

---

S E C C I Ó N  
**INGENIERÍA**

---



# MODELO NUMÉRICO PARA ANALIZAR EL EFECTO DEL CLIMA EN PAVIMENTOS

Silvia Caro Spinel\* ; Cristina García Aragón\*\* ; Bernardo Caicedo Hormaza\*\*\*

## Resumen

*Este artículo presenta el desarrollo de un modelo numérico para analizar el efecto del agua libre y la temperatura al interior de un pavimento flexible. Con base en las ecuaciones de conservación de masa y temperatura y las leyes de flujo de agua y energía, el modelo determina la variación de las propiedades hídricas, térmicas y mecánicas al interior del pavimento. Se implementó un software para solucionar el modelo numérico y analizar gráficamente los resultados. Se realizaron simulaciones sobre pavimentos flexibles para tráfico medio-alto. Los resultados demostraron una fuerte degradación en los módulos de rigidez de las capas del pavimento y permitieron corroborar los beneficios de una estructura de drenaje adecuada.*

## 1. INTRODUCCION Y JUSTIFICACIÓN

Desde finales de la década de 1940 se inició en Europa el desarrollo de nuevas metodologías de diseño de pavimentos que incluyen el análisis de los esfuerzos y las deformaciones generadas al interior de la estructura. Las nuevas metodologías se encuentran enmarcadas dentro los principios de la mecánica del medio continuo y las leyes de comportamiento de materiales. Como parte de este análisis, el estudio del efecto del clima sobre los pavimentos ha retomado especial importancia en las últimas tres décadas.

El objetivo general del trabajo que se presenta en este documento es determinar el efecto que tiene la variación de las propiedades hídricas y térmicas sobre las características estructurales de los materiales de un pavimento.

Con base en la información de regímenes climáticos, propiedades hídricas y térmicas de

los materiales del pavimento y en las leyes de conservación y flujo de agua y energía, se desarrolló un modelo numérico desacoplado para determinar la variación temporal de las propiedades mecánicas en puntos discretizados de la estructura. Los resultados permitieron corroborar la importancia del factor climático como fuente primaria de la degradación estructural de los pavimentos.

## 2. EFECTOS DEL CLIMA SOBRE LOS PAVIMENTOS

Los factores climáticos condicionan las propiedades mecánicas de los materiales de un pavimento. En particular, el agua afecta principalmente a los materiales granulares y la temperatura a los compuestos bituminosos.

La capacidad estructural de los materiales granulares es muy sensible a las variaciones de las propiedades hídricas. Se ha demostrado que

---

\* Profesor Instructor, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Uniandes.

\*\* M.Sc. Dpto. Ing. Civil y Ambiental, Uniandes.

\*\*\* Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Uniandes

el agua libre al interior de las capas granulares de un pavimento puede deteriorar su capacidad estructural entre 20 y 50 veces más que cuando se restringe su presencia. Esto lo convierte en el factor climático erosivo más peligroso (Loradi et al, 1998; Robertson y Birgisson, 1998; Bleuzen, 1998; Hornyh et al, 1998; Simonsen et al, 1997; Backstrom, 2000; Alonso, 1998).

Por otra parte, debido a las características viscosas de los materiales asfálticos, su resistencia es inversamente proporcional a la temperatura. Ante la presencia de altas temperaturas y/o altos periodos de aplicación de carga (bajas frecuencias), se generan deformaciones irreversibles o plásticas en el pavimento, denominadas *huellas* (Pérez y Prieto, 2001). El ahuellamiento afecta la capacidad de servicio de un pavimento.

### 3. DESARROLLO DE MODELO

El modelo evalúa el cambio en el tiempo de las propiedades hídricas y térmicas de los materiales de un pavimento flexible (Tabla 1). Además, el modelo calcula el efecto de este cambio sobre las propiedades mecánicas del pavimento (módulo de rigidez, esfuerzos y deformaciones).

Tipo	Propiedad	Descripción
Hídrica	Saturación ( $S_r$ )	Proporción de vacíos ocupada por el aire en una muestra de suelo.
	Conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ )	Permeabilidad del material con una saturación del 100%. Es función de las propiedades del medio poroso y líquido.
	Conductividad hidráulica no saturada ( $K_{uns}$ )	Permeabilidad del material cuando la saturación es diferente al 100%. Es función de la permeabilidad saturada y del grado de saturación del material.
	Curva de retención	Define el grado de saturación ( $S_r$ ) correspondiente a una presión intersticial ( $u$ ) determinada, medida a densidad constante.
Térmica	Conductividad térmica ( $K_c$ )	Cantidad de calor que se transmite a través de una unidad de superficie durante una unidad de tiempo, bajo el efecto de un gradiente térmico unitario.
	Capacidad calorífica (C)	Cantidad de calor necesaria para elevar en un grado de temperatura la unidad de volumen del cuerpo en estudio.

Tabla 1. Descripción de las propiedades hídricas y térmicas requeridas por el modelo.

#### 3.1 Determinación de la geometría del pavimento

La caracterización geométrica del pavimento se presenta en la Figura 1.

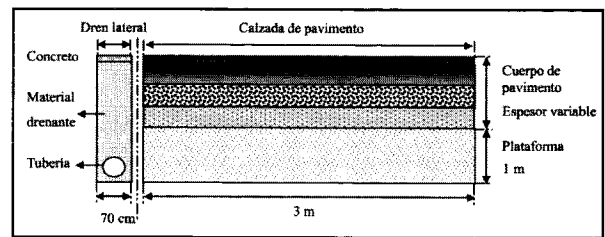


Figura 1. Representación general del modelo.

Para simular las condiciones naturales del terreno, se incluyó una capa de suelo natural en la base y en el costado izquierdo de los pavimentos. Se supuso isotropía y uniformidad en el suelo de subrasante. El nivel freático o tabla de agua se ubicó en la parte baja del pavimento. El dren longitudinal en el costado izquierdo de la estructura es de carácter opcional (Figura 2).

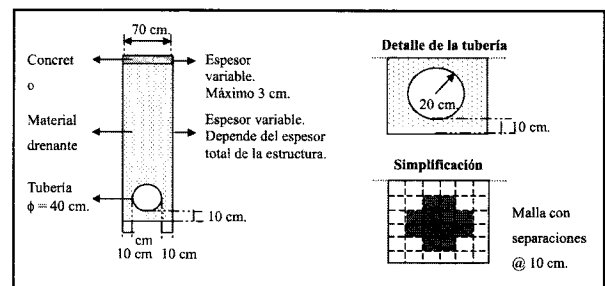


Figura 2. Modelación de un subdren longitudinal característico.

#### 3.1 Supuestos del modelo matemático

El modelo se construyó sobre los siguientes supuestos:

- El material al interior de una capa es homogéneo.
- Para un material específico existe una relación única entre succión y saturación.
- No existe variación del volumen en un diferencial de suelo a través del tiempo.
- Las propiedades térmicas de todos los materiales del pavimento son constantes a través del tiempo.
- La cabeza de presión de un diferencial de suelo al interior del pavimento está compuesta por la suma de su cabeza de posición ( $z$ ) y la presión intersticial ( $u/\gamma$ ), medida en metros.
- El cambio temporal de las propiedades hídricas de las capas de pavimento es función de las condiciones pluviométricas registradas

en la zona y se rige por la Ley de Darcy (ecuación 3).

- La variación temporal de la temperatura al interior de las capas de pavimento está determinada por las condiciones climáticas en la capa exterior y se rige por la Ley de Fourier (ecuación 4).

- Se supone que los materiales asfálticos presentan una relación lineal entre la temperatura y el logaritmo del módulo de rigidez.

### 3.2 Leyes de flujo y comportamiento

#### 1.1.1 Leyes de conservación

La ley de conservación de la masa de agua enuncia que la variación en el contenido de agua dentro de un volumen de referencia corresponde al balance del flujo de agua que entra y sale por su frontera:

$$\frac{d(\rho_e \theta_e)}{dt} = -\text{div}(\rho_e q) \quad (1)$$

donde  $\rho_e$  es la masa volumétrica de agua,  $\theta_e$  es la humedad volumétrica de agua y  $q$  es el caudal de agua por unidad de superficie. De forma equivalente, la ley de conservación de la energía enuncia que la variación de energía dentro de un volumen de referencia equivale al flujo de calor que atraviesa su frontera. Es decir:

$$\frac{d(CT)}{dt} = -\text{div}(q_c) \quad (2)$$

donde  $C$  es la capacidad calorífica del material,  $T$  es la temperatura y  $q_c$  es el caudal de calor por unidad de superficie.

#### 3.1.2 Leyes de flujo

Suponiendo que la transmisión de agua ocurre únicamente en forma líquida, la ley de flujo de agua está gobernada por una ecuación similar a la ley de Darcy para medios saturados:

$$q = -k Sr \text{grad}(H) \quad (3)$$

donde  $q$  es el caudal de agua por unidad de superficie,  $Sr$  es la saturación del medio,  $H$  es la cabeza de energía o potencial hidráulico y  $k$  es la permeabilidad del medio. Así mismo, el flujo de temperatura se encuentra gobernado por

la ley de Fourier:

$$q_c = -K_c \text{grad}(T) \quad (4)$$

donde  $K_c$  es la conductividad térmica del medio,  $q_c$  es el flujo de calor y  $T$  es la temperatura.

### 3.4 Solución de las ecuaciones y determinación de la variabilidad mecánica de los materiales

Considerando las leyes de flujo y conservación y suponiendo que no existe variación a través del tiempo, la solución del comportamiento de la masa volumétrica de agua dentro de un volumen de suelo es de la forma:

$$\eta \beta \frac{du}{dt} = -\text{div} \left[ k \text{grad} \left( z + \frac{u}{\gamma} \right) \right] \quad (5)$$

donde  $\beta = \frac{dSr}{du}$ . De forma equivalente, la solución para el flujo de calor al interior de un volumen de suelo es de la forma:

$$C \frac{dT}{dt} = \text{div} [K_c \text{grad}(T)] \quad (6)$$

Para el desarrollo del modelo numérico, fue necesario discretizar las ecuaciones (5) y (6) mediante el método de las diferencias finitas, en términos espaciales y temporales. Las ecuaciones de comportamiento discretizadas hacen uso de la numeración  $i$  y  $j$  del sistema coordenado, de las propiedades de los nodos circundantes y de las respectivas condiciones de frontera (Figura 3).

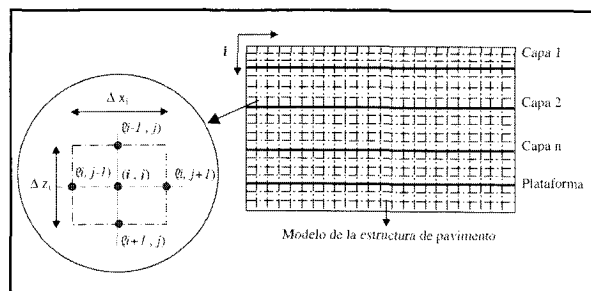


Figura 3. Discretización del modelo geométrico.

La solución del modelo hídrico se realizó de forma implícita aproximada y la solución del mo-

delo de temperatura se realizó de forma explícita.

Debido a que el factor temporal depende de los diferenciales de posición, Caicedo (1991) señala la importancia de trabajar con intervalos de tiempo suficientemente pequeños para asegurar la estabilidad de la solución. A través de un análisis de las ecuaciones de solución, se llega a la siguiente condición para el diferencial de tiempo,  $dt$ :

$$dt < \frac{1}{2} \frac{\alpha d_x^2}{K} \quad (7)$$

donde  $a$  representa el calor específico,  $C$ , en el caso de la temperatura o  $b$  en el caso del agua y  $K$  representa la conductividad térmica o la conductividad hidráulica.

Una vez se han determinado las características hídricas y térmicas al interior del pavimento para cada intervalo de tiempo, se procede a establecer el valor de las propiedades mecánicas de (1) los materiales de las capas asfálticas y (2) los materiales de las capas bituminosas.

Para la capa asfáltica, el módulo de rigidez es función de las propiedades térmicas del material de acuerdo con la siguiente relación:

$$E = 10 \wedge [p(\theta - \theta_0) + \log E_0] \quad (8)$$

donde  $(E_0, q_0)$  corresponden a valores de módulo y temperatura medidos experimentalmente para el material.

En el caso de las capas no asfálticas, la variación del módulo de rigidez es principalmente función de sus propiedades hídricas. La relación seleccionada para el modelo es la siguiente:

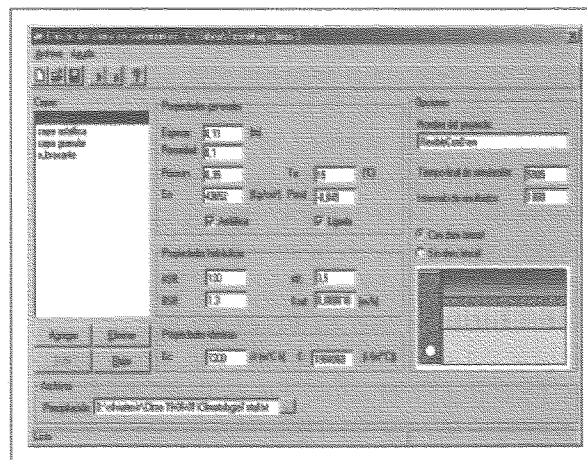
$$E(Sr) = \frac{E_0}{[Sr_0(-u_0)]^{1/3}} [Sr(-u)]^{1/3} \quad (9)$$

donde  $E_0$ ,  $Sr_0$  y  $u_0$  son los valores iniciales de módulo de rigidez, saturación y succión del material.

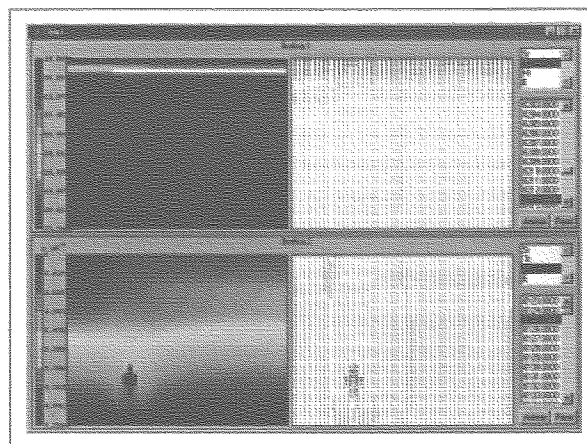
#### 4. DESARROLLO DEL SOFTWARE

Durante el estudio se realizaron dos programas. El primero fue desarrollado en el lenguaje de

programación Visual Basic® y hace uso del programa DEPAV® (Universidad del Cauca, 1996) para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en una estructura de pavimento multicapa. El segundo fue desarrollado en lenguaje de programación MatLab 6.0® y permite graficar y analizar los resultados arrojados por el primero. La Figura 4 muestra la pantalla característica de los dos programas.



(a)



(b)

Figura 4. Pantallas principales de los programas (a) "efecto del clima sobre el desempeño de pavimentos" y (b) "análisis gráfico de los resultados".

#### 5. SIMULACIONES

Se estudió el efecto del clima sobre un pavimento flexible característico de un tráfico medio-alto. La estructura fue sometida a periodos climáticos del departamento de Tolima (Colombia). La información fue proporcionada por la Federación Nacional de Cafeteros de Colom-

bia. El tiempo total de simulación fue de ocho meses, correspondientes a un periodo invernal y un periodo seco. Para asegurar estabilidad se realizaron dos simulaciones continuas de este periodo y se analizaron los resultados de la segunda ocurrencia. Se simularon las situaciones con subdren y sin subdren longitudinal.

### 5.1 Resultados generales de las propiedades hídricas y térmicas

En todos los casos se detectó un proceso de saturación desde la ubicación del nivel freático hacia arriba y desde la infiltración de agua en la superficie hacia abajo. Las capas con materiales granulares presentan los menores valores de saturación. Los máximos valores de cabeza de presión se ubican en la zona superior del terreno natural ubicado en el costado lateral izquierdo del modelo. Los mínimos valores de cabeza de presión se ubican bajo el dren, en el caso de los modelos drenados. En el caso drenado el gradiente de potencial muestra la tendencia del agua de fluir hacia la tubería. Las capas del pavimento se estabilizan rápidamente con gradientes principalmente verticales. La figura 5 presenta el estado del potencial al interior del modelo para los cuatro meses finales de simulación.

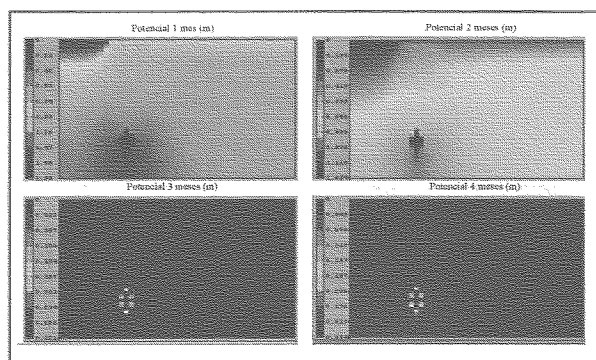


Figura 5. Variación del potencial hidráulico en el interior de un pavimento durante los cuatro meses de simulación.

En cuanto al flujo de temperatura, se observa la ausencia de gradiente horizontal, con excepción del generado en la franja vertical del subdren. Los máximos valores se registran en los meses secos (julio y agosto). En el medio día (12:00 m) se reporta la máxima temperatura en superficie y la mínima en la parte baja

del modelo. Por el contrario, en la media noche (12:00 a.m) se reporta la mínima temperatura en superficie y la máxima en la base del modelo.

### 5.1 Resultados generales de los esfuerzos y deformaciones

En términos generales, se reporta una disminución de los módulos de rigidez de todos los materiales. En las capas asfálticas, se registró una degradación del módulo superior al 25% con respecto a su valor inicial, durante los periodos de mayores temperaturas. Para las capas granulares y de subrasante, la disminución es gradual en la medida en que aumenta su estado de saturación.

## 6. CONCLUSIONES

- El modelo de transmisión de agua presenta dificultades en las condiciones de frontera cuando las situaciones pluviométricas son severas. Indiscutiblemente, un modelo numérico acoplado que considere adicionalmente el efecto del vapor de agua y del aire al interior de la estructura permitiría obtener resultados más realistas. De forma alternativa, podría incluirse la condición de evaporación en la superficie del modelo.
- El modelo de temperatura se desempeñó satisfactoriamente.
- Las simulaciones permitieron comprobar la importancia de los sistemas de drenaje en la conservación de las propiedades mecánicas de los materiales no asfálticos. El subdren controla la degradación de los módulos de rigidez.
- Los programas desarrollados son una herramienta eficiente para analizar el efecto desacoplado del clima sobre los pavimentos.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alonso, E.E. (1998). "Succión y humedad en bases y explanadas de carreteras". Simposio Internacional sobre Drenaje Interno de Firmes y Explanadas. Granada, España.
2. Bäckström, M. (2000). "Ground temperature in porous pavement during freezing and thawing." Journal of Transportation Engineering, Vol 126, No 5, 375-381.
3. Caicedo, B (1991) . These pour le grade de Docteur. "Contribution a l'étude de la migration de l'eau dans les

sols pendant le gel et le dégel". Ecole Centrale Paris. Paris, France.

4. Hornych, P. (1998). "Influence de l'eau sur le comportement mécanique des graves non traitées et des sols supports de chaussées". Simposio Internacional sobre Drenaje Interno de Firmes y Explanadas. Granada, España.

5. Loradi, N. (1998). "Influence de l'état hydrique sur le comportement des matériaux compactes". Simposio Internacional sobre Drenaje Interno de Firmes y Explanadas. Granada, España.

6. Paéz, D., Pereira H., Caicedo B. (2001). "Estudio del ahuellamiento de mezclas asfálticas". XIII Simposio Co-

lombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Universidad de Los Andes.

7. Robertson, R., Birgisson, B. (1998). "Evaluation of water flow through pavement systems". Simposio Internacional sobre Drenaje Interno de Firmes y Explanadas". Granada, España.

8. Simonsen, E., Janoo, V. C., Isacsson, Ulf. (1997). "Prediction of temperature and moisture changes in pavements structures." Journal of Cold Regions Engineering, Vol 11, No 4, 291-307.