

EL MODELO HDM-III PARA ANALISIS Y EVALUACION DE INVERSIONES VIALES

Alberto Compte, Jorge Gómez, Rodrigo Miró y Salvador Pou*

El Colegio de Ingenieros de Caminos en Catalunya y el Banco Mundial han organizado en Barcelona y Tarragona este mes de Junio la I Conferencia Internacional sobre Gestión de Carreteras. La Conferencia ha tenido por objeto, por una parte, la difusión de temas de gestión y financiación de carreteras y, por otra, la preparación de ingenieros españoles y de países de habla hispana en el uso del modelo HDM. Este artículo trata de explicar de forma resumida las características y utilidades de este modelo en base al estudio piloto de un programa de conservación de una pequeña red de carreteras próximas a Tarragona que se ha preparado para el segundo módulo de la Conferencia.

1. Introducción al modelo HDM

■ Génesis del modelo

El HDM —*The Highway Design and Maintenance Standards Model*— es un modelo para el análisis y evaluación de inversiones viales que el Banco Mundial ha venido desarrollando desde 1969 —y sigue desarrollando en la actualidad— y que, desde hace algunos años, resulta de uso obligado, tanto para el estudio como para la evaluación de resultados de planes de mejora de carreteras, en aquellos países a los que el Banco Mundial asigna préstamos.

Para el desarrollo del modelo se han utilizado importantes estudios en los que han participado instituciones tecnológicas de alto nivel y diversos países, generalmente prestatarios del Banco. Entre los años 1969 y 1971 se desarrolló la estructura conceptual y un primer prototipo del modelo. Participaron, con el Banco Mundial, un equipo del Instituto Tecnológico de Massachusetts en co-

nexión con el TRRL (Transport and Road Research Laboratory) y el LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées). En los años siguientes, los esfuerzos se centraron en la toma y estudio de datos para establecer relaciones básicas cuantitativas, físicas y económicas, entre los parámetros considerados en las distintas partes del modelo. A tal efecto se llevaron a cabo estudios exhaustivos en Kenia, el Caribe, Brasil e India. En los años ochenta se disponía ya de funciones de relación suficientemente válidas para aplicar el modelo en los países con características similares a aquellos en que se habían llevado a cabo los estudios de cuantificación empírica.

Desde hace algunos años se puede disponer de los programas de la actual versión HDM III (tercera generación) en MS DOS y utilizarlos en ordenadores personales de características habituales.

Complementariamente al HDM, se estableció hace ya tiempo el modelo EBM —*Expenditure Budgeting Model*, o modelo de optimización de gastos bajo restricciones presupuestarias— fruto de la colaboración entre el Banco Mundial y el EDI (Economic Development Institute). El EBM se utiliza para seleccionar el conjunto de alternativas más rentables entre varias soluciones analizadas con

* *Coordinadores del Caso-Estudio presentado en el Módulo II de la Conferencia.*

El modelo HDM es de uso obligado para los prestatarios del Banco Mundial, y es el instrumento más amplio disponible para llevar a cabo la gestión y conservación de una red de carreteras

el HDM cuando existe una limitación presupuestaria.

Actualmente es posible usar un software adicional, denominado Manager, que simplifica la entrada de datos y el análisis de resultados obtenidos con el HDM para los estudios de deterioro de la carretera y comparación técnica y económica de distintas estrategias de conservación.

Está previsto para dentro de muy poco tiempo disponer de una versión del HDM que permita considerar la congestión en los costes del usuario. También se están realizando estudios para adaptar las funciones de relación a las diversas características de otras redes de carreteras de forma que los resultados del modelo se ajusten al máximo a la realidad.

El modelo HDM, aparte de ser de uso obligado para los prestatarios del Banco Mundial, puede considerarse como el instrumento más amplio disponible para llevar a cabo la gestión y conservación de una red de carreteras. La documentación existente sobre el mismo y los estudios para su desarrollo constituyen una fuente de conocimientos de gran valor para los que hayan de utilizar tanto este instrumento como otros de ámbito más limitado.

■ Descripción del HDM

El modelo HDM contempla simultáneamente tres aspectos de la carretera:

- las características del diseño, la calidad de construcción y los costes de ejecución;
- las técnicas utilizadas en el mantenimiento, la influencia de cada una de ellas en el comportamiento y en el estado de la superficie, y los costes de las operaciones de conservación correspondientes en cada caso;
- las intensidades de tráfico de vehículos de las diferentes categorías, las velocidades a las que circulan, y los costes de operación que corresponden.

Utilizando estos tres grupos de información, el HDM permite computar, para un período largo (hasta 30 años) la incidencia de los costes de construcción de nuevas obras, de los de mantenimiento de obras existentes, y de los usuarios que utilizan la red, año por año, en el coste total del transporte de una red determinada.

Para ello, el HDM actúa mediante *cinco submodelos*:

a) Submodelo de tráfico:

En base al tráfico inicial de cada grupo de vehículos considerado y al porcentaje de crecimiento anual, el submodelo de tráfico determina, en cada año de análisis, el volumen de tráfico de cada tipo de vehículos y el número de ejes simples equivalentes (de 8 t) para cada tramo.

Además, puede introducirse, generalmente asociado a alternativas que contienen proyectos de construcción, tráficos generados determinados, con sus correspondientes porcentajes de aumento desde el año en que se inicia su toma en consideración.

b) Submodelo de construcción:

Para el submodelo de construcción, se especifica una lista de los proyectos de construcción y tantas alternativas como se desee investigar, con una duración comprendida entre uno y cinco años. Los proyectos de construcción pueden incluir la construcción de nuevos tramos de carretera, mejoras de trazado y posibles ampliaciones de tramos existentes.

Para cada alternativa, el submodelo determina los costes de construcción y, una vez completado el proyecto, cambia las características del tramo afectado.

c) Submodelo de deterioro y mantenimiento:

Este submodelo estima los efectos del tiempo, del tráfico, y del medio ambiente sobre las condiciones de estado de cada tramo homogéneo de carretera (caracterizado por su geometría, estructura del pavimento, materiales y condiciones de construcción y materiales de los terrenos de soporte), y procede a predecir, año por año, los cambios de condiciones de la superficie según sean las políticas de mantenimiento aplicadas durante el período de análisis.

d) Submodelo de costes de operación de los vehículos:

La función del submodelo de costes de operación vehicular es simular los efectos de las características físicas y el estado de una carretera sobre las velocidades de operación de cada tipo de vehículo, sobre su consumo de combustible y lubricantes, sobre sus requerimientos de mantenimiento, etc., y determinar sus costes totales de operación.

Las cantidades de recursos consumidos, tales como litros de combustible, número de neumáticos, utilización de mano de obra, etc., se determinan coordinadamente con las velocidades de los vehículos como funciones de las características de cada tipo de vehículo, tipo de superficie y condición actual de la carretera.

El usuario puede especificar precios y costes unitarios tanto en términos financieros como económicos y en divisas.

e) Submodelo de costes y beneficios exógenos:

Los ahorros en los costes de operación vehicular y tiempo de viaje calculados por el modelo HDM constituyen la gran mayoría de los beneficios totales a la sociedad de las mejoras de la carretera. Las principales excepciones son las reducciones en accidentes, impactos ambientales (ruido y contaminación) y los incrementos de costes de operación debidos a la congestión. Donde estos efectos sean significativos pueden estimarse separadamente y añadirlos exógenamente al modelo.

El submodelo de costes y beneficios exógenos calcula año a año los beneficios y costes exóge-

Paved Road Data

ROAD	Description	C240 REUS-ALCOVE					
SIZE	Length (km)	10.9	Width (m)	7.00	Shoulder (m)	1.50	
GEOMETRY	Rise & Fall (m/km)	15.50	Curvature (deg/km)	11			
SURFACE	Asphalt Concrete	Thickness (mm)	170.00	Construction Type	Good		
BASE	Granular	If Cement Stabilized: Thickness (mm)	0.00				
STRENGTH	Structural No 4.64	Soil Cement Resilient Modulus (GPa)	0.00				
RIDE QUALITY		and/or Benk. Def. (mm)	0.00	Subgrade CBR (%)	25		
SURFACE DISTRESS		Roughness (IRI m/km)	2.00				
TRANSVERSAL DEFORMATION		All Cracks (%)	0.4	Wide Cracks (%)	0.0		
HISTORY		Area Ravelled (%)	0.5	Potholes (%)	0.000		
ENVIRONMENT	Surface Age (y)	Rut Depth (mm)	0.00	Rut STD (mm)	0.00		
DET. FACTORS		2 Construc. Age (y)	11	Prev. Wide Cracks (%)	0.0		
		Altitude (m)	225.0	Rainfall (m/month)	0.0450	Env. Factor	0.90
		Cracking Initiation	1.00	Cracking Progression	1.00		
		Ravelling Ini.	1.00	Pothole Pro.	1.00	Rut Depth Pro.	1.00
		Roughness Progression	1.00				
TRAFFIC							
Average Daily Traffic	Car	Pickup	Bus	Light Truck	Medium Truck	Heavy Truck	Articulated Truck
Traffic Growth (%)	7089	925	64	0	1190	0	1361
	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

Figura 1. Datos de un tramo de carretera pavimentado.

nos considerados para incorporarlos al análisis económico global.

■ Utilidad del HDM

El modelo HDM se utiliza para hacer estimaciones y comparaciones de costes y evaluaciones económicas de diferentes opciones, ya sea de nuevas construcciones, ya sea de posibles alternativas, o bien de reglamentación de condiciones de transporte. El modelo permite estimar rápidamente los costes totales para un gran número de soluciones alternativas, considerando los costes futuros a diferentes tasas de interés, determinando las tasas internas de retorno, al valor actualizado neto y los beneficios relativos.

Adicionalmente, el modelo permite analizar rápidamente la sensibilidad de los resultados a variaciones de los valores de los datos utilizados que se estimen puedan ser significativos, tales como determinados costes unitarios, tasas de crecimiento de tráfico, precio del dinero, valor del tiempo de los usuarios, etc.

La comparación de las soluciones evaluadas para cada tramo de carretera, carretera o grupo de carreteras de la red, permite estimar las políticas que, en cada caso, resulten más económicas y, en base a los resultados, optimizar la programación de trabajos.

■ Utilidad del EBM

Extender la programación a un sector importante o a la totalidad de la red, adoptando para cada caso las políticas óptimas, supondrá generalmente unas necesidades de recursos anuales muy variables y/o superiores a los recursos disponibles. El modelo EBM tiene por objeto determinar, entre las varias políticas estudiadas para cada tramo y escogidas como más rentables, la que conviene adoptar para conseguir una optimización de la uti-

lización de recursos en el conjunto de la red, sin sobrepasar unos recursos limitados (anualmente determinados) a lo largo del período de estudio.

2. Aplicación a un caso real

En el segundo módulo de la I Conferencia Internacional sobre Gestión de Carreteras se ha aplicado el modelo HDM III al estudio piloto de un programa de conservación de una pequeña red de carreteras próximas a Tarragona, pertenecientes en parte a la red del Estado y en parte a la red de la Generalitat de Catalunya. Seguidamente se presenta, como ejemplo de aplicación, el planteamiento efectuado en dicho análisis.

■ Análisis a nivel de tramo

En primer lugar se ha tramificado la red en tramos homogéneos en base a los siguientes criterios:

- las características geométricas y estructurales de la carretera;
- las condiciones medio ambientales;
- la historia de las actuaciones en la carretera;
- las características del tráfico; y
- el estado superficial y estructural del pavimento.

Se han determinado los datos requeridos por el modelo para cada tramo de carretera, así como las características de la flota vehicular. La figura 1 muestra, en particular, los datos para el tramo de carretera Reus-Alcover de la comarcal C-240. Se trata de un tramo reconstruido en 1982 con un firme inicial de 12 cm de aglomerado sobre 25 cm de zahorra artificial y 20 cm de zahorra natural, reforzado en 1990 con 4 cm de aglomerado. La carretera, de un carril por sentido de circulación y en buen estado, soporta un tráfico superior a los

Para la evaluación económica de cada alternativa, el modelo considera, además de los años en que hay que realizar las inversiones de mantenimiento a efectos de actualizarlas a la tasa de interés que se desee, los costes que se producen a los usuarios según el estado de deterioro de la carretera que corresponde a cada estrategia

10.000 veh/día, de los cuales más del 20 % son pesados.

A continuación, se ha definido el conjunto de políticas alternativas de mantenimiento que se desea analizar para cada tramo combinando distintas operaciones de conservación.

El HDM III versión *Manager* permite considerar cinco tipologías distintas de operaciones de conservación:

- mantenimiento de rutina;
- bacheo;
- tratamientos superficiales (riegos, lechadas, microaglomerados, etc.);
- refuerzos; y
- reconstrucciones.

El mantenimiento rutinario se realiza anualmente con independencia del resto de operaciones. En el bacheo puede fijarse el porcentaje de área a reparar anualmente. Las otras tres operaciones se efectuarán en base a uno de los dos criterios siguientes:

- programado: las operaciones tendrán lugar cada período de tiempo fijado;
- condición de respuesta: la operación se realizará cuando un determinado parámetro (área dañada para los tratamientos superficiales, e IRI para los refuerzos y las reconstrucciones) alcance el valor fijado previamente.

Fijando estas condiciones es posible mantener el índice de servicio por encima de los niveles que se consideren mínimos para cada tipo de carretera.

La figura 2 muestra, para el mismo tramo de la C-240 mencionado anteriormente, una de las alternativas de mantenimiento consideradas. Además del mantenimiento de rutina y del parcheo cada año de la totalidad de los baches, se prevé realizar una lechada cuando el área dañada alcan-

ce el 10 % de superficie de la calzada y un refuerzo de 5 cm cuando el IRI sea superior a 3 mm/m.

Una vez fijados los costes unitarios de cada una de las operaciones de conservación, el modelo evalúa las diversas estrategias de mantenimiento definidas para cada tramo, determinando la evolución anual de los parámetros de estado de la carretera (IRI, fisuras, peladuras, baches, roderas) y la evolución anual de los costes (vehiculares, mantenimiento y globales). Las figuras 3 y 4 muestran dos ejemplos de informe para el mismo tramo de la C-240. A destacar que, para la evaluación económica de cada alternativa, el modelo considera, además de los años en que hay que realizar las inversiones de mantenimiento a efectos de actualizarlas a la tasa de interés que se desee, los costes que se producen a los usuarios según el estado de deterioro de la carretera que corresponde a cada estrategia.

Tomando para cada tramo como política base de mantenimiento una de las estrategias estudiadas, el modelo genera informes comparativos de las demás alternativas respecto a esta base. En la figura 5 se ha representado, con ayuda del Lotus, la evolución de uno de los parámetros de estado (IRI) para la cinco alternativas consideradas en el tramo Reus-Alcover de la C-240. Estas políticas han sido:

- Alternativa Base: mantenimiento rutinario + bacheo
- Alternativa-2: alternativa base + lechada
- Alternativa-3: alternativa base + refuerzo a IRI=3
- Alternativa-4: alternativa base + refuerzo a IRI=2.5
- Alternativa-5: alternativa base + lechada + refuerzo a IRI=3

Probablemente otro de los informes comparativos más relevantes para el técnico dedicado a la

Figura 2. Ejemplo de un estándar de mantenimiento.

Fifth Maintenance Standard			
Y	Routine Maintenance	Cost Factor 1.00	Description
Y	Patching: Scheduled	Area to be Patched (m ² /km/y) 0.0	OR Responsive Percentage of Pothole Area (%) 100.00
	Last Applicable Year 20	Max Applicable Area (m ² /km/y) for Responsive 5000.0	Max Applicable Roughness (IRI) 11.00 Cost Factor 1.00
Y	Reseal: Scheduled	Resealing Interval (yr) 1	OR Responsive Max Damaged Area 10.0 Min Interval 1 Max Interval 30
	Last Applicable Year 19	Strength 0.30 Thickness (mm) 10.00 Type Slurry Seal	Max Applicable Roughness (IRI) 11.00 Cost Factor 1.50
Y	Overlay: Scheduled	Overlay Interval (yr) 1	OR Responsive Max Roughness 3.0 Min Interval 1 Max Interval 30
	Last Applicable Year 15	Strength 0.40 Thickness (mm) 50.00 Type A.C., Auto Level	Max Applicable Roughness (IRI) 11.00 Cost Factor 1.00
	Reconstruction: Scheduled	Reconstruction Interval (yr) 1	OR Responsive Max Roughness 4.0 Min Interval 1 Max Interval 30
	Last Applicable Year 1	New Layers (mm) 150.00 Surface Asphalt Concrete	New Str No 4.78 New IRI 1.5 Cost Factor 7.00 Base Granular
	If Base is Cement Stabilized: Resilient Mod.	0.00	Base Thickness 300.00

C-240: REUS-ALCOVER
Fourth Standard: ALTERNATIVA-4

Yr	Calendar Year	2-Way ADT (vpd)	2-Way ESA (000)	Operation Applied	Roughness (IRI) m/km	All Crack Area %	Wide Crack Area %	Raveled Area %	Pothole Area %	Rut Depth mm	SD Rut Depth mm	Modified Struc No	Surface Code
1	1992	10629	3917		2.1	2.6	0.0	0.5	0.0	1.7	0.6	6.5	AC
2	1993	11054	4074		2.2	6.8	0.0	0.5	0.0	1.8	0.7	6.5	AC
3	1994	11496	4237		2.3	13.2	0.0	0.5	0.0	1.8	0.7	6.5	AC
4	1995	11956	4407	OVER	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	7.1	OVS
5	1996	12434	4583		1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	7.1	OVS
6	1997	12931	4766		1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	7.1	OVS
7	1998	13449	4957		1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	7.1	OVS
8	1999	13987	5155		2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	7.1	OVS
9	2000	14546	5361		2.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	7.1	OVS
10	2001	15128	5576		2.1	1.3	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	7.1	OVS
11	2002	15733	5799		2.1	3.1	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	7.1	OVS
12	2003	16362	6031		2.2	6.3	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	7.1	OVS
13	2004	17017	6272		2.3	11.3	3.6	0.0	0.0	0.6	0.1	7.1	OVS
14	2005	17698	6523	OVER	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.2	7.1	OVS
15	2006	18405	6784		1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	7.9	OVS
16	2007	19142	7055		1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	7.9	OVS
17	2008	19907	7337		1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	7.9	OVS
18	2009	20704	7631		2.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	7.9	OVS
19	2010	21532	7936		2.0	2.7	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	7.9	OVS
20	2011	22393	8253		2.1	5.5	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	7.9	OVS

Figura 3. Informe de evolución del estado del pavimento.

C-240: REUS-ALCOVER
Fourth Standard: ALTERNATIVA-4

Yr	Calendar Year	ADT (vpd)	ESA (000)	Agency Capital	Agency Recurrent	Agency Capital	Agency Recurrent	Vehicle Operation	Society Total
1	1992	10629	3917	0.000	0.016	0.000	0.013	26.661	26.674
2	1993	11054	4074	0.000	0.016	0.000	0.013	27.744	27.757
3	1994	11496	4237	0.000	0.016	0.000	0.013	28.868	28.881
4	1995	11956	4407	0.412	0.016	0.330	0.013	30.040	30.383
5	1996	12434	4583	0.000	0.016	0.000	0.013	31.144	31.157
6	1997	12931	4766	0.000	0.016	0.000	0.013	32.397	32.410
7	1998	13449	4957	0.000	0.016	0.000	0.013	33.702	33.715
8	1999	13987	5155	0.000	0.016	0.000	0.013	35.059	35.072
9	2000	14546	5361	0.000	0.016	0.000	0.013	36.471	36.484
10	2001	15128	5576	0.000	0.016	0.000	0.013	37.941	37.954
11	2002	15733	5799	0.000	0.016	0.000	0.013	39.472	39.485
12	2003	16362	6031	0.000	0.016	0.000	0.013	41.066	41.079
13	2004	17017	6272	0.000	0.016	0.000	0.013	42.728	42.741
14	2005	17698	6523	0.412	0.016	0.330	0.013	44.463	44.806
15	2006	18405	6784	0.000	0.016	0.000	0.013	46.100	46.113
16	2007	19142	7055	0.000	0.016	0.000	0.013	47.955	47.968
17	2008	19907	7337	0.000	0.016	0.000	0.013	49.885	49.898
18	2009	20704	7631	0.000	0.016	0.000	0.013	51.894	51.907
19	2010	21532	7936	0.000	0.016	0.000	0.013	53.986	53.999
20	2011	22393	8253	0.000	0.016	0.000	0.013	56.164	56.177

Figura 4. Informe de evolución anual de los costes.

C-240: REUS - ALCOVER

Evolución del IRI

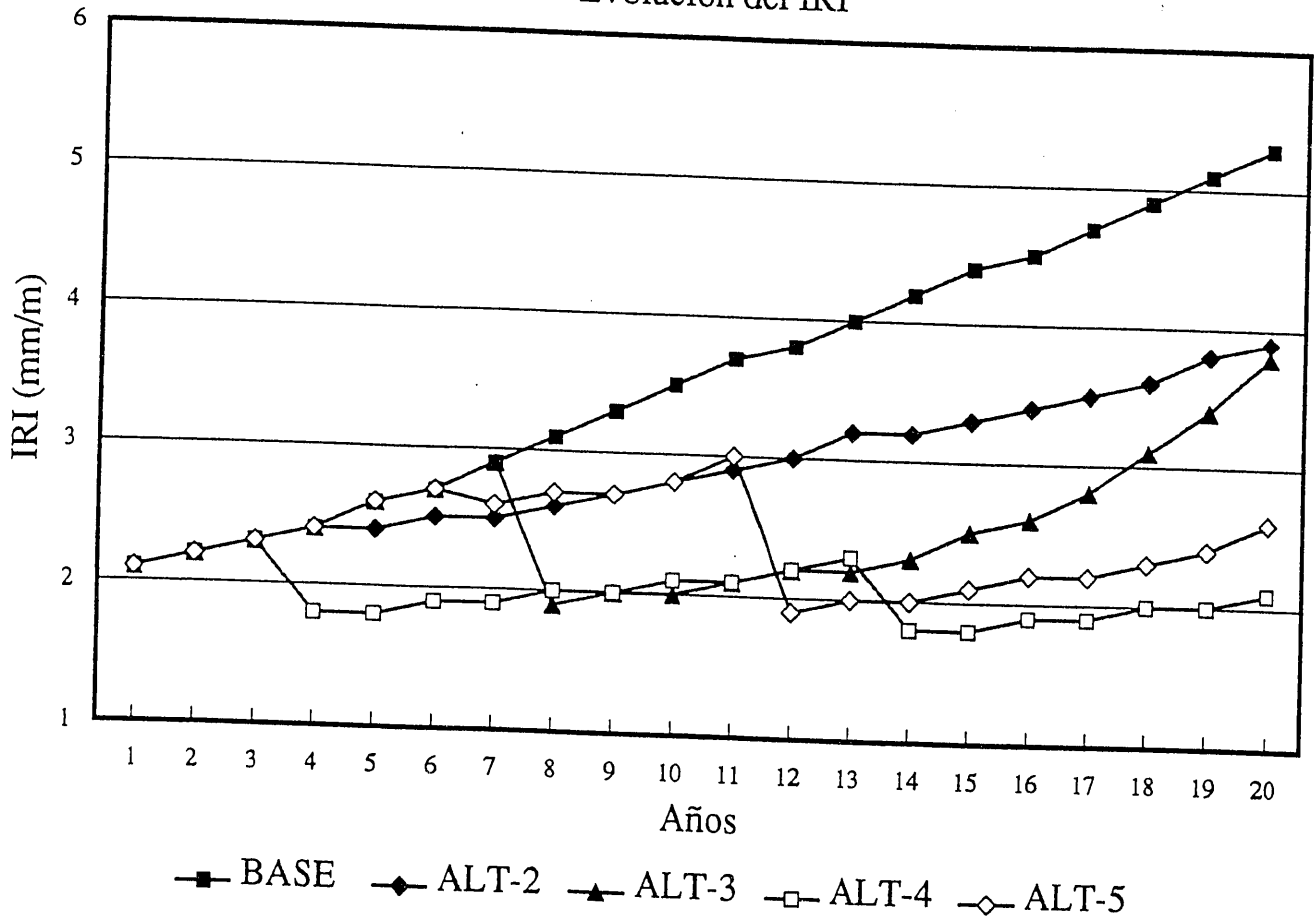


Figura 5. Comparación de la evolución del IRI según la estrategia de mantenimiento.

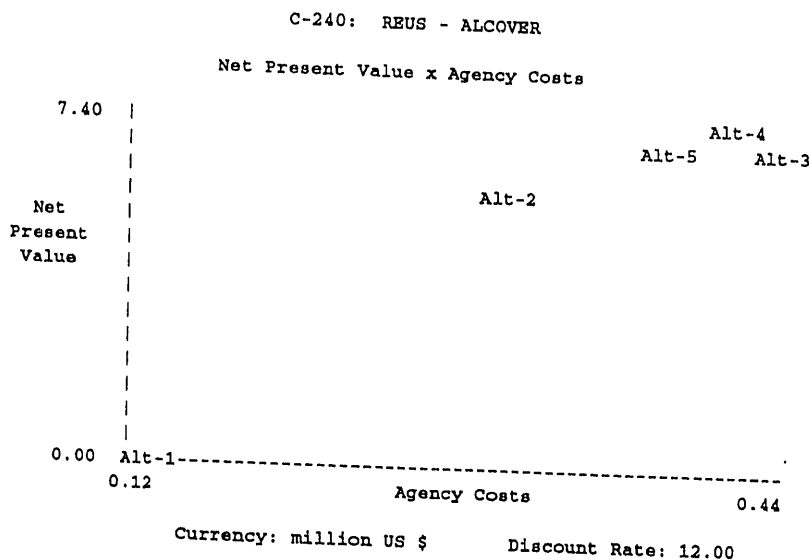


Figura 6. Valor actualizado neto vs costes para la Administración.

gestión de carreteras sea la representación -para cada una de las alternativas respecto a la política base considerada- del beneficio obtenido para la sociedad versus los costes globales de conservación de la Administración. En el ejemplo de la figura 6, cualquier alternativa excepto la número 3 sería válida, aunque realizable en función de las disponibilidades presupuestarias; la alternativa 3 no es rentable en el tramo al ser más costosa que la alternativa 4 y producir unos beneficios menores.

■ Análisis a nivel de red

Una vez realizado un estudio semejante al presentado anteriormente para todos los tramos que constituyen la red, es posible analizar con el modelo EBM las alternativas económicamente más favorables al objeto que, considerando los ajustes e inversiones en el conjunto de tramos de la red estudiada y estableciendo diversas limitaciones anuales de recursos disponibles, el programa establezca, para cada limitación, las estrategias para cada uno de los tramos que optimizan la inversión en el conjunto de la red ■