Planteamiento teórico para la optimización del control mecánico de maleza en la infraestructura hidroagrícola de las zonas de riego

Resumen / Abstract

Se establecen bases teóricas para aplicar dos disciplinas de la investigación de operaciones para optimizar el empleo de maquinaria de control de maleza en la infraestructura hidroagrícola de las zonas de riego. Una es la teoría de redes, en donde se emplea el algoritmo PRIM para determinar el árbol de expansión mínima en redes de canales y drenes. La segunda disciplina aplica la programación lineal para determinar tipo y número óptimo de máquinas para el mantenimiento de la infraestructura bajo restricciones. Las aplicaciones se ejemplifican con la información de un distrito de riego en México y comprueba que la investigación de operaciones es valioso apoyo para tomar decisiones por los responsables de conservar las zonas de riego con ahorro de recursos.

Palabras clave: *control de maleza, distritos de riego, investigación de operaciones.*

Theoretical grounds for application of two of the techniques in operations research discipline are developed. This involves optimizing the operation of weed-control machinery existing in the agricultural infrastructure of irrigation districts. One of the techniques is network theory where PRIM algorithm is used to find minimum expansion tree of canals and sewers network. The second technique is linear programming which is used to find the optimal machine number and type for the infrastructure maintenance under constraints. Applications are illustrated with the information from an irrigation district in Mexico where it was shown how operations research is not only a valuable support for decision makers in charge of conservation of irrigation districts but it also included resource savings.

Keywords: *weed control, irrigation district, operations research.*

INTRODUCCIÓN

México cuenta con una superficie de 6 millones de hectáreas bajo riego, de las cuales 3.5 millones se ubican en 82 Distritos de Riego (DR) y 2.5 millones en aproximadamente 39,492 Unidades de Riego (CONAGUA-IMTA, 1994). Parte de la problemática general de los Distritos de Riego es la siguiente:

- Se cuenta con un total de 52,742 km de canales y 35,432 km de drenes en donde se presentan problemas de acumulación de azolve, infestación de maleza acuática y terrestre, fuertes pérdidas de agua (eficiencia de conducción promedio del 40%), incremento de conservación diferida, etc. (IMTA,1993)

- Del presupuesto anual, aproximadamente el 60% se destina a las actividades de conservación y mantenimiento de la infraestructura y maquinaria, de este último el 70% se destina a los gastos de administración y operación de maquinaria.

- El mantenimiento de la infraestructura es deficiente, en parte porque los responsables de la conservación toman decisiones basadas únicamente en su experiencia.

- Sólo el 20% de la maquinaria se encuentra en buenas condiciones.

En general la conservación y el mantenimiento de la infraestructura de los DR es deficiente, en parte debido a que los responsables de la conservación toman decisiones basadas únicamente en su experiencia y en ocasiones la alternativa seleccionada no resulta ser la más adecuada.

Rafael Espinosa Méndez
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Morelos, México.
email: respinoz@tlaloc.imta.mx

También la falta de oportunidad y eficiencia en la realización de los trabajos de conservación, provoca la acumulación de grandes volúmenes de obra (conservación diferida), el deterioro de la infraestructura, grandes pérdidas de agua por infiltración y evapotranspiración, baja flexibilidad de la infraestructura (ineficiencia en la entrega en cantidad y oportunidad del agua a los usuarios), pérdidas económicas, etc.

En este contexto, en el presente trabajo se establecen las bases teóricas de dos disciplinas de la teoría de investigación de operaciones para optimizar los trabajos de conservación con maquinaria: 1) En la teoría de redes se plantea la aplicación del algoritmo de PRIM para obtener el árbol de expansión mínima en la red de canales, caminos y drenes, para optimizar el desplazamiento de cada máquina con relación a la distribución espacial de los diferentes conceptos de trabajo; 2) En programación lineal se propone el modelo teórico para minimizar los costos de conservación y determinar la maquinaria necesaria bajo las restricciones de mayor importancia (presupuesto, volúmenes de obra, etc.).

Finalmente, se determina que la aplicación de estas técnicas permitirá a los responsables de conservación realizar una planeación más acorde con las necesidades existentes, evaluar los programas de conservación en marcha, y tomar decisiones fundamentadas en criterios técnicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

I) Teoría de redes (árbol de expansión mínima)

Una red es un conjunto de nodos (N), arcos (A) y flujos que pasan de un nodo a otro a través de los arcos (figura 1). Se representa por una función de relación Y: A ® N x N que asigna a cada arco J Î A una pareja de nodos (i , i´) Î N x N tal que i ¹ i´ y en donde se supone N ¹ f, donde f es el conjunto vacío. Si i = i´ se presenta un rizo, es decir se trata del mismo nodo (Hamdy A. T., 1992).

Por los arcos se pueden presentar flujos que se denotan como X_{ij} para el flujo entre los nodos i y j, en donde el flujo en la red puede constar de varios conceptos. El costo unitario del flujo para cada arco se denota como C_{ij} para los nodos i y j.

Un árbol es un subconjunto de arcos de la red original que conecta a todos los nodos sin formar un circuito (trayectoria en la que los nodos finales coinciden).

En el problema de árbol de expansión mínima se conocen costos o distancias de la red y lo que se trata es de encontrar un árbol que comunique a todos los nodos de la red con un costo o una distancia total mínima. El algoritmo general del árbol de expansión mínima necesita comenzar con cualquier nodo y conectar a éste con el más cercano de la red (figura 1).

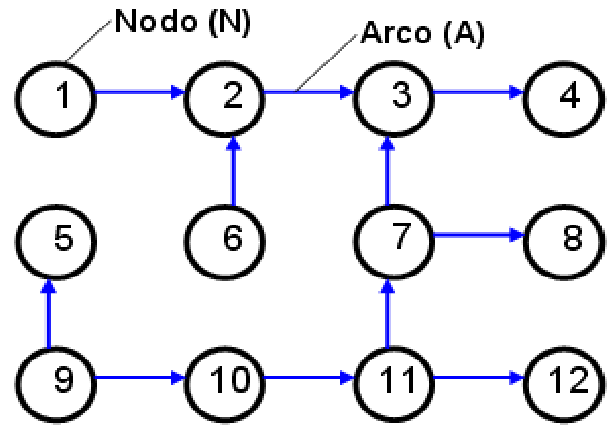

Figura 1. Esquema de un árbol de expansión mínima

Existen varios métodos para determinar el árbol de expansión mínima (KRUSKAL, PRIM, SOLIN, etc.). Específicamente el algoritmo de PRIM considera, inicialmente, una red formada por cualquier nodo de la red original, después se agrega el arco de menor peso adyacente a él y su otro extremo; posteriormente se aumenta el siguiente arco de menor peso, que tenga un extremo en la red formada, junto con su otro extremo; se procede así, sucesivamente, hasta obtener n-1 arcos en la red generada y en ese instante se tiene el árbol de expansión mínima a partir de la red original.

En los Distritos de Riego, la teoría de árbol de expansión mínima se puede aplicar en las redes de canales, drenes y caminos para analizar la ubicación inicial y la trayectoria que permita minimizar el costo de recorrido de la maquinaria de conservación. La estrategia es la conexión de varios puntos con un punto de salida (taller, km 0+000 de un canal, etc.), en donde:

- Los arcos, son las redes de canales, drenes o caminos.
- Los nodos, son las estructuras donde se presenta un cambio de características de la infraestructura, concepto de trabajo, etc. (represas, puentes, etc.)
- El flujo, es la distancia de recorrido de la maquinaria para realizar el trabajo de conservación, la densidad de obra por concepto de trabajo, etc.
- El costo unitario del flujo, es el costo por hora efectiva de la operación de la maquinaria por concepto de trabajo.

La metodología y la aplicación del algoritmo de PRIM es el siguiente:

1). Identificar los nodos (puntos de «control o cambio», por ejemplo las represas), los arcos (tramos de la infraestructura), el flujo (longitud de los tramos) y el costo unitario del flujo (costo por hora efectiva de la operación de la maquinaria).

2) Unir todos los nodos. En los arcos no factibles, asignar un valor muy grande.

3) Aplicar el algoritmo de PRIM para encontrar el árbol de expansión mínima.

a). (Iniciar). Sea x_o (nodo arbitrario) elemento de N (conjunto de nodos), $N_o = \{x_o\}$,

$$A_0 = \{\phi\} \text{ y } k = 0.$$

b). (Añadir un arco). Sea F_k el conjunto de arcos de A que tienen un extremo en N_k. Sea j_k el arco de costo mínimo en F_k y denotar por x_k el extremo de j_k que no pertenece a F_k. Hacer:

$$N_{k+1} = N_k \cup \{ x_k \} \qquad A_{k+1} = A_k \cup \{ j_k \}$$

c). Hacer k = k + 1. Si k < (n-1) regresar a (b). En caso contrario terminar. La red $T_{n-1} = [N_{n-1}, A_{n-1}]$ representa el árbol de expansión mínima de la red.

II) Programación lineal

Para el estudio de los sistemas que se presentan en la ingeniería, se encuentran los métodos de optimización, de los que la programación matemática pretende encontrar el vapor óptimo del objetivo del sistema, sujetándose a una serie de restricciones que surgen de las relaciones que existen entre sus entidades. Una de sus técnicas más importantes es la programación lineal (Hamdy A. T. 1992).

El modelo de programación lineal consiste en minimizar o maximizar una función objetivo sujeta a una serie de restricciones lineales. La forma matricial del modelo de programación lineal es la siguiente:

$$\mathit{Minimizar}\ Z = \sum_i^n (C_i * M_i)$$

sujeto a:

$$\sum_{j-1}^{n} (a_{ij} * x_j) = b_i \qquad i = 1, 2, ..., m$$
$$x_j \geq 0 \qquad j = 1, 2, ..., n$$

En resumen:

$$\mathit{Minimizar:} \quad Z = cx$$
$$\mathit{sujeto\ a:}$$
$$A\,x = b$$
$$x \geq 0$$

Donde (c) es el coeficiente de costos de la función objetivo (Z), (A) es la matriz de restricciones (m x n), (b) es el vector de m restricciones (m) y (x) es el vector de n incógnitas; en los Distritos de Riego, la función objetivo sería minimizar el costo de operación de la maquinaria, bajo las restricciones de presupuesto anual, tiempo para ejecutar los trabajos, etc.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

I) Teoría de redes (árbol de expansión mínima)

La aplicación del método de PRIM dio como resultado el árbol de expansión mínima o la ruta más corta para el desplazamiento de la maquinaria para el desarrollo de los trabajos de desazolve de los canales y drenes del módulo de riego III-1 del DR 025, Bajo Río Bravo, obteniendo una longitud total de recorrido 42.6 km (figura 2).

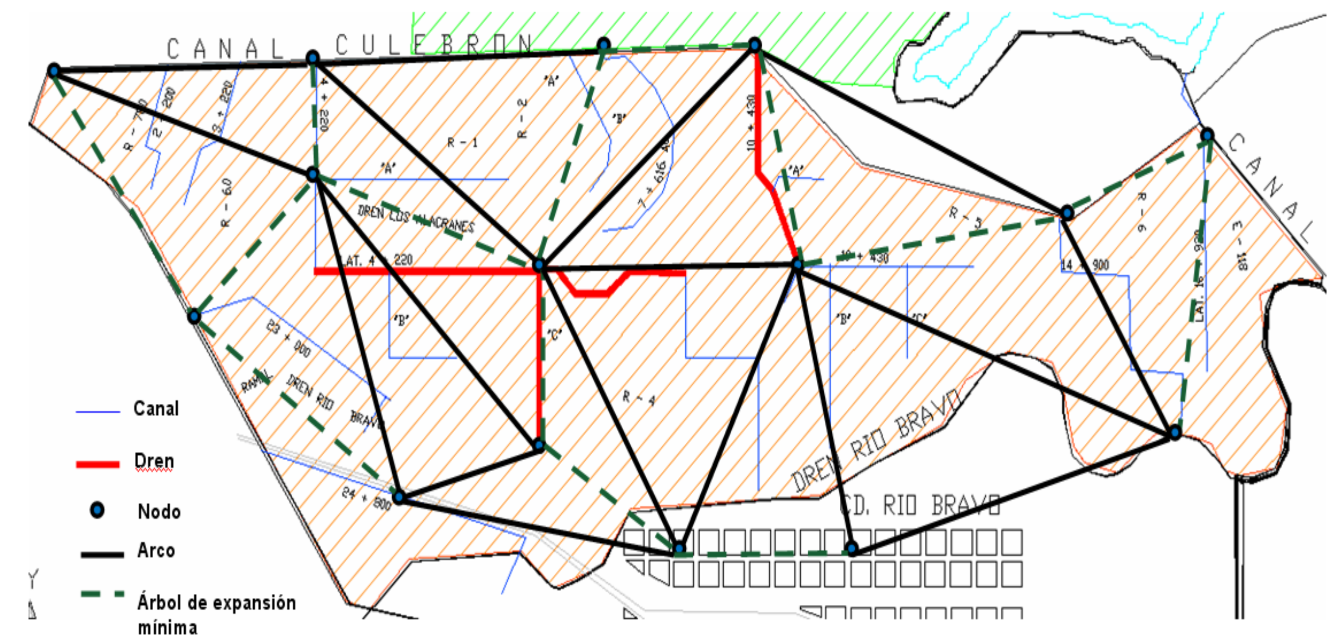

Figura 2. Árbol de expansión mínima obtenido en la infraestructura hidroagrícola del módulo de riego III-1 del DR 025, Bajo Río Bravo, Tam., México

Un problema práctico en la aplicación del árbol de expansión mínima en las zonas de riego es el acceso a la infraestructura, sin embargo, esta problemática se puede superar mediante la construcción de caminos nuevos o elegir rutas alternas, que al final será la opción óptima de tránsito de vehículos, maquinaria agrícola, etc.

II) Programación lineal

La propuesta del modelo de programación lineal para optimizar el tipo y el número de máquinas para la conservación de la infraestructura hidroagrícola es la siguiente:

Función objetivo minimizar:	$Z = \sum_i^n (C_i * M_i)$
sujeto a:	
Restricción por presupuesto:	$\sum_i^n (A_{1i} * A_{1i}) \leq P_1$
Restricciones por volumen de obra:	$\sum_i^n (B_{1i} * M_{1i}) \leq V_1$ $\sum_i^n (B_{2i} * M_{2i}) \leq V_2$ $\sum_i^n (B_{ni} * M_{ni}) \leq V_n$
Restricciones por consumos:	$\sum_i^n (D_{1i} * M_{1i}) \leq K_1$ $\sum_i^n (D_{2i} * M_{2i}) \leq K_2$ $\sum_i^n (D_{ni} * M_{ni}) \leq K_n$
Restricciones de no negatividad:	$M_i \ldots M_n \geq 0$

donde:

Z = Función objetivo, minimizar el costo de los trabajos de conservación mediante la optimización del número de máquinas para realizar los trabajos.

C = Coeficiente global de costo, ($/he).

M = Tipo de máquina.

P = Presupuesto anual para la conservación, $

A= Presupuesto anual destinado a cada máquina, $

B = Rendimiento de la maquinaria por hora efectiva por concepto de trabajo, (m^3/he, km/he, etc.)

V = Volumen de obra por hora efectiva que es necesario extraer por concepto de trabajo, (m^3/he, ha/he o km/he)

D = Consumos de diesel por hora efectiva, (l/he)

K = Cantidad potencial de insumos por hora efectiva, (l/he)

Para obtener la solución óptima del modelo se puede aplicar el algoritmo del método simplex analítico.

CONCLUSIONES

1. La teoría de redes permitirá planear una estrategia de ubicación y movimiento de la maquinaria en las redes de distribución y drenaje, disminuyendo los recorridos y tiempos muertos, optimizando así los recursos económicos y técnicos.

2. El modelo de programación lineal es una herramienta de apoyo factible para la determinación del parque óptimo de maquinaria en los Distritos de Riego.

REFERENCIAS

Hamdy A. T. (1992). Investigación de Operaciones. México, D.F. Alfaomega. 615 p.

IMTA (1993). Manual sobre Maquinaria de Conservación en Distritos de Riego. Jiutepec, Mor. 64 p.

CONAGUA-IMTA. (1994). Conservación de Obras de Infraestructura de los Distritos de Riego. Anexo Técnico General de Conservación. Morelos, Méx. 5-61.