



UANL



FIME

Un procedimiento de asignación de recursos para un problema estocástico de incendios forestales

Beatriz A. Rivera-Aguilar
Roger Z. Ríos-Mercado
Marco A. González-Tagle

RESUMEN

Este trabajo aborda el problema de asignación de recursos enfocado en el área forestal. El objetivo es encontrar una distribución óptima de los recursos disponibles (camiones de bomberos) para atender y minimizar el valor esperado de aquellos incendios que no tienen una respuesta estándar. Se plantea como un problema de optimización estocástica y se emplea una técnica de solución por escenarios, donde cada escenario representa una cierta configuración de incendios en una región de estudio dada ponderada por su probabilidad de ocurrencia. Se emplea un modelo matemático de la literatura el cual ha sido exitosamente usado en el estado de California, Estados Unidos., con algunas adaptaciones que lo hacen que lo hacen más acorde a la situación local. Nosotros utilizamos este enfoque y proponemos una adaptación a un problema real de un municipio del estado de Nuevo León, México. Se ilustra la validez de la metodología de solución en un caso de estudio.

1.- INTRODUCCIÓN

El problema de asignación de recursos consiste básicamente en distribuir los recursos limitados que se tienen en diversas necesidades de acuerdo a determinados criterios de planeación. Las aplicaciones de este problema son inmensas y se dan en diversos sectores entre los que destacan: empresas e instituciones gubernamentales.

Este trabajo esta enfocado a la administración de recursos en el ámbito forestal, en específico en los incendios forestales. Cuando un incendio inicia los encargados de darle seguimiento se enfrentan a diferentes problemas en su planeación, no solo tienen que invertir y desplegar diferentes recursos para su atención: recursos materiales, humanos, tiempos, etc., sino también se enfrentan a problemas de incertidumbre como lugar y tiempo en que incidirá un incendio, la planificación para combatirlo y de los recursos disponibles designar los que tendrán que utilizar. [1] Conocer la demanda esperada y desplegar recursos para un “ataque inicial” para combatir un incendio es una parte importante en la planeación de incendios forestales. [2]

Un ataque inicial se define como la atención inmediata que se le debe dar a un incendio luego de ser detectado, enviar recursos para la contención y no-propagación del mismo, marcar un perímetro y combatirlo antes de que sobre pase la línea marcada, si esto ocurriera el incendio se ha salido de control, y esto llevaría a pérdidas desmedidas.

Por respuesta estándar se entiende como el número deseado de recursos que pueden llegar a un incendio dentro de un tiempo de respuesta especificado.

Un estudio reciente de asignación de recursos con incertidumbre y la metodología para encontrar la solución óptima a este problema puede ser encontrada en Haight y Fried [3].

2. JUSTIFICACIÓN.

En México hace algunos años la SEMARNAT y el Servicio Forestal Canadiense desarrollaron un modelo canadiense para predicción de incendios a nivel nacional, sin embargo los resultados arrojan mapas de baja precisión ya que no consideraron características importantes de los bosques mexicanos y por lo tanto no se emplea este trabajo como una guía de prevención. Por lo cual en el área de Nuevo León cuando ocurre un incendio forestal la atención para el despliegue de recursos y de personal se da de 1 ó 2 días después de que fue detectado el incendio.

Por tanto no se tiene ninguna planificación o estructura de cómo distribuir los recursos disponibles que se tienen para combatir los incendios. Por tal motivo resulta interesante considerar la realización de un modelo de respuesta estándar para apoyar la toma de decisiones en este sentido.

3. OBJETIVOS.

En este trabajo se abordará un caso de asignación de recursos para la extinción de incendios forestales en áreas potenciales del estado de Nuevo León, México.

Se desea encontrar una distribución donde se utilicen los recursos disponibles que se tienen para atender y minimizar un cierto número esperado de incendios al día que no tienen una respuesta estándar.

Lo anterior es con el fin de facilitar una buena planeación y distribución de recursos de extinción de incendios y reducir todas las pérdidas que se tendrían si los incendios no pudieran ser atendidos.



UANL



FIME

Este problema de asignación de recursos bajo incertidumbre ha sido abordado con anterioridad, la idea es adaptar y aplicar el modelo de Haight y Fried para un caso de estudio en una región del sur

del estado de Nuevo León, y evaluar el desempeño del método desarrollado con base en un diseño experimental adecuado.

4. METODOLOGÍA.

En primera instancia se aplica el modelo matemático antes mencionado, el cual tiene como función objetivo minimizar el número esperado de los incendios que no tienen una respuesta estándar.

Para aplicar el modelo matemático es necesario contar con cierta información requerida, se debe conocer sobre las estaciones de bomberos: ubicación, capacidad de almacenamiento y tiempos (entre estaciones y ubicaciones de incendios), sobre los incendios: su incertidumbre, ubicación e intensidad (mediante una técnica de probabilidad basada en datos históricos se construyen escenarios de incendios necesarios para el modelo) además de conocer cuantos y cuales son los recursos con los que se cuentan.

El modelo tiene la decisión de variables en dos etapas: Etapa 1, variables de tipo enteras que indican el número de recursos que se asignarán a cada estación; y Etapa 2, variables de tipo enteras que indican el número de recursos que serán enviados de cada estación a cada ubicación de incendio. Estas decisiones por etapas y sus asignaciones correspondientes se hacen porque aquí es donde afecta lo estocástico del problema, ya que dependiendo de la probabilidad de ocurrencia de incendio y la intensidad del mismo en un área potencial los recursos tendrán que ser asignados; primero a las estaciones, y después éstas tendrán que asignarlos a cada zona potencial.

El modelo se formula con la siguiente notación.

Función Objetivo:

Minimizar el número esperado de los incendios que no tienen una respuesta estándar.

Índices:

j = índice de estaciones de bomberos ($j = 1, 2, \dots, J$)

k = índice de ubicaciones potenciales de incendio ($k = 1, 2, \dots, K$)

s = índice de escenarios de incendios ($s = 1, 2, \dots, S$)



UANL



FIME

Parámetros:

a = número total de recursos disponibles

b_j = cota superior del número de recursos en la estación de bombero j ; $j \in J$

P_s = probabilidad de que ocurra el escenario s ; $s \in S$

r_{ks} = número de recursos requeridos en la ubicación k en el escenario s

t_{jk} = tiempo de respuesta de la estación j a la ubicación de incendio k

T = máximo tiempo de respuesta para la respuesta estándar

N_k = Conjunto de estaciones de la cual los recursos pueden llegar a la ubicación de incendio k con el máximo tiempo de respuesta.

Variables de decisión:

x_j = variable entera que representa el número de recursos asignados en la estación j

y_{jks} = variable entera que representa el número de recursos en la estación j que son desplegados a la ubicación de incendio k en el escenario s

z_{ks} = variable binaria

igual a 1 si la ubicación de incendio k recibe una respuesta estándar durante el escenario s ; e igual a 0 de otro modo



UANL



FIME

Modelo

Minimizar

$$\sum_{s \in S} (p_s \sum_{k \in K} (1 - Z_{ks})) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in J} x_j = a \quad (2)$$

$$x_j \leq b_j \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} Y_{jks} \leq x_j \quad \forall j \in J \text{ y } s \in S \quad (4)$$

$$Z_{ks} r_{ks} \leq \sum_{j \in N_k} Y_{jks} \quad \forall k \in K \text{ y } s \in S \quad (5)$$

$$Z_{ks} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K \text{ y } s \in S \quad (6)$$

El objetivo (1) es minimizar el número esperado de los incendios que no tienen una respuesta estándar. La restricción (2) garantiza que todos los recursos disponibles que se tienen sean asignados a las estaciones de bomberos. Restricción (3) define la capacidad de cada estación. Restricción (4) requiere que el número de recursos desplegados de cada estación j a la ubicación de incendio k en el escenario s sea menor ó igual al número de recursos que contiene la estación. Restricción (5) es la condición de sí un incendio recibe una respuesta estándar; un incendio recibe una respuesta estándar ($Z_{ks} = 1$) solo sí el número de recursos desplegados a la ubicación de incendio dentro del máximo tiempo de respuesta ($\sum_{j \in N_k} Y_{jks}$) es mayor ó igual que el número de recursos requeridos (r_{ks}).



UANL



FIME

El método propuesto está basado en un modelo de optimización combinando la incertidumbre. Esto consiste en que de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de los incendios y la intensidad de ellos, el modelo se construye no como un modelo determinista sino estocástico y por ello, es necesario la creación de diferentes escenarios, los cuales pueden llegar a ocurrir dependiendo de las variantes del problema, y para ello es necesario utilizar una técnica de probabilidad que ayude a generar estos escenarios, esta técnica se basa en los datos históricos de incendios ocurridos en una región. El modelo se resuelve tomando en cuenta que la probabilidad de ocurrencia de cualquier escenario es la misma; y como resultado principal se tiene cuantos incendios fueron los que no pudieron recibir una respuesta estándar y las mejores asignaciones que se pudieron hacer de acuerdo a los recursos que se tienen y a los diferentes escenarios que pudieron ocurrir; estas asignaciones se hacen en primera instancia a las estaciones de bomberos y después a cada ubicación potencial de incendio.

5. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados preliminares de la funcionalidad del modelo matemático.

Estos resultados son de un pequeño ejemplo con el cual se trabajó para ilustrar de forma breve y concisa como opera este método.

Los datos que se utilizaron en el modelo fueron los siguientes:

- 5 estaciones de bomberos
- 20 zonas potenciales de incendios
- 20 escenarios
- 25 recursos en total pueden almacenar todas las estaciones
- 20 recursos disponibles
- 30 min es el tiempo que se tomó para especificar el tiempo máximo de respuesta
- 0.05 probabilidad de que ocurra cualquier escenario

Enseguida se muestran las tablas que ilustran la información antes mencionada.



UANL



FIME

La Tabla 1 Muestra la cantidad máxima de camiones de bomberos que cada estación puede almacenar en sus instalaciones.

Estación j	Cota b_j
1	5
2	3
3	7
4	4
5	6

Tabla 1. Cotas b_j para el número de recursos que se pueden almacenar en las estaciones de bomberos.

La Tabla 2 Muestra los tiempos en que tardan los camiones de bomberos en llegar desde las estaciones a cada ubicación potencial de incendio.

Estación j	Ubicación potencial k																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20
1	15	4	1	25	2	3	4	4	5	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10
		0	0		7	5	0	5	0	1	9	0	5	0	5	0	5	0	5	0
2	40	1	3	40	3	3	1	4	3	2	2	3	4	5	5	5	6	7	9	12
		5	5		6	5	7	0	7	5	7	7	0	0	5	7	0	0	0	0
3	40	3	3	45	2	1	3	1	1	3	5	5	3	2	2	3	4	6	9	11
		9	5		0	5	2	0	7	3	0	5	5	9	7	3	2	0	0	0
4	80	7	7	10	6	4	3	4	3	1	1	5	7	3	4	5	3	2	2	33
		0	5	0	5	0	9	2	2	7	5			2	7	0	9	0	7	
5	12	9	9	11	7	6	4	4	3	3	4	3	3	2	3	2	1	3	4	15
	0	0	5	0	0	5	5	2	3	5	2	9	2	0	2	5	0	1	0	

Tabla 2. Tiempos de respuesta (en min.) t_{jk} de la estación j a la ubicación k



La Tabla 3 Muestra los requerimientos que se necesitan en la ubicación de incendio potencial k en el escenario s , para contener el incendio que se puede presentar de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia de incendio y la intensidad del mismo.

Ubicación k	Escenario s																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	0	0	0	3	2	0	1	1	0	3	0	1	2	3	2	0	0	0	0
2	0	3	1	1	0	3	3	3	2	1	3	0	0	0	1	2	3	2	0	1
3	0	0	3	2	1	0	0	2	3	1	2	3	2	1	0	0	0	2	1	3
4	0	0	1	1	3	0	1	1	1	3	3	3	0	4	5	2	3	2	1	1
5	1	0	0	0	0	3	3	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	0	0	1	2	3	1	1	1	0	0	0	3	3	3	2	2	2	3	2	1
7	0	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	0	0	2	3	2	1	1	1	0	0	0	0	3	3	3	3	3	2	2	2
9	1	0	2	2	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	2
10	0	1	1	2	3	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0	2	3	1	3	2
11	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	3	2	1	2	3	2	1	2	3
12	1	0	2	3	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	1	2	2	2	2	2
13	0	1	1	1	2	3	3	3	3	2	2	1	2	2	1	2	3	3	3	3
14	0	0	0	0	0	1	1	1	1	3	2	3	2	1	2	2	1	2	3	3
15	0	0	0	3	3	3	3	2	2	2	1	2	3	2	1	3	2	3	2	2
16	0	0	0	1	1	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
17	0	3	3	3	2	3	1	1	1	2	3	2	1	2	3	2	1	2	3	2
18	3	3	3	2	1	1	1	3	2	3	2	3	2	3	2	1	1	1	2	3
19	1	1	1	1	1	3	3	2	3	2	3	3	3	2	2	2	2	3	2	1
20	1	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2

Tabla 3. Número de recursos requeridos r_{ks} en la ubicación k , en el escenario s .

Una vez resuelto el modelo con los datos anteriormente detallados, se observa la curva de la gráfica (Figura 1.) la cual nos muestra el costo-beneficio entre el número de camiones desplegados y el número de incendios que no tuvieron una respuesta estándar; esta gráfica tiene una forma convexa en la cual la no-cobertura disminuye a una tasa decreciente a medida que aumenta el número de motores desplegados.



La Tabla 4 Muestra los resultados (del lado izquierdo) del valor de la función objetivo respecto a los recursos disponibles; para este caso se trabajó variando los recursos, para observar el comportamiento del modelo matemático y corroborar su funcionalidad en cuanto **al número de incendios que no se podrían cubrir** dado 1 recurso, 2 recursos, ..., hasta los 20 recursos; esto es, el valor de la función objetivo dado las 20 configuraciones de escenarios detallados en la Tabla 3 y solo contando con 1 recurso disponible es de: "15.55" incendios que no se van a alcanzar a cubrir con 1 recurso disponible, y así sucesivamente se fueron incrementando la cantidad de recursos disponibles para observar la relación coherente de a más recursos menor será el número de incendios no cubiertos.

Ahora los resultados mostrados de la Tabla 4. (del lado derecho) no es más que **la mejor decisión** de cuantos y a que estación asignar los camiones para que cubran los incendios; esto es, tomando el ejemplo anterior, dado mis 20 configuraciones de escenarios contando solo con 1 recurso disponible, el número de incendios no cubiertos es de: "15.55", entonces la mejor decisión que se pudo hacer para atender a los incendios fue asignarle ese camión a la estación "2", y así sucesivamente, se muestran las mejores asignaciones al ir incrementando los recursos.

Camiones disponibles	Valor objetivo (incendios no cubiertos)	Camiones desplegados				
		1	2	3	4	5
0	16.5					
1	15.55		1			
2	14.7		1		1	
3	13.9		1	1	1	
4	13.2	1	1	1	1	
5	12.6	1	1	1	1	1
6	11.95	1	2	1	1	
7	11.35	1	2	1	2	1
8	10.8	2	2	1	2	1
9	10.25	1	2	3	2	1
10	9.6	1	2	3	2	2

11	9.2	1	2	3	3	1
12	8.7	1	2	3	4	2
13	8.35	1	2	3	3	4
14	7.85	1	3	3	4	4
15	7.5	1	3	3	4	4
16	7.05	2	2	4	4	4
17	6.7	1	3	5	4	4
18	6.35	2	3	5	4	4
19	5.9	4	2	5	4	4
20	5.55	4	3	5	4	4

Tabla 4. Valor de la función objetivo y número de camiones desplegados por estación.

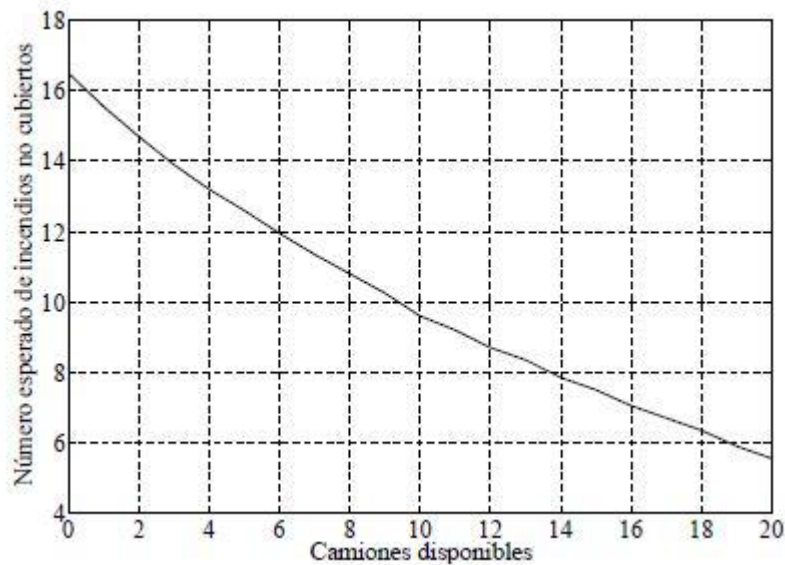


Figura 1: Recursos disponibles vs Número esperado de incendios no cubiertos.

6. DISCUSIONES

Como ya se ha mencionado anteriormente, el agua es un recurso natural que se está agotando, un aspecto importante que se tiene que discutir es a qué se le debe de dar prioridad, si realizar la planeación de la producción en base a la limitante del agua, esto nos llevaría a la disminución de los beneficios o, hacer la planeación de tal manera que se obtenga el mayor beneficio posible pero sin importar las consecuencias naturales que ello implica.

Hay otros elementos que se tienen que discutir, por ejemplo, la cantidad de agua que consume cada cultivo dependiendo al tipo de suelo (arenoso, rocoso, etc.), la cantidad de niveles de humedad que se tienen que considerar para cada cultivo y para cada tipo de suelo, el nivel de afectación del rendimiento del cultivo si es que éste no es regado a nivel óptimo o en caso de que sea regado a un nivel mayor del óptimo, entre otros.

7. CONCLUSIONES

El modelo anteriormente presentado fue aplicado a un problema pequeño, para resolver problemas de asignación de recursos con incertidumbre; los resultados preliminares mostrados nos indican que el modelo funciona correctamente y por lo tanto podremos utilizarlo y adaptarlo para un caso real de un área forestal de Nuevo, León., México.

Las soluciones obtenidas para diferentes instancias del problema nos dan el óptimo. Como se observa en la gráfica (ver Figura 1), los resultados son los esperados, ya que claramente se ve la relación entre a más recursos disponibles el número esperado de incendios no cubiertos es menor.

Trabajo Futuro

Como trabajo futuro se pretende desarrollar una herramienta computacional, la cual desplegará resultados visuales y numéricos del modelo de optimización aplicado a cierta área de estudio.

Además se pretende aplicar la metodología a casos de estudio de zonas forestales del estado de Nuevo, León., y tal vez en otros estados.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martell, D. L. (1982). *A review of operational research studies in forest fire management*. Canadian Journal of Forest Research, 12(2): 119–140.
- [2] Martell, D. L. (2002) *Current practices and new challenges for operational researches*. Handbook of Operations Research in Natural Resources, Springer Science/Business Media, New York, NY, 489-509.
- [3] Haight, R. G. y Fried, J. S. (2007). *Deploying wildland fire suppression resources with a scenario-based standard response model*. INFOR, 45(1): 31–39.