

PLANEAMIENTO Y PROGRAMACION DEL MANTENIMIENTO DE ACTIVOS VIALES REGIONALES

María José Bastante-Ceca^{1P}

Nolberto Munier¹

Daniel Collado-Ruiz¹

Rosario Viñoles Cebolla¹

¹*Departamento de Proyectos de Ingeniería. Universitat Politècnica de València*

Abstract

A complex and actual project executed in Canada is analyzed. It consists in scheduling the repairs, rehabilitation, demolition or a new construction of ten road bridges. The complexity of the problem resides on:

- a) An established priority according to the traffic on each bridge,
- b) Technical studies costs as well of those for replacement and repair based in actual conditions and forecasted road traffic,
- c) Financing from different sources (federal, provincial and municipal),
- d) Vehicular flow, especially considering maximum allowed load for passing trucks,
- e) Technical measures that need to be taken immediately (at present), short term (1 to 5 years) and long term (6 to 10 years), and taking into account the physical condition of each bridge.

The objective of the project is to prepare a schedule considering the best possible use of all resources, mainly funds, although it is possible to also consider simultaneously other available resources. The problem was formulated in an 'Excel' spreadsheet and solved using the 'Solver' method which is an add-in of Excel and that works using the 'Simplex' method of 'Linear Programming'.

Keywords: Studies cost; financing; priority; immediate measures; short term measures; long term measures

Resumen

Se analiza un proyecto real y complejo ejecutado en Canadá, consistente en programar la reparación, rehabilitación, derribo o nueva construcción de un conjunto de diez puentes carreteros. El problema es complejo ya que involucra considerar:

- a) Prioridad debida al tránsito en cada puente,
- b) Costes de estudios técnicos, de reemplazo y de reparación basados en las condiciones actuales y pronosticadas del tráfico vehicular,
- c) Financiamiento proveniente de diversas fuentes (gobierno federal, provincial y municipal),
- d) Flujos vehiculares, considerando especialmente la carga máxima permitida a los camiones que circulan,
- e) Necesidades técnicas a tomar inmediatas (al presente), mediatas (1 a 5 años) y a largo plazo (de 6 a 10 años), de acuerdo al estado físico de cada puente.

El objetivo del proyecto es preparar un programa de reparaciones que tenga en cuenta el mejor uso posible de los recursos, principalmente fondos, aunque también pueden

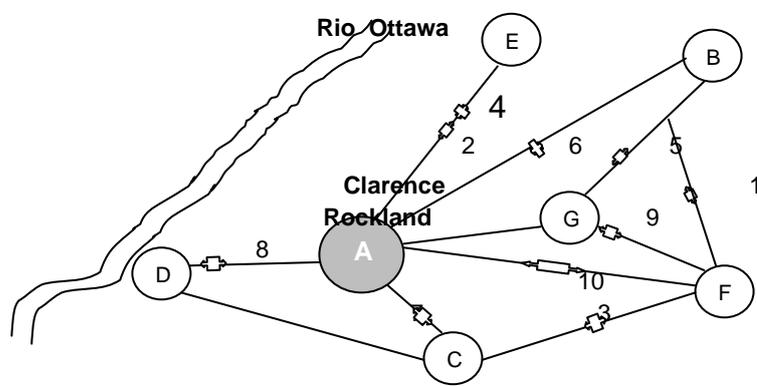
considerarse simultáneamente otros recursos disponibles. El problema se planteó en una planilla 'Excel' y se resolvió empleando la herramienta 'Solver' agregada a dicha planilla y que trabaja empleando el método 'Simplex' de 'Programación Lineal'.

Palabras clave: Costes de estudios; financiamiento; prioridad; medidas inmediatas; medidas a corto plazo; medidas a largo plazo

1. Introducción y objetivo

La zona está situada a 25 km al este de la ciudad de Ottawa en Canadá y bordea la rivera sud del rio Ottawa. Es una llanura fértil, cruzada por una gran cantidad de arroyos que la drenan y que desembocan en el rio Ottawa.

Figura 1: Esquema de la región analizada



El distrito comprende un área rectangular perpendicular al río y compuesta por 6 asentamientos muy pequeños, que son: Clarence, Clarence Creek, St. Pascal, Bourget, Chenley y Hammond. Su capital es la ciudad de Clarence-Rockland de unos 10.000 habitantes, indicada con un círculo más grande en la Figura 1, y actuando como 'lugar central'¹.

El área en total alberga unos 21.000 habitantes (2006), y con una escasa densidad poblacional.

La principal actividad de la zona es el cultivo de maíz, soja y alfalfa y abarca unas 11.000 hectáreas, lo cual genera un intenso tránsito de camiones y de automóviles.

La hidrología del área ha hecho necesario construir una considerable cantidad de puentes (10) (indicados en el esquema), de diferente antigüedad), con distintos estilos constructivos y de diferentes materiales, y, naturalmente, con diversa capacidad de carga. Es decir hay puentes con variedad de materiales (hormigón, madera, hierro), de distintas edades (40, 30 años y más modernos) y con distintas cargas portantes, no sólo por sus características constructivas sino también por su edad.

¹ Expresión que proviene de la teoría denominada 'Central Place Theory', desarrollada por el geógrafo alemán Walter Christaller, quien trató de explicar la localización de los asentamientos urbanos y su relación con los mercados. El lugar central en esta teoría es una ciudad que provee servicios al resto del área y que usualmente es la comunidad más populosa, donde normalmente están las oficinas regionales y que es también un centro administrativo

El Ayuntamiento del distrito de Clarence-Rockland enfrenta un problema de mantenimiento y/o reconstrucción de esos puentes y para ello necesita elaborar un programa que abarque obras a ejecutar inmediatamente, y en el corto y largo plazo. Como se aprecia, es un clásico problema de toma de decisiones, pero que se estima no tiene solución mediante los sistemas heurísticos convencionales debido a su complejidad. Los condicionantes son, para cada puente:

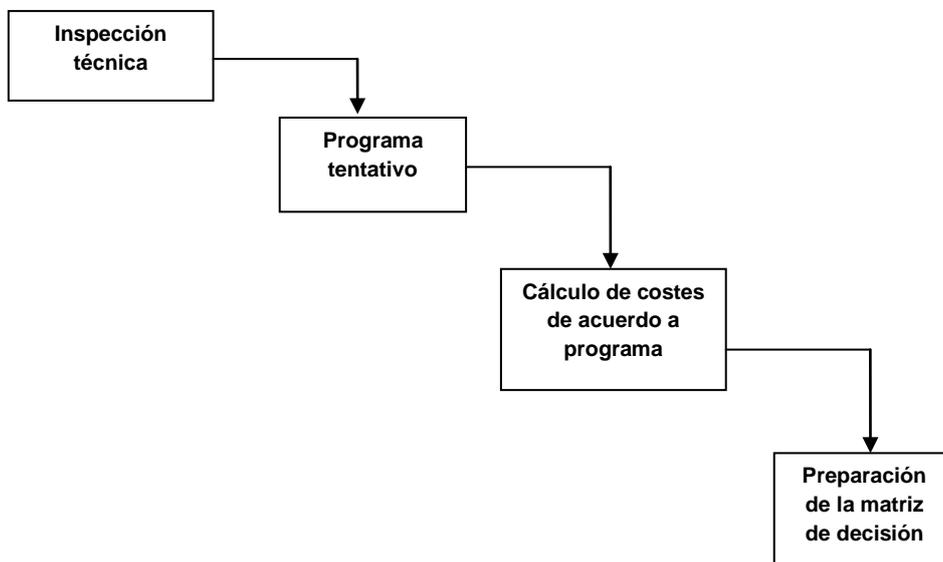
- Costes de mantenimiento, reemplazo, etc.,
- La financiación proviene de tres fuentes: Gobierno Federal, Provincial y Municipal, con diferentes aportes y calendarios,
- Hay diferentes costes por reemplazo,
- Hay diferentes costes por estándares geométricos,
- Costes inmediatos de reparación y desglosados en alta, media y baja prioridad,
- Costes de reparación entre 1 y 5 años,
- Costes de reparación entre 6 y 10 años,
- Costes de los estudios inmediatos, desglosados en alta, media y baja prioridad,
- Carga portante actual permitida,
- Carga sugerida.

Este problema fue resuelto aplicando Programación Lineal, y su objetivo era el de determinar cuáles puentes reparar en el inmediato, corto y largo plazo, considerando todos los condicionamientos existentes.

2. Procedimiento aplicado

Se siguió la siguiente secuencia de actividades:

Figura 2: Secuencia operativa para construir la matriz de decisión



2.1 Detalle la secuencia

Inspección técnica: Se refiere a evaluar el estado y/o condición de cada puente y determinar si se requieren o no reparaciones. De aquí puede establecerse un programa tentativo de trabajos. Esta valoración depende de algunos parámetros tales como: condición física de cada uno, carga vehicular admisible en cada estructura, lo cual incluso puede provocar que se disminuya la carga portante admitida hasta el momento de la evaluación, que a su vez puede estar en relación con el período en que pueden llevarse a cabo las reparaciones.

Sigue el cálculo de costes y se prepara entonces una matriz de decisión. Esta se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Matriz de decisión para establecer un programa de mantenimiento de activos

SCHEDULING BRIDGES REPAIR											
DATA											
<i>Bridge #:</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<i>Costs (CND):</i>	160,000	1,000	194,500	219,000	13,500	164,000	5,000	21,000	120,000	23,500	
<i>People's Priority:</i>	0.50	6	9	1	8	10	7	1	0.50	4	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Sum of rows
Replacement costs (existing)	289,000	538,000	351,000	408,000	206,000	297,000	289,000	336,000	210,000	252,000	= 3,176,000
Replacement costs (Geometric standards)	510,000	538,000	663,000	725,000	293,000	525,000	289,000	336,000	351,000	324,000	= 4,554,000
Repair Costs (H) Immediate	145,000				10,000		5,000		105,000	15,000	= 280,000
Repair Costs (M) Immediate						149,000					= 149,000
Repair Costs (L) Immediate		1,000	176,000		1,000					5,000	= 183,000
Repair Costs at 1-5 span		5,000			15,000		25,000	21,000		1,000	= 67,000
Repair Costs at 6-10 span			30,000		20,000			10,000			= 60,000
Eng. Studies costs (H) Immediate	15,000				2,500				15,000	3,500	= 36,000
Eng. Studies costs (M) Immediate				15,000		15,000					= 30,000
Eng. Studies Costs (L) Immediate			18,500								= 18,500
Eng. Studies Costs at 1-5 years span		5,000			5,000		5,000	7,500		5,000	
Current Posted Load	3		5	5		15			9		
Suggested Posted Load	2		5	3		3			2		
DECISION CRITERIA											
<u>FINANCIAL CRITERION:</u>	BOXES INDICATE IF PROVINCIAL AND FEDERAL CONTRIBUTIONS ARE AVAILABLE										
<i>Bridge #:</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Sum of rows
Repair and engineering costs:	160,000	1,000	194,500		13,500	164,000	5,000	0	120,000	23,500	681,500
Federal and provincial contribution	106,560	666	129,537	New	8,991	109,224	3,330	0	79,920	15,651	
Cost less fed. & prov. contribution	53,440	334	64,963	Bridge	4,509	54,776	1,670	0	40,080	7,849	2,108,561

<u>REPLACEMENT COST CRITERION:</u>												
BOXES INDICATE REPLACEMENT WITH GEOM. COST IF THIS IS LESS THAN 1.5 TIMES REPLACEMENT COSTS (EXISTING)												
												Data
Replacement Costs	289,000	538,000	351,000	New	206,000	297,000	289,000	336,000	210,000	252,000	≤	2,768,000
Replacement Costs	289,000	538,000	351,000	bridge	293,000	297,000	289,000	336,000	210,000	324,000	≥	2,927,000
Decision taken	0	0	0		1	0	0	0	0	0		
<u>ECONOMIC CRITERION:</u>												
Total costs with: replacement, federal and province contributions, repairs, and engineering studies												Sum of row
	53,440	334	64,963		137,196	54,776	1,670	0	40,080	7,849	≤	360,308
<u>REPAIRS COSTS CRITERION:</u>												
BOXES INDICATE IMMEDIATE REPAIR + ENG. STUD.] OR [REPAIR COSTS IN 1-5 AND 6-10 YEARS + ENG. STUD. IN 1-5 YEARS												
Repairs	160,000	1,000	194,500	New	13,500	164,000	5,000	0	120,000	23,500		
Repairs	160,000	36,000	194,500	Bridge	13,500	164,000	5,000	0	120,000	23,500		
<u>LOAD CRITERION:</u>												
BOXES INDICATE REPAIRS NOT DONE NOW, THEN HINTED POSTED LOAD; IF NO REPAIRS NOW AND CURR. POSTED LOAD												
Load Posted	3		5	New		15			9		≤	32 years
Load Posted	3		5	bridge		15			9		≤	years
<u>EXECUTION TIMING CRITERION:</u>												
Execution Period in 2011												
June	0.25											0.50
July	0.25	0.75										0.30
August	0.50	0.20	0.33	New		0.20						0.20
September		0.05	0.33	bridge			0.10					0.10
October			0.34				0.20		0.10			0.10
November					1.00		0.20		0.30			0.05
December								0.35	0.20			
January 2012							0.50	0.65	0.40	0.25		
	1	1	1		1	1	1	1	1	1		

DECISION MATRIX AND RESULT															
<i>Investments per repair periods:</i>	1,000	10,000	30,000	194,500	--	--	219,000	--	--	13,500	20,000	20,000	164,000	--	--
	Bridge 2			Bridge 3			Bridge 4			Bridge 5			Bridge 6		
<i>Type of policy:</i>	Immediat	1-5 span	6-10 span	Immediat	1-5 span	6-10 span	Immediat	1-5 span	6-10 span	Immediat	1-5 span	6-10 span	Immediat	1-5 span	6-10 span
<i>People's Priority:</i>	6			9			1			8			10		
Tentative schedule	1			1			New bridge			1			1		
Tentative schedule		1									1				
Tentative schedule						1						1			
Total budget	1	1	1	1	1	1				1	1	1	1	1	1
Alternatives selection for bridge 2	1	1	1												
Alternatives selection for bridge 3				1	1	1									
Alternatives selection for bridge 4															
Alternatives selection for bridge 5										1	1	1			
Alternatives selection for bridge 6													1	1	1
Alternatives selection for bridge 7															
Alternatives selection for bridge 8															
Alternatives selection for bridge 9															
Alternatives selection for bridge 10															
<i>Bridges:</i>	Bridge 2			Bridge 3			Bridge 4			Bridge 5			Bridge 6		
<i>Type of policy:</i>	Immed.	1-5 span	6-10 span	Immed.	1-5 span	6-10 span	Immed.	1-5 span	6-10 span	Immed.	1-5 span	6-10 span	Immed.	1-5 span	6-10 span
SPANS SELECTED BY BRIDGE	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
(Table continues below)															
	5,000	30,000	--	--	28,500	10,000	120,000	--	--	23,500	1,000	-			
	Bridge 7			Bridge 8			Bridge 9			Bridge 10			Results from	Requirements	
	Immed.	1-5 span	6-10 span	Immed.	1-5 span	6-10 span	Immed.	1-5 span	6-10 span	Immed.	1-5 span	6-10 span	computation	Operator	
	7			1			0.50			4					
Tentative schedule	1						1			1			721,048	≤ 900,500	
Tentative schedule		1			1						1		58,225	≤ 94,500	
Tentative schedule						1							49,863	≤ 60,000	
Total budget	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	895,000	≤ 1,055,000	
Alternatives selection for bridge 2													1	≤ 1	
Alternatives selection for bridge 3													1	≤ 1	
Alternatives selection for bridge 4													1	≤ 1	
Alternatives selection for bridge 5													1	≤ 1	
Alternatives selection for bridge 6													1	≤ 1	
Alternatives selection for bridge 7	1	1	1										1	≤ 1	
Alternatives selection for bridge 8				1	1	1							1	≤ 1	
Alternatives selection for bridge 9							1	1	1				1	≤ 1	
Alternatives selection for bridge 10										1	1	1	1	≤ 1	
<i>Bridges:</i>	Bridge 7			Bridge 8			Bridge 9			Bridge 10					
<i>Type of policy:</i>	Immed.	1-5 span	6-10 span	Immed.	1-5 span	6-10 span	Immed.	1-5 span	6-10 span	Immed.	1-5 span	6-10 span	Total investment:	895,000	
SPANS SELECTED BY BRIDGE	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	Efficiency:	0.85	

Cálculo de costes y financiamiento: El financiamiento, como se comentó, proviene de tres orígenes y con un cierto calendario, por consiguiente los gastos mensuales no deben exceder la suma de los tres orígenes en igual periodo. Por lo tanto es necesario vincular los porcentajes de completamiento de obras por mes y por puente, es decir hay que considerar el flujo de fondos.

2.2 Objetivo

El objetivo es establecer un programa de reparaciones que haga el mejor uso posible de esos recursos monetarios limitados como también de personal y de equipos. El resultado debe proveer un programa de reparaciones para cada puente, es decir, en este caso las variables no son los puentes sino los periodos de reparaciones. Todos los puentes se incluyen en este estudio, excepto el número 1 el cual será probablemente desmantelado y el número 4 que es nuevo.

2.3 Datos

- El total de fondos ascienden a 1.055.000 CND (Dólares canadienses), que se detalla en una celda recuadrada, en la primera columna de la derecha en la última porción de la tabla en la fila 'Total budget' (ver flecha),
- Coste in dólares canadienses para reparar cada puente,
- Costes de los estudios e inspecciones para cada puente,
- Prioridad manifestada por los usuarios, obtenida a raíz de una encuesta,
- Costes de reemplazo actuales,
- Costes de reemplazo para llevar a estándares geométricos,
- Costes inmediatos de reparación para todos los puentes que requieran alta prioridad
- Costes inmediatos de reparación para todos los puentes que requieran media prioridad
- Costes inmediatos de reparación para todos los puentes que requieran baja prioridad
- Costes para todos los puentes programados para el periodo 1-5 años
- Costes para todos los puentes programados para el periodo 6-10 años
- Costes de estudios de ingeniería para todos los puentes que requieren alta, media y baja prioridad
- Costes de estudios de ingeniería para todos los puentes en el periodo 1-5. No se detallan estos costes para el periodo 6-10 años porque es difícil hacer una estimación con tanta anticipación.

2.4 Criterios de decisión

- Criterio financiero, relacionado con la disponibilidad de fondos, es decir informa sobre el origen de los fondos. Los fondos provenientes del gobierno federal y provincial equivalen a las 2/3 partes del monto total,
- Fondos a ser provistos por el Ayuntamiento,
- Criterio de costes de reemplazo. Para cada puente se lleva a cabo el siguiente análisis: Si el costo geométrico es 1,5 veces mayor que el coste de reemplazo, entonces se adoptan los costes de reemplazo; de otra manera, el coste geométrico,
- Criterio económico, que computa para cada puente el coste a ser asumido por el Ayuntamiento después de considerar las contribuciones federales y provinciales,
- Criterio de costes de reparación, que lista los costes para los diferentes escenarios,
- Criterio de carga, que detalla la carga actual para cada puente. Relaciona el tiempo de selección con la carga admitida,
- Criterio calendario de ejecución, que relaciona el trabajo a ser realizado desde junio de 2011 a enero de 2012 inclusive. Esta fila detalla los porcentajes que se deben ejecutar en cada mes, mientras que la suma de cada columna indica qué porcentaje

de un cierto puente necesita ser realizado en cada mes. Esto se hace para estar seguros de que en cada mes el trabajo realizado no excederá el porcentaje establecido necesario por razones de disponibilidad o flujo de fondos.

2.5 Matriz de decisión y resultado

- La fila de 'Total budget' nos informa que la inversión total será de 895.000 CND, que significa que el 85 % de los fondos fueron asignados. Por lo tanto, el programa asigna las reparaciones de puentes en el período más ventajoso, y considerando los requerimientos
- Ejecución del Solver. El resultado aparece en la fila 'Spans selected by bridge', indicado con 1s.
- Observar que los resultados se expresan en valores binarios, que son '1s' para ejecutar la reparación en un cierto periodo, y '0s' para no hacerlas - aunque estos no se muestran para mayor claridad - lo cual es evidente porque dada una reparación ésta no puede ser ejecutada en diferentes periodos. Ésta es la forma de decirle al modelo que seleccione para cada puente sólo una de las tres alternativas, es decir inmediato, en el periodo de 1-5 años o en el periodo de 6-10 años.
- Seguidamente, debajo está la función objetivo que se expresa como la suma de los productos entre los valores de 'Inversiones' y 'Resultados'. Indica entonces el coste total cuando las reparaciones se llevan a cabo de acuerdo al programa. Este valor total maximiza la función objetivo, es decir usar al máximo el capital disponible y al mismo tiempo cumplir con las restricciones impuestas.
- Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Programa final de reparaciones

Puente numero	Programa de reparaciones	Razón
1	No corresponde	Se decidió su desmantelamiento
2	En el periodo de 6 a 10 años	
3	Inmediatamente	
4	No corresponde	Puente nuevo
5	En el periodo de 1 a 5 años	
6	Inmediatamente	
7	En el periodo de 1 a 5 años	
8	En el periodo de 1 a 5 años	
9	Inmediatamente	
10	Inmediatamente	

2.5 Análisis de sensibilidad

Hay diferentes áreas en donde se puede llevar a cabo un análisis de sensibilidad, Ellas son:

- El programa tentativo puede modificarse, por ejemplo cambiando el criterio calendario de ejecución (*'Execution timing criterion'*) alterando el período de ejecución, es decir las reparaciones pueden llevarse a cabo en otros momentos aparte de los especificados, dado que esto no es normalmente un caso de extrema urgencia,

- Pueden variarse los porcentajes de completamiento para las diferentes reparaciones cambiando los valores en el programa tentativo,
- Los términos financieros pueden cambiar en cantidad y en tiempos calendarios,
- Las condiciones para aplicar costos geométricos pueden quizás alterarse.

3. Conclusiones

Como se puede apreciar, éste es un caso de toma de decisión muy complicado, ya que tiene 24 opciones (8 puentes con tres opciones cada uno), y sujetos a una serie de restricciones muy severas.

Se estima que es un ejemplo que demuestra cómo situaciones reales pueden modelarse muchas veces en términos matemáticos y sobre todo para demostrar la potencia de una herramienta como la Programación Lineal.

Por supuesto, sería ilusorio pensar que el modelo matemático, ya sea en este caso o en la mayoría, puede representar exactamente una situación real, ya que estos modelos son sólo aproximaciones de la realidad.

Referencias

Christaller, W. (1933). *Die zentralen Orte in Süddeutschland*. Jena: Gustav Fischer

Munier, N. (2011). *A strategy for using multicriteria analysis in decision-making –A guide for simple and complex environmental projects*. Springer, 2011

Correspondencia (Para más información contacte con):

María José Bastante-Ceca
Departamento de Proyectos de Ingeniería, Edificio 5J
Universitat Politècnica de València
Camino de Vera, s/n
46022 Valencia
Telf: +34 96 387 70 00 Ext. 75685
Fax: +34 96 387 98 69
E-mail: mabasce1@dpi.upv.es