilidad de servicio. Las secciones de prueba no tienen una longitud estándar.

SV: variancia de pendientes (medida de rugosidad), en millonésimas de pulgada por pulgada.

RD: profundidad promedio de roderas, en pulgadas.

C: agrietamiento, en pies cuadrados por cada 1000 pies cuadrados. Para caminos considerados en este manual, es igual a cero.

P: baches en pies cuadrados por cada 1000 pies cuadrados.

Algunas agencias de Estados Unidos han desarrollado ecuaciones de correlación entre los CPI (consideración de la idoneidad estructural) y los indicadores de rugosidad IRI (consideración de costos para el usuario).

- $PSI = 9.577 - 4.394 [\log (IRI / 5.9597)]$

- $PSI = 5 * [\exp (- 0.00286 * IRI)]$

2. Índice PCI (método PAVER).

$$PCI = 100 - CDV$$

CDV es el total de deducciones corregido, que depende del tipo, severidad y extensión de una serie de tipos de falla estandarizados.

En este caso se utiliza un concepto de extensión que depende del tipo de pavimento:

- En pavimentos rígidos: se requiere el número total de losas en que ha ocurrido cada combinación de tipo de falla y severidad. El número de ocurrencias se divide por el número total de losas analizadas. Por ejemplo, se determina la densidad de agrietamiento transversal de severidad media.

- En pavimentos flexibles: se requiere el número total de ocurrencias individuales (expresada en términos de cantidad, pies lineales o pies cuadrados), considerando las dimensiones del área analizada (sección de prueba).

EJEMPLO:

En un área de 10 pies por 100 pies, se han encontrado dos baches. En este caso, la extensión de baches (densidad), se calcula así:

$$\text{DENSIDAD} = 2 / (10 \cdot 100) \cdot 100 = 0.2 \%$$

Procedimiento para calcular el CDV:

1. Obtener las deducciones individuales por tipo de falla y severidad, a partir de la correspondiente extensión.
2. Sumar las deducciones individuales (TDV).
3. Corregir el TDV para tomar en cuenta la ocurrencia de múltiples tipos de falla. Se hace un ajuste que depende del total de deducciones individuales mayores a 5 (denominado q). El TDV no puede ser menor que la mayor deducción individual.
4. Calcular el PCI.

3. Índice URCI: Índice de condición de caminos no pavimentados (método USACE).

Este índice es un indicador numérico basado en una escala de 0 a 100. El URCI indica la condición de integridad y condición superficial operacional del camino. La escala de calificación es similar al índice de condición del pavimento PCI como se muestra en la siguiente Tabla.

Tabla 2.4. Escala de calificación para el índice URCI.

Calificación	Rango de valores
Excelente	85 – 100
Muy bueno	70 – 85
Bueno	55 – 70
Aceptable	40 – 55
Pobre	25 – 40
Muy pobre	10 – 25
Fallado	0 - 10

Esta calificación depende de siete parámetros medidos por inspección en el tramo de interés. En caminos no pavimentados: se requiere el número total de ocurrencias individuales (expresada en términos de cantidad, pies lineales o pies cuadrados), considerando las dimensiones del área analizada (sección de prueba). El número de ocurrencias se divide por el área o segmento analizados. Se determina la densidad de cada parámetro asociado a la severidad media como:

$$\text{Densidad} = \frac{D}{A} 100$$

Donde:

D: cantidad de deterioro

A: el área de la sección

El método considera los siguientes deterioros para calificar el estado del camino:

- Inapropiada sección transversal
- Inadecuado drenaje lateral
- Corrugaciones
- Polvo
- Baches
- Roderas
- Agregado suelto.

b. Deformación (respuesta ante la carga).

La deflexión es la medida de la deformación elástica que experimenta un pavimento al paso de una carga, y es función no sólo del tipo y estado del pavimento, sino también del método y equipo de medida. La medición de la deflexión, en general, se realiza en forma no destructiva y se utiliza para relacionarla con la capacidad estructural del pavimento.

Los primeros usos de la información de deflexiones, involucraba la deflexión máxima bajo la carga. Usualmente se consideraba un nivel de deflexión tolerable para una sección de pavimento bajo un tránsito determinado. Además, se utilizaba como recarpeteo para llevar las deflexiones a un nivel tolerable. En la actualidad, las mediciones de deflexiones tienen diversos usos:

- Identificación de las secciones de los pavimentos que son estructuralmente uniformes.
- Identificación de zonas débiles y/o deterioradas.
- Cálculo de la capacidad estructural.
- Diseño de recarpeteos o de rehabilitación.
- Restricciones de carga (estacionales y permanentes).
- Procedimientos para permitir sobrecarga.
- Aplicación en la gestión de pavimentos.
- Evaluación de anomalías.

Criterio de falla por deflexión

Varias agencias han desarrollado un criterio de falla por deflexión como la AASHO y RTAC (Asociación de Transportes de Canadá). Ambos basados en deflexiones medidas durante la primavera. Para caminos vecinales se puede considerar hasta un millón de ejes equivalentes, como las cargas que producirán la falla por deflexión, en el período de diseño o vida útil.

Criterio de la AASHO

Como resultado del tramo de prueba de la AASHTO se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\log W_{2.5} = 9.40 + 1.32 \log L_1 - 3.25 \log d_{sn}$$

donde:

$W_{2.5}$: Número de aplicaciones de carga de eje L_1 para un índice de serviciabilidad terminal de 2.5.

L_1 : Carga de eje simple (kips).

d_{sn} : Deflexión en la superficie del pavimento flexible medida con viga Benkelman (0.001 in).

Cuando se utiliza un eje equivalente de $L_1 = 18,000$ lbs:

$$\log W_{2.5} = 11.06 - 3.25 \log d_{sn}$$

Criterio de la RTAC

La deflexión por medio del criterio de la RTAC se calcula de la siguiente forma:

$$BB = 10^{[0.40824 - 0.30103(\log ESAL)]}$$

Donde:

BB : Deflexión máxima medida a una temperatura estándar 21°C (70°F), o

0.100 pulgadas para $ESAL \leq 47,651$, o

0.02 inches para $ESAL > 10,000,000$.

ESAL : 80 kN (18000 lb).

La Tabla 2.5 muestra la comparación de deflexiones máximas permitidas para diferentes escenarios de carga, de los criterios mencionados:

Tabla 2.5. Comparación de criterios de falla por deflexión.

Cargas (ESALS)	Deflexión máxima in (mm)	
	AASHO	RTAC
10,000	0.148 (3.76)	0.100 (2.54)
100,000	0.072 (1.83)	0.080 (2.03)
1,000,000	0.036 (0.914)	0.040 (1.01)
10,000,000	0.018 (0.457)	0.020 (0.508)

Correlación entre deflexiones medidas con FWD y viga Benkelman

Basado en la base de datos del Laboratorio de materiales del Ministerio de Transportes de Washington State de 1982-1983:

$$BB = 1.33269 + 0.93748 (\text{FWD})$$

donde: BB = Deflexión de viga Benkelman (inches x 10⁻³)

FWD = Deflexión FWD en el punto de carga (inches. x 10⁻³)
corregido para una carga aplicada de 9,000 lb. Sobre un
plato de carga con diámetro de 11.8-inch.

$$R^2 = 0.86 \quad \text{Error Estándar} = 3.20 \text{ mils} \quad \text{Tamaño de muestra} = 713$$

3. DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE TRAMOS

El desarrollo de un inventario de la red vial o del proyecto por analizar es de suma importancia para alimentar un sistema de gestión de pavimentos. Un inventario contiene las características permanentes del pavimento, por lo que existe una amplia variedad de datos que serán candidatos a considerarse, como los siguientes:

- Referencia (ubicación)
- Descripción de la sección
- Geometría (clasificación y características físicas)
- Estructura del pavimento (espesores y materiales de cada capa)
- Características de la fundación, CBR, módulo resiliente, y módulo de reacción de la subrasante (K)
- Cortes y terraplenes
- Medio ambiente (temperatura y lluvia) y drenajes (condiciones locales)

Para determinar el tipo de datos por recolectar se puede elegir un método estandarizado; en general existen cuatro métodos básicos de referencia:

- Kilometraje, usado generalmente en carreteras. Cada ruta tiene un nombre o número que la identifica.
- Nodo-unión, normalmente usados en ciudad, los puntos claves de la red son definidos como nodos y los tramos entre ellos definen las uniones.
- Rama-sección, las características de la red se definen como ramas, y las unidades homogéneas de las ramas se definen como secciones.
- Sistema georeferenciado, se basa en la ubicación cartográfica.

Para lograr conocer y ordenar la información recolectada se necesita subdividir la vía en tramos y estos a su vez en sectores. Este procedimiento se llama tramificación, y se refiere a la subdivisión de un camino con base en aquellos parámetros que presentan una cierta constancia en el tiempo, por ejemplo estructura, tránsito y clima. En cambio, sectorización se refiere a la discriminación de sectores distintos, dentro de cada tramo, debido a condiciones de estado del pavimento, por ejemplo rugosidad y agrietamiento.

3.1 SELECCIÓN DE TRAMOS

1. Consideraciones de tipo de pavimento:

Estructuras de pavimento granular (no pavimentadas). Este tipo de pavimento con sus diferentes espesores de capa y materiales.

2. Consideraciones de edad del pavimento:

Para esto es necesario llevar un registro de la apertura al tránsito de la estructura de pavimento y de todas las obras de rehabilitación, mantenimiento y reconstrucción, a lo largo del tiempo.

3. Consideraciones de volumen de tránsito:

Existen varias clasificaciones de los niveles de tránsito vehicular a partir de diversas zonas y de importancia de las carreteras, en términos de tránsito promedio diario (TPD). Por ejemplo, existen niveles de tránsito establecidos para zonas residenciales, zonas rurales, caminos secundarios, carreteras, autopistas, entre otros. Otra forma de conocer el nivel de tránsito es por medio de conteos vehiculares puntuales en la zona de interés, para determinar el TPD. El cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos establece 4 categorías para la cantidad de vehículos en caminos vecinales:

Categoría I: caminos de más de 200 vehículos por día (TPD).

Categoría II: entre 100 a 199 vehículos por día.

Categoría III: entre 50 a 99 vehículos por día.

Categoría IV: entre 0 a 49 vehículos por día

4. Consideraciones de condición o estado del pavimento:

Se refiere a la condición estructural del pavimento, como capacidad de soporte del suelo de fundación y las propiedades físico – mecánicas de las otras capas (módulo resiliente), obtenidas principalmente por deflectometría de impacto.

5. Consideraciones climáticas:

Es necesario conocer la temperatura ambiental a las que está expuesto el pavimento (temperatura promedio diaria) y la cantidad de agua de lluvia que cae sobre el pavimento (mm de altura del agua). En la Figura 1 se muestra un ejemplo de tramificación:

Estructura	A		B		
	E1	E2	E1	E2	
Edad					
Tránsito	T1			T2	
Clima	C1		C2		
Suelo de fundación	S1	S2			
Tramos	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5

Figura 1. Ejemplo de tramificación.

4. CRITERIOS DE VALORACIÓN MECANÍSTICA PARA LA FALLA

4.1 INTRODUCCIÓN

Varias ecuaciones han sido desarrolladas para predecir el desempeño de las estructuras de pavimento, principalmente se han desarrollado basándose en análisis de regresión. Estas ecuaciones ilustran el efecto de varios factores que afectan el desempeño de una estructura de pavimento, pero su utilidad en la práctica puede verse limitada por el alcance de la base de datos que fue usada para su desarrollo.

Las ecuaciones de regresión son válidas únicamente bajo ciertas circunstancias y no deberían ser aplicadas cuando las condiciones de aplicación son diferentes. Las constantes de regresión varían con las unidades usadas.

Estas ecuaciones de regresión son también conocidas como funciones de transferencia, y se usan principalmente para estimar o predecir la vida útil del pavimento mediante la aplicación de la metodología de diseño estructural mecánica-empírica. La estructura de pavimento es simulada usando análisis de multicapa elástica, con el fin de calcular esfuerzos y deformaciones en puntos críticos de la estructura (lo que sería la parte mecánica del diseño); estos esfuerzos y deformaciones críticos son las variables evaluadas para predecir el desempeño del pavimento (parte empírica del diseño).

Las funciones de transferencia usadas para predecir la vida útil de una estructura de pavimento flexible son: agrietamiento por fatiga y deformación permanente de la subrasante. El agrietamiento por fatiga está relacionado con las deformaciones radiales por tensión en la parte inferior de la carpeta asfáltica y la deformación permanente por las deformaciones de compresión vertical sobre la subrasante.

También existen otras funciones de transferencia que consideran esfuerzos y deformaciones para otros materiales para pavimentos como bases granulares o estabilizadas como las desarrolladas en Sur África, donde se considera la condición más crítica para falla del material, ya sea, una falla por fatiga o deformación, pero que de igual forma corresponden a condiciones particulares y no se pueden generalizar.

4.2 DISEÑO EMPÍRICO – MECANÍSTICO DE PAVIMENTOS

Este procedimiento de diseño estructural de capas de pavimento se basa en el análisis mecánico para escoger una combinación de espesores y materiales con el fin de suministrar el nivel de servicio deseado de acuerdo con el tránsito predicho. Se ha mencionado el tránsito de forma explícita pero los elementos del procedimiento de diseño mecánico abarcan además los efectos climáticos, el modelo estructural y la respuesta del pavimento, la caracterización de los materiales, las funciones de transferencia y el análisis del comportamiento para concluir con el proceso de selección del sistema de pavimento a construir. La Figura 2 muestra el procedimiento de este método de diseño estructural.

El modelo mecánico se basa en la física elemental (teoría multicapa) y determina las reacciones del pavimento a la carga de las ruedas en términos de esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones (σ , ϵ , Δ). La parte empírica del diseño utiliza las reacciones del pavimento para predecir la vida del mismo basada en observaciones hechas en campo. Así, el término “empírico” se debe a la definición de las funciones de transferencia a partir de datos reales.

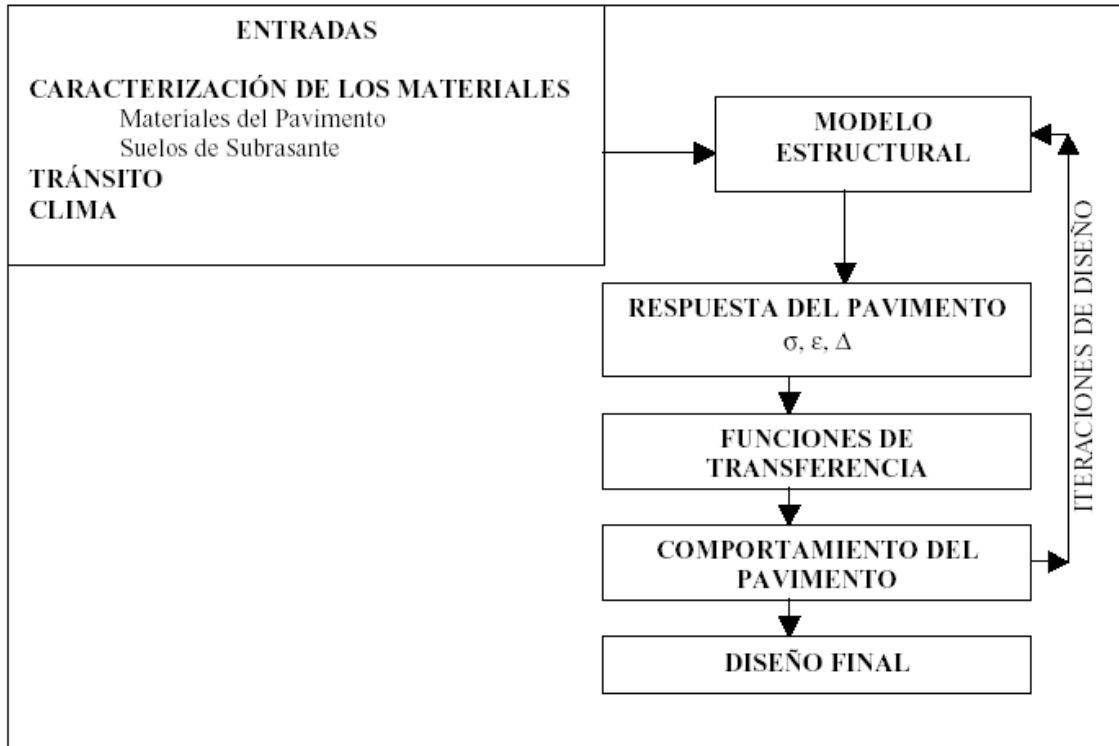


Figura 2. Procedimiento de diseño Mecánico – Empírico.

4.3 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Se define *función de transferencia* como el *vínculo* entre la respuesta de la estructura de pavimento, predicha por el modelo estructural, y el comportamiento (desempeño) o nivel de servicio esperado que es lo que interesa al diseñador. La selección de las funciones de transferencia apropiadas requieren el conocimiento de los tipos de falla que comúnmente ocurren asociadas a las cargas y el entendimiento de la relación entre estos daños y la respuesta estructural del pavimento.

AHUELLAMIENTO de la superficie del pavimento debido a la deformación permanente de la subrasante. En realidad el ahuellamiento es la suma de la consolidación y el desplazamiento de todas las capas de la estructura del pavimento y de la subrasante, pero pueden suceder aportes excesivos de la estructura debido a un proceso inadecuado de construcción y compactación. Este fenómeno se controla en términos de la deformación unitaria por compresión (ϵ_z) en la parte superior de la subrasante, aunque se han formulado funciones de transferencia con el esfuerzo vertical (σ_z) en la misma posición.

La función de transferencia para ahuellamiento se expresa de la siguiente forma:

$$N_d = f_4 \times (\epsilon_z)^{-f_5} \quad \text{EC. 1}$$

Donde:

Nd: Número de repeticiones admisibles para prevenir el ahuellamiento de la superficie del pavimento.

ϵ_z : Deformación unitaria por compresión en la parte superior de la subrasante en microstrain (mm/mm).

f_4 y f_5 : Coeficientes determinados de observaciones de comportamiento en campo en ensayos viales como el AASHTO y a partir de un valor máximo admisible de profundidad de la huella.

La Ecuación 1 corresponde a la forma utilizada en el programa KENLAYER (Huang, 1994) y es prácticamente idéntica en el programa ROADENT 4.0 como se escribe a continuación.

$$N_r = K_3 \times \left(\frac{1}{\epsilon_z} \right)^{K_4} \quad \text{EC. 2}$$

Donde:

Nr: Número de repeticiones admisibles para prevenir el ahuellamiento de la superficie del pavimento.

ϵ_z : Deformación unitaria por compresión en la parte superior de la subrasante en microstrain (mm/mm).

K_3 y K_4 : Coeficientes determinados de observaciones de comportamiento en campo del Minnesota Road Test.

En la Tabla 4.1 se presentan algunas expresiones de la función de transferencia para ahuellamiento para los programas KENLAYER y ROADENT 4.0, en la Figura 3 se representan la capacidad de repeticiones admisibles para la falla en función de la deformación unitaria en la fibra superior de la subrasante.

Tabla 4.1. Funciones de transferencia para ahuellamiento.

Ecuación	KENLAYER		ROADENT 4.0	
	f_4	f_5	K_3	K_4
Dormon y Metcalf	6.069×10^{-10}	4.76190	2.2623×10^{19}	4.76190
CRR (Bélgica)	3.0505×10^{-19}	4.34780	3.7254×10^{17}	4.34780
Nottingham	1.1263×10^{-6}	3.57140	3.0204×10^{15}	3.57140
AASHO - SHELL				
50% nivel de confianza	6.1466×10^{-7}	4.00000	6.1466×10^{17}	4.00000
85% nivel de confianza	1.9448×10^{-7}	4.00000	1.9448×10^{17}	4.00000
95% nivel de confianza	1.0498×10^{-7}	4.00000	1.0498×10^{17}	4.00000
LCPC	1.0214×10^{-7}	4.16670	1.0219×10^{18}	4.16670
Chevron	1.6076×10^{-9}	4.44444	7.4159×10^{17}	4.44444
Asphalt Institute	1.365×10^{-9}	4.47700	9.9338×10^{17}	4.47700
Animesh & Pandey	$4.760 \times 10^{-8*}$	4.53370	$7.5824 \times 10^{19*}$	4.53370

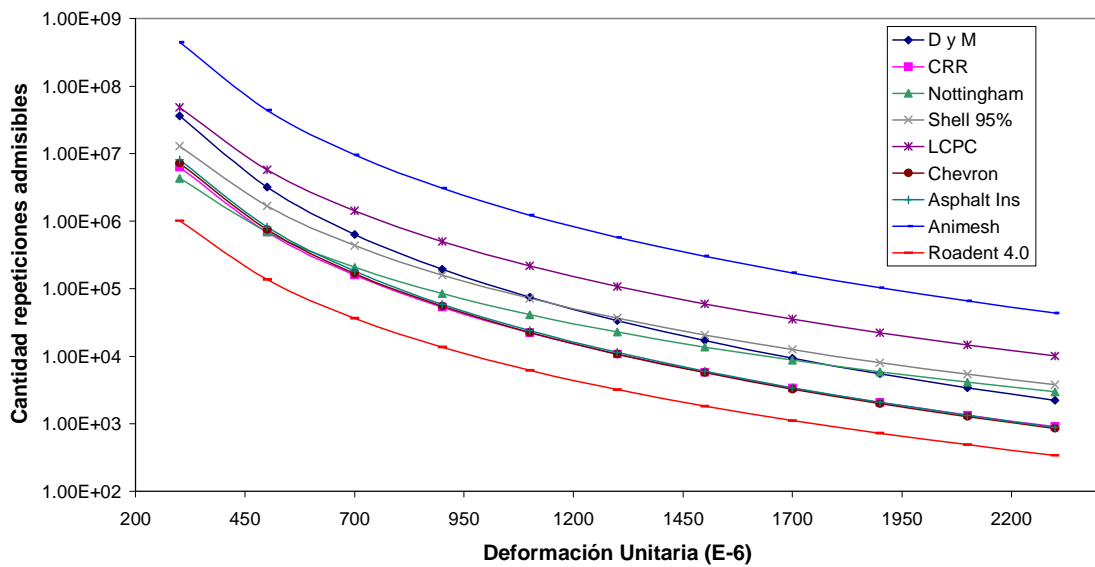


Figura 3. Funciones de Transferencia para ahuellamiento

Para las capas compuestas por material granular, el criterio de falla está dado por la deformación de la estructura granular debido a las tensiones de corte, bajo cargas repetidas de tránsito. Las funciones de transferencia (ecuaciones de deformación) para las capas granulares desarrolladas por el CSIR de Sudáfrica son las siguientes:

$$N_f = 10^{(2.605122 \cdot F + 3.983324)}$$

$$F = \frac{\sigma_3 \phi_{term} + c_{term}}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

donde:

N_f = Ejes equivalentes admisibles.

σ_1 = Esfuerzo de compresión en la parte media de la capa.

σ_3 = Esfuerzo de tensión en la parte media de la capa.

ϕ_{term} = ángulo de fricción interna.

c_{term} = cohesión.

En la Tabla 4.2 se muestran algunos valores de fricción interna y cohesión calculados a partir de materiales granulares de Sur África.

Tabla 4.2. Valores aproximados de fricción y cohesión para materiales granulares

Material	Módulo resiliente MPa (CBR)	Condición de humedad					
		Seco		Moderado		Húmedo	
		ϕ_{term}	C_{term}	ϕ_{term}	C_{term}	ϕ_{term}	C_{term}
Piedra quebrada bien graduada	300 (114)	8.61	392	7.03	282	5.44	171
Piedra quebrada o grava natural (Calidad base)	250 (80)	7.06	303	5.76	221	4.46	139
Piedra quebrada	230 (70)	6.22	261	5.08	188	3.93	115
Grava natural (calidad subbase)	200 (55)	3.60	143	3.30	115	3.17	83
Grava natural	120 (22)	2.88	103	2.32	84	1.76	64

5. CRITERIOS DE VALORACIÓN PARA EL DAÑO POR HUMEDAD

Para valorar el daño causado por la presencia de humedad en las capas granulares se aplicará el Índice de condición de caminos no pavimentados URCI y estudios de campo – laboratorio (CBR en sitio, deflectometría de impacto y determinación de propiedades mecánicas en laboratorio).

5.1 ÍNDICE DE CONDICIÓN DE CAMINOS NO PAVIMENTADOS URCI

Los siete tipos de deterioro para caminos no pavimentados se describen a continuación junto con las figuras A-1 a A-14 del Anexo:

A) Inapropiada sección transversal

Una sección es inapropiada cuando la superficie no está nivelada o no se le da el mantenimiento para conducir el agua a los drenajes.

Niveles de severidad:

1. Nivel L: Pequeñas cantidades de agua superficial y la superficie es completamente plana.
2. Nivel M: Moderada cantidad de agua en la superficie y se tiene una superficie redondeada.
3. Nivel H: gran cantidad de agua superficial (charcos) y superficie con severas depresiones.

Forma de medirlo: se mide en metros lineales y la sección transversal va desde un espaldón a otro (ver Figuras A-1 y A-2).

B) Inadecuado drenaje lateral

Niveles de severidad:

1. Nivel L: Pequeñas cantidades de agua estancada y presencia de maleza.
2. Nivel M: Moderada cantidad de agua estancada, presencia de maleza y erosión de los espaldones.
3. Nivel H: gran cantidad de agua superficial estancada, presencia de maleza, erosión de los espaldones y agua corriendo a través del camino.

Forma de medirlo: se mide en metros lineales. La distancia incluye los drenajes a ambos lados del camino, por lo que la máxima distancia será el doble de la distancia del segmento analizado (ver Figuras A-3 y A-4).

C) Corrugaciones

Normalmente se presentan en áreas de aceleración desaceleración, o en lugares de material suave o lleno de baches.

Niveles de severidad:

1. Nivel L: corrugaciones o surcos de menos de 2.5 cm de profundidad.
2. Nivel M: corrugaciones entre 2.5 y 7.5 cm de profundidad.
3. Nivel H: corrugaciones de más de 7.5 cm de profundidad.

Forma de medirlo: se mide en metros cuadrados o en área superficial por unidad de muestra (ver Figuras A-5 y A-6).

D) Contenido de Polvo en el aire

Niveles de severidad:

1. Nivel L: el tránsito normal produce una delgada capa de polvo que no obstruye la velocidad.
2. Nivel M: el tránsito normal produce una nube de polvo que obstruye parcialmente la visibilidad.
3. Nivel H: el tránsito normal produce una nube densa de polvo y obstruye severamente la visibilidad.

Forma de medirlo: se mide conduciendo un vehículo a 40 km/h y se observa la nube de polvo que se forma (ver Figura A-7).

E) Baches

Niveles de severidad: estos niveles corresponden al diámetro y a la profundidad de los baches, según la siguiente tabla:

Tabla 5.1. Niveles de severidad de los baches.

Profundidad máxima	Diámetro promedio			
	Menos de 0.3 m	0.3 a 0.6 m	0.6 a 1.0 m	Más de 1.0m
1.5 a 5.0 cm	L	L	M	M
5.0 a 10 cm	L	M	H	H
10 cm o más	M	H	H	H

Si el diámetro del bache es mayor a 1.0 m el área deberá ser dividida entre 7 para obtener el número equivalente de baches.

Forma de medirlo: se cuenta la cantidad de baches en cada nivel de severidad (ver Figuras A-8 y A-9).

F) Rodera

Niveles de severidad:

1. Nivel L: profundidad de la rodera inferior a 2.5 cm.
2. Nivel M: profundidad de la rodera entre a 2.5 a 7.5 cm.
3. Nivel H: profundidad de la rodera superior a 7.5 cm.

Forma de medirlo: con esta metodología se mide por metro cuadrado o área por unidad de muestreo (ver Figuras A-10 y A-11).

G) Agregado suelto

Niveles de severidad:

1. Nivel L: agregado suelto sobre la superficie de menos de 5.0 cm de profundidad.
2. Nivel M: cantidad moderada de agregado suelto sobre la superficie entre 5.0 cm y 10 cm de profundidad.
3. Nivel H: gran cantidad de agregado suelto sobre la superficie por encima de 10 cm.

Forma de medirlo: se mide en metros lineales (ver Figuras A-12 y A-13).

Por medio de las curvas de puntaje para cada nivel de severidad se calcula un valor total con la suma de todos estos puntos y se cuentan cuales de estos parámetros son mayores a 5 con lo que se tiene el valor de curva "q", el cual, junto con el puntaje total se utilizan como entrada en la Figura A-14, donde se obtiene el índice URCI para determinado escenario.

Determinación de la profundidad de las roderas:

Las roderas son las depresiones que se presentan en la huella del neumático, estas se miden utilizando una barra larga o un escantillón, el cual se coloca sobre la huella donde se mide la profundidad.

Determinación de la rugosidad de la superficie:

La rugosidad de la superficie se mide con las metodologías planteadas anteriormente y se utiliza en Índice de Rugosidad internacional como parámetro de medición.

Capacidad de soporte de la subrasante y de las capas superiores:

La capacidad de soporte de las diferentes capas se determina por las pruebas de CBR en sitio, por medio de mecanismos como el cono de penetración dinámica con lo cual se puede calcular el módulo resiliente de cada capa por medio de las siguientes ecuaciones:

$$Mr = 17.6 \cdot CBR^{0.64} \quad (\text{MPa}) \quad 2 < \text{CBR} < 12$$

$$Mr = 22.1 \cdot CBR^{0.55} \quad (\text{MPa}) \quad 12 < \text{CBR} < 80$$

Por otro lado por medio de deflectometría de impacto se obtienen respuestas mecánicas debido a la carga aplicada (esfuerzo, deformación y deflexión) por medio de los cuales se obtienen características físicas y mecánicas de los materiales.

5.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

Ensayos para caracterizar el material:

Agregados Gruesos y Finos

Índice de abrasión en máquina Los Ángeles

ASTM C 131, C 535; AASHTO T 96

Sanidad

ASTM C88, AASHTO T 104

Durabilidad

ASTM D 3744

Residuo insoluble en la prueba de carbonatos solubles

(si los agregados son de origen calcáreo)

Gravedad específica y absorción

ASTM C 127, AASHTO T 100

Caras fracturadas

Partículas planas y elongadas

ASTM D 4791

Equivalente de arena

ASTM C 2419

Límites de Atterberg

ASTM D 43, AASHTO T 89

Vacíos en el agregado fino no compactado

ASTM C 1252

Agregados combinados

Granulometría

ASTM C126, C117; AASHTO t27,11

Contenido de polvo

(Porcentaje que pasa la malla No. 200)

Peso unitario

ASTM C 29; AASHTO T 29

Ensayos para determinar propiedades físicas y mecánicas de materiales granulares:

- Capacidad de soporte (CBR)
- Ensayo Proctor (Contenido óptimo de humedad y densidad máxima seca)
- Ensayo triaxial cíclico
- Módulo resiliente

Ensayos para determinar el desempeño de materiales granulares:

- Deflectometría de impacto
- CBR en sitio

5.3 SEGUIMIENTO HISTÓRICO

Para llevar un control de los cambios producidos por el efecto del clima y la humedad es necesario efectuar al menos una medición en cada estación del año (una en el verano y otra en invierno), además de realizar conteos vehiculares en los mismos puntos dentro de los tramos del camino, todos los años, esto con el fin de determinar las cargas que ha recibido la estructura.

Por otro lado se deben realizar muestreos de material durante ambas estaciones del año y se debe llevar un control de las acciones de mantenimiento que se realizan sobre los diferentes tramos.

Se puede determinar el período de vida útil a partir de las ecuaciones de transferencia aplicados en la metodología de diseño mecánica – empírica, o se puede considerar cualquiera de los índices mencionados para definir el momento en que se llega al término de la vida útil de la estructura de pavimento y pasar a la formulación de los modelos de deterioro.

5.4 DESARROLLO DE LOS MODELOS

Para el desarrollo de los modelos se pueden emplear técnicas de regresión estadística de la información proveniente de un seguimiento histórico, esto es, información que ha sido coleccionada en una base de datos factorialmente diseñada, a partir de pavimentos en servicio bajo diferentes condiciones de estructura y tránsito, esto desde el momento de su apertura a los usuarios.

La forma de los modelos es incremental, ya que predicen el cambio en la condición del pavimento a lo largo de un cierto incremento de tiempo como función de la condición actual del pavimento, de sus características estructurales y de las solicitaciones externas (tránsito y condiciones climáticas), de la siguiente forma:

Δ (deterioro futuro tras incremento de tiempo) = f (condición actual, cargas y volumen de tránsito, resistencia del pavimento, clima y mantenimiento aplicado)

Esta forma de modelación presenta un pequeño problema debido a que la evolución del deterioro es generalmente lenta y los cambios observados en la condición de los pavimentos son usualmente pequeños y muy sensibles a los errores de la medición. Por este motivo se procede a minimizar este problema aplicando técnicas de estimación a los datos en series de tiempo; tales como:

- Regresión lineal basada en la estimación de coeficientes mediante mínimos cuadrados.
- Regresión lineal de la transformación logarítmica de los parámetros, con corrección para la media logarítmica.
- Regresión lineal de la transformación logística de los parámetros (funciones de forma sigmoidal).
- Regresión no lineal basada en mínimos cuadrados de los residuales.

Para dar forma a los modelos y seleccionar los métodos analíticos que se deben utilizar y a fin de conformar los mejores modelos incrementales de predicción se pueden conjugar las fortalezas de los métodos existentes: el método mecánica, en su perspectiva tanto teórica como experimental, y el método empírico.

Como variables de salida se consideran las que se pueden medir fácilmente mediante la simple inspección, como son los deterioros medidos con el índice URCl, otras variables de entrada pueden ser los resultados de una evaluación del estado del pavimento como son deflexiones y rugosidad.

Como variables de entrada se consideran el tránsito, el clima, la capacidad de soporte de la subrasante, las características físico-mecánicas de las capas y los espesores de las mismas.

La forma general de las ecuaciones de deterioro pueden ser de la siguiente forma:

$$\text{Deterioro} = a(\text{Tránsito}) + b(\text{clima}) + c(\text{Material}) + d(\text{subrasante}) + e(\text{diseño})$$

En la Figura 4 se muestra el esquema general para el desarrollo de modelos de desempeño para caminos vecinales. En este esquema, se comienza con los datos de entrada: Espesores de capa, materiales, cargas, capacidad de soporte, clima (temperatura y humedad), esto para la modelación mecánica; severidad de los deterioros de inadecuada sección transversal, inadecuado drenaje, corrugaciones, polvo, roderas, baches y agregado suelto, como datos de entrada para el índice URCl y a la vez sirven como variables dependientes a variables salida del modelo de deterioro, al igual que los esfuerzos, deflexiones y deformaciones derivados de la modelación mecánica.

5.5 CRITERIOS PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS:

Los modelos obtenidos no representan en un 100 por ciento la realidad y son aplicables bajo condiciones similares a las que fueron aplicadas, por lo que se vuelve necesario realizar un proceso de calibración y ajuste de los modelos. Esto se lleva a cabo mediante la verificación de varios de los parámetros medidos para desarrollar el modelo, con el fin de observar la aplicabilidad del modelo y corregirlo o adaptarlo a las nuevas condiciones. Por ejemplo, si se desarrolla un modelo con base en una estructura de pavimento en Guanacaste y con materiales del lugar, y se quiere aplicar el modelo en la zona de San José. Aunque se logran reproducir las propiedades de los materiales y las propiedades en general de la estructura de pavimento, no se puede dejar de lado el efecto del clima, el efecto de las cargas de tránsito entre otros.

Cuando un modelo de deterioro, desarrollado con información empírica, asociada a determinadas condiciones de clima, tipo y forma de cargas, materiales, técnicas constructivas, entre otros, es usado en condiciones diferentes a las que sirvieron para su desarrollo, pueden presentarse diferencias de cierta importancia entre el nivel de deterioro que el modelo predice y los que se observan en la realidad.

Calibrar un modelo consiste en definir un procedimiento de cálculo de factores de calibración numéricos, que modifican la predicción del modelo ajustándolo de acuerdo a la información provista por bases de datos de pavimentos de una región.

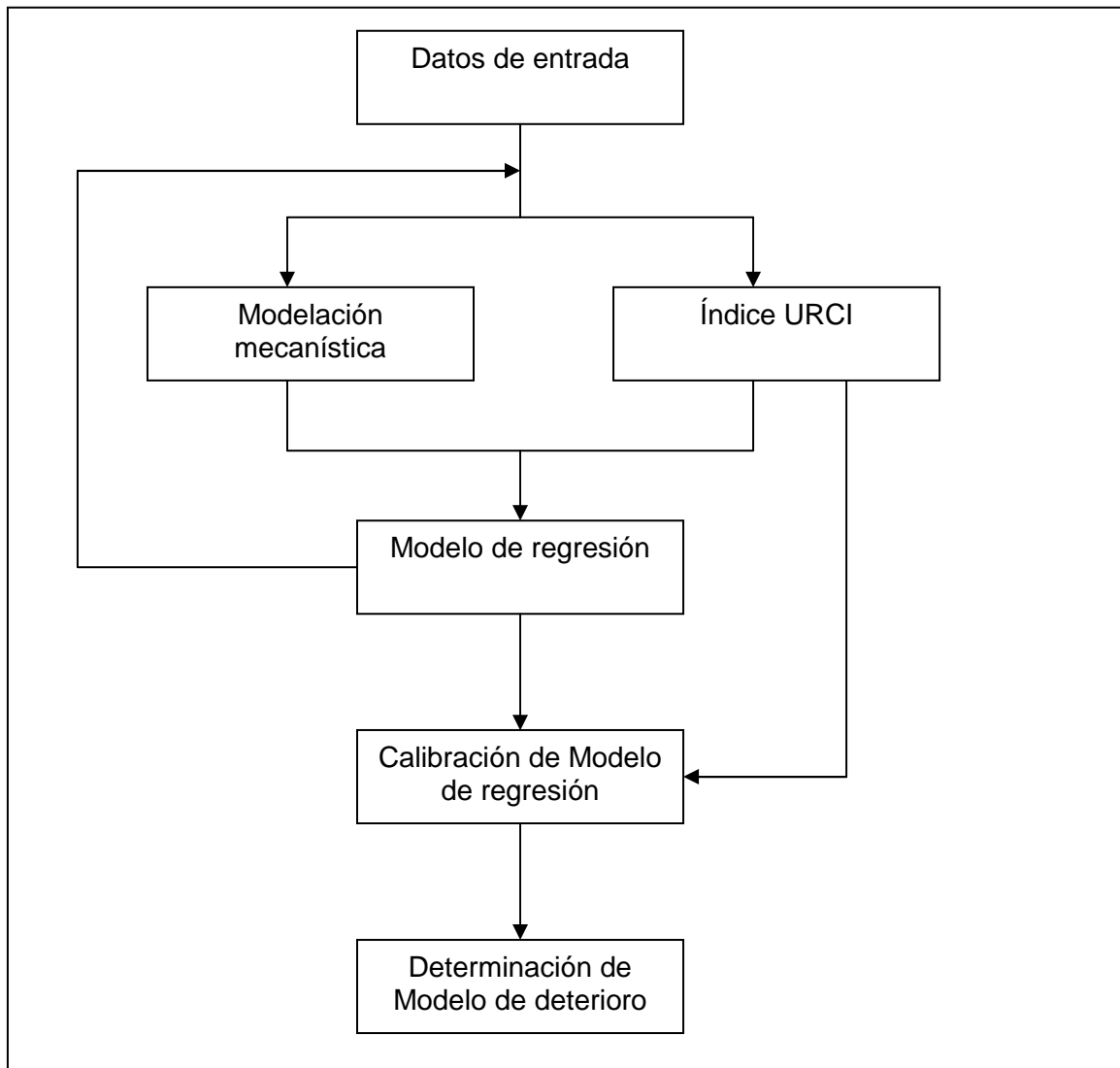


Figura 4. Esquema para el desarrollo de modelos de deterioro para caminos vecinales.

La calibración puede realizarse tanto a nivel de proyecto, como a nivel de red de la siguiente forma:

- Calibración de modelos de deterioro a nivel de tramos testigo: por medio de un registro continuo de la evolución de los diferentes deterioros en un conjunto de tramos testigo por un período de tiempo (pueden ser 5 años). Por medio de los datos recopilados se ajustan los modelos de deterioro para cada tramo testigo por separado, con lo cual se obtienen factores de ajuste para cada pavimento.
- Método de ventanas: consiste en seleccionar un conjunto de secciones de caminos que tengan características similares, pero con edades lo más diferentes posible, a fin de registrar el estado de deterioro de cada uno y reconstruir curvas de deterioro representativas del conjunto. Estableciendo las condiciones similitud, pueden obtenerse distintos grupos de pavimentos en una

red; a cada grupo con características similares corresponderá una serie de factores de calibración para las correspondientes curvas de evolución de los distintos tipos de deterioro. Los modelos calibrados por este método representan condiciones medias dentro de cada conjunto de pavimentos, por lo cual son muy útiles para evaluar políticas de mantenimiento a nivel de una red vial.

- Análisis de deterioro predicho vs observado: mediante el análisis de gráficos de deterioro predicho vs observado no se ajusta la forma de comportamiento en forma directa. Este método tiene la ventaja de que el análisis no requiere que los pavimentos seleccionados sean similares entre sí, ya que no se ajustan curvas medias de la evolución de deterioro, sino que se corrige una tendencia global a la sub o sobre predicción del deterioro.

El procedimiento matemático empleado para calcular los factores de calibración, puede variar dependiendo del tipo de deterioro que se analice. El objetivo es minimizar la expresión de error total, que representa la diferencia entre valores observados y valores predichos por los respectivos modelos:

$$E_t = \sum_{i=1}^n (Vobs_i - Vpred_i)^2$$

Los factores de ajuste del modelo se pueden ver como valores que modifican las constantes de la ecuación de la siguiente forma:

$$\text{Deterioro} = \beta_1 * a(\text{Tránsito}) + \beta_2 * b(\text{clima}) + \beta_3 * c(\text{Material}) + \beta_4 * d(\text{subrasante}) + \beta_5 * e(\text{diseño})$$

Donde:

β_i es el factor de ajuste para cada variable de entrada.
a, b, c, d y e son las constantes originales del modelo.

6. Referencias

- Department of the Army. **Unsurfaced Road Maintenance Management.** Technical Manual, 1995.
- Vásquez V, Luis Ricardo. **Funciones de transferencia en el procedimiento de diseño empírico-mecanístico de pavimentos flexibles.** Universidad Nacional de Colombia.
- Huang, Yang H. **Pavement Analysis and Design.** Prentice Hall. USA, 1993.
- De Solminihaç, Hernán. **Gestión de Infraestructura Vial.** Universidad Católica de Chile, 1998.
- H L Theyse. **Overview of the South African Mechanistic Pavement Design Analysis Method.** TRANSPORTEK, CSIR, 1996.
- Devore, Jay L. **Probability and Statistics for Engineering and the Sciences.** Duxbury, 1999.
- **Hot mix asphalt pavement design.** Washington State Department of Transportation.

ANEXOS

Deterioro de caminos no pavimentados: Índice URCI

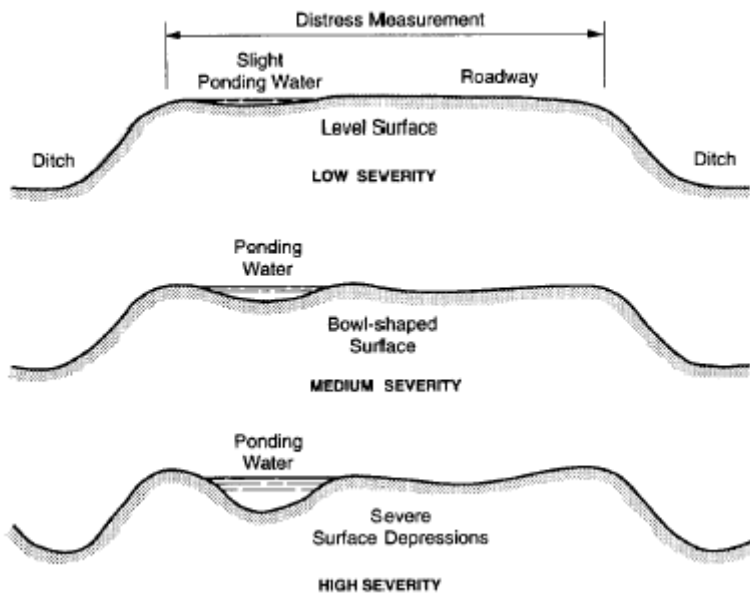


Figura A1. Niveles de severidad para Inapropiada sección transversal

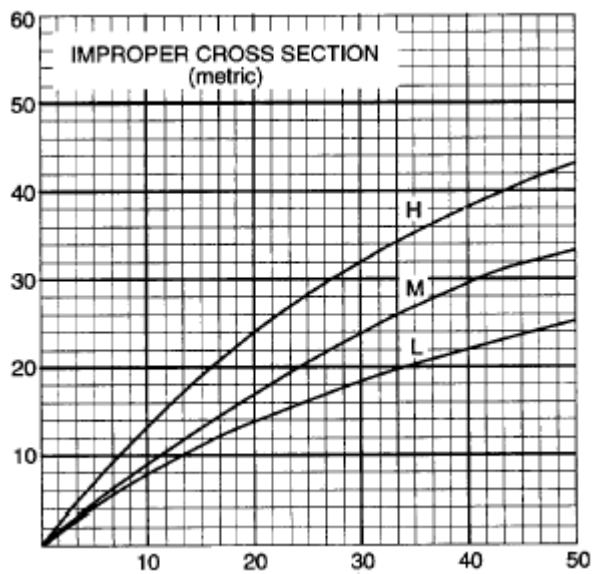


Figura A2. Puntaje para una Inapropiada sección transversal

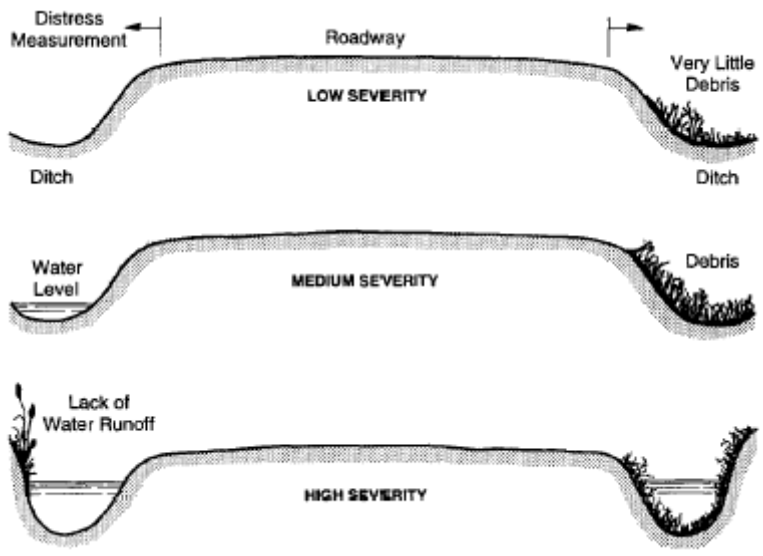


Figura A3. Niveles de severidad para Inadecuado drenaje

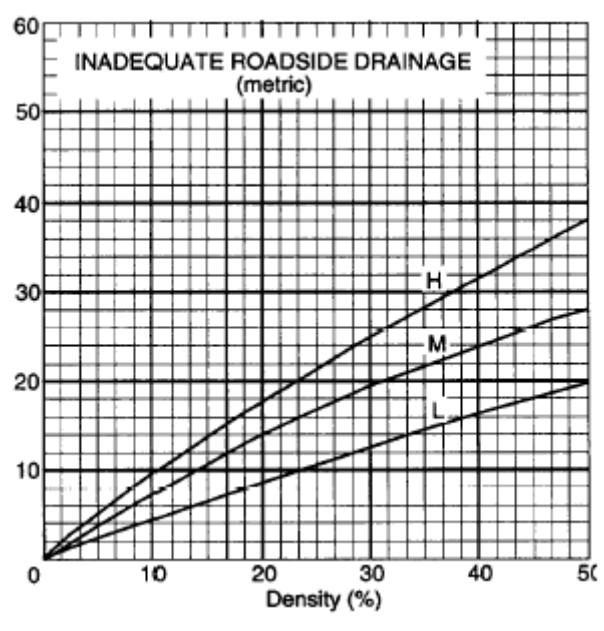


Figura A4. Puntaje para un Inapropiado drenaje.

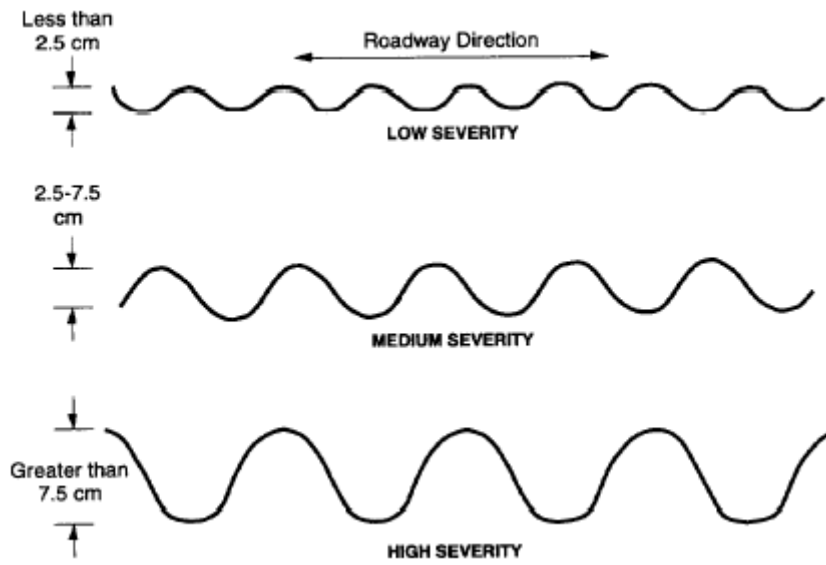


Figura A5. Niveles de severidad para corrugación.

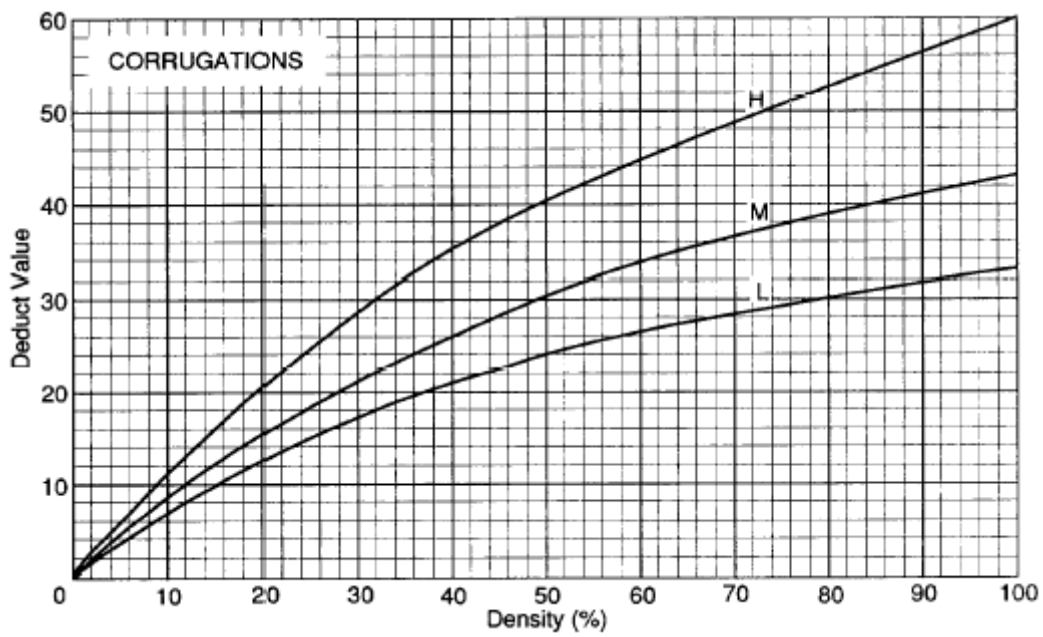


Figura A6. Puntaje para corrugaciones.

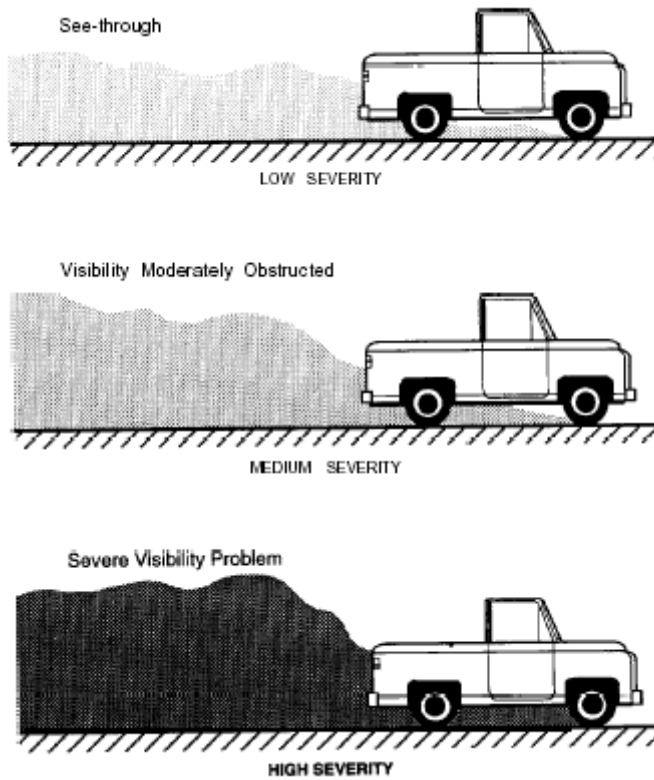


Figura A7. Niveles de severidad del contenido de polvo en el aire.

El contenido de polvo no es ranqueado por densidad. El puntaje para los niveles de severidad son:

Bajo (Low)	2 puntos
Medio (Medium)	4 puntos
Alto (High)	15 puntos

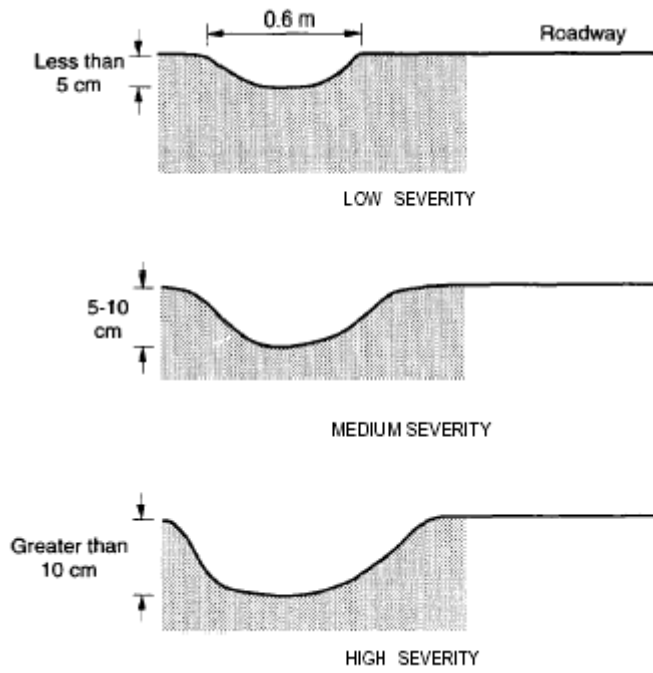


Figura A8. Nivel de severidad para Baches.

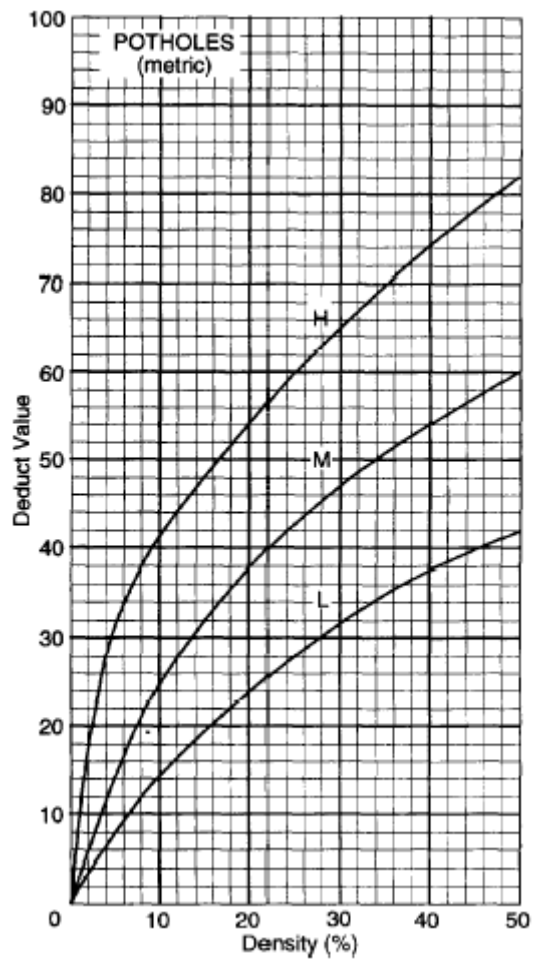


Figura A9. Puntaje para los niveles de severidad en Baches.

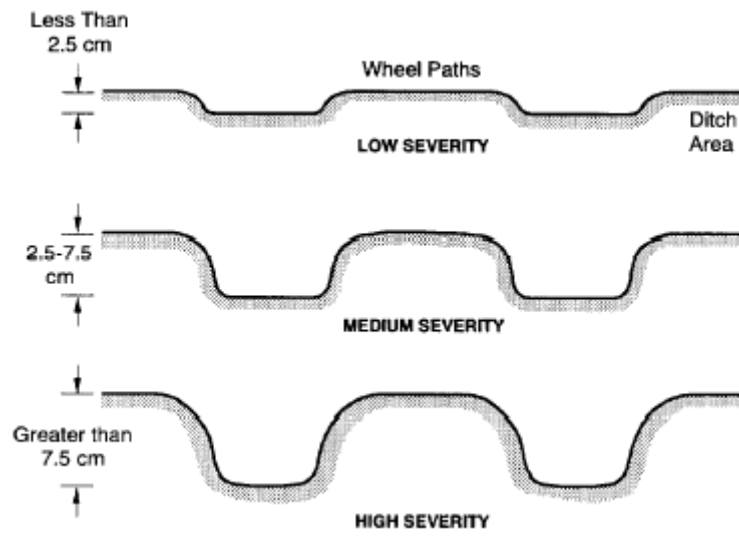


Figura A10. Nivel se severidad de roderas.

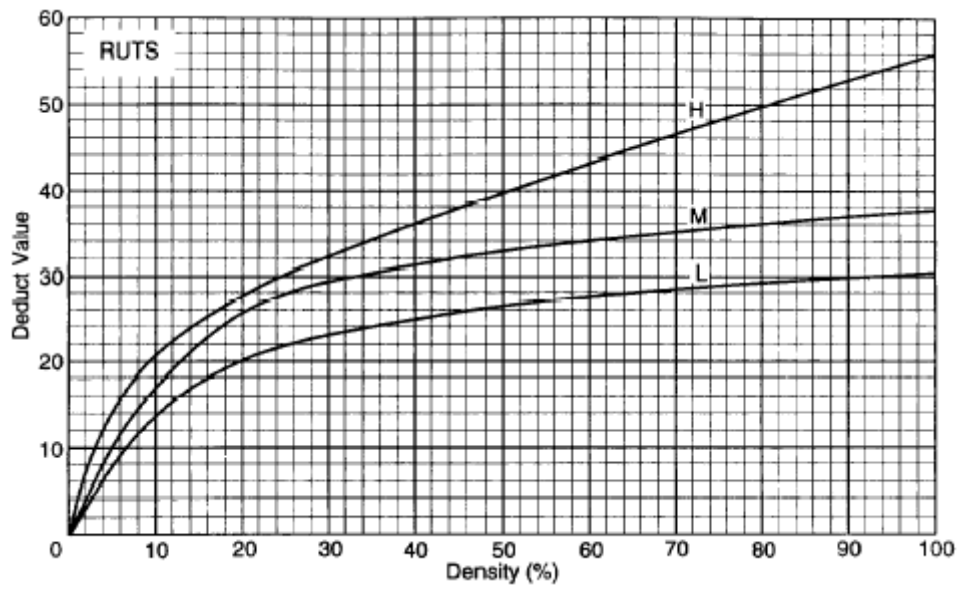


Figura A11. Puntaje para niveles de severidad en roderas.

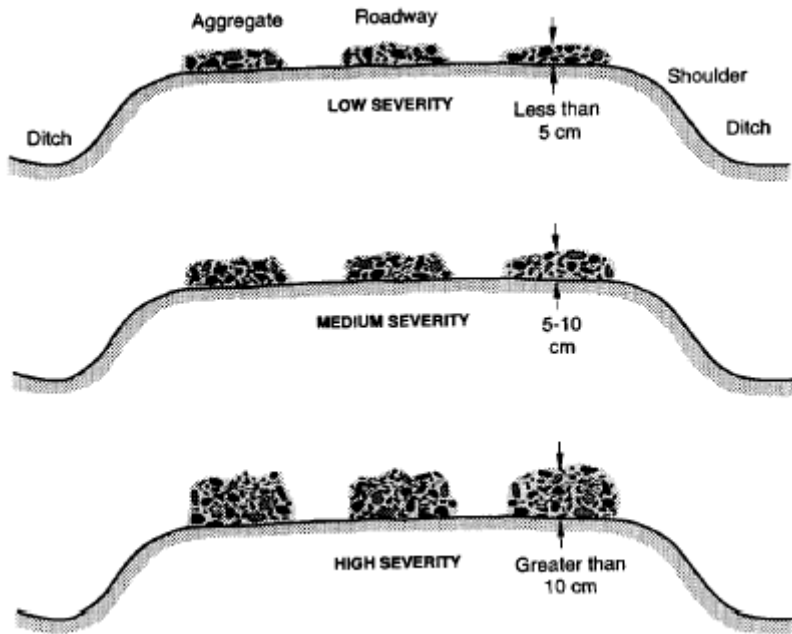


Figura A12. Niveles de severidad de agregado suelto.

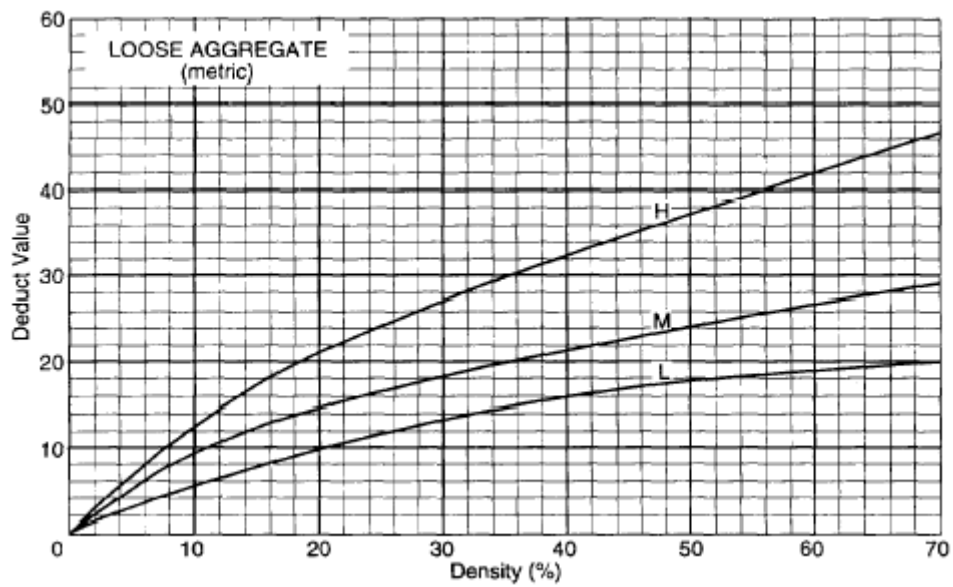


Figura A13. Puntaje para niveles de severidad en agregado suelto.

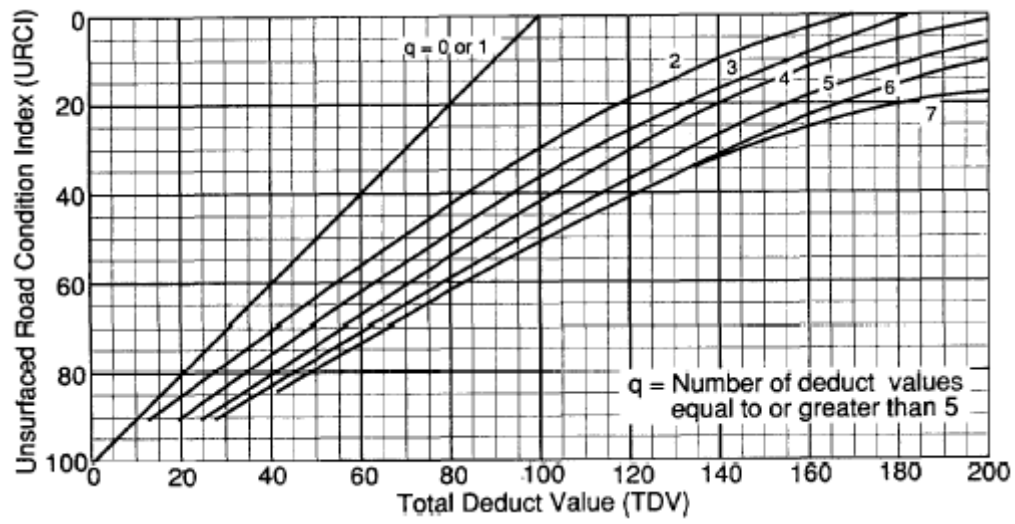


Figura A14. Curvas para determinar el índice URCI.