

UN MODELO DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA LA SELECCIÓN Y ASIGNACIÓN TEMPORAL DE RECURSOS AÉREOS DESTINADOS A LA CONTENCIÓN DE UN INCENDIO FORESTAL

Jorge Rodríguez-Veiga¹, María José Ginzo-Villamayor² y Balbina Casas-Méndez³

¹ITMATI, Instituto Tecnológico de Matemática Industrial, Santiago de Compostela, España, jorge.rodriguez.veiga@usc.es

²Grupo de Investigación Modesty, Departamento de Estadística, Análisis Matemático y Optimización, Universidad de Santiago de Compostela, España, mariajose.ginzo@usc.es

³Grupo de Investigación Modesty, Departamento de Estadística, Análisis Matemático y Optimización, Universidad de Santiago de Compostela, España, balbina.casas.mendez@usc.es

RESUMEN

Determinar la planificación óptima que permita decidir el tipo y el número de recursos necesarios para extinguir un incendio forestal es una tarea que se ha abordado en la literatura utilizando modelos extraídos de la investigación operativa. En este trabajo se propone un modelo de optimización que contempla también la asignación de los recursos a diferentes periodos de tiempo. Esta asignación resulta de interés para los profesionales que combaten los incendios, que deben de cumplir con la normativa española que regula los periodos de trabajo y descanso de los pilotos, sin descuidar la restricción natural de no desatender los frentes más peligrosos del incendio. Se considera la solución exacta para contrastar el modelo y también se propone un algoritmo heurístico, diseñado específicamente para este problema, que nos permite obtener una solución de calidad rápidamente cuando nos enfrentamos a un problema de dimensiones reales. Por último creamos una interfaz gráfica que facilite la introducción de los datos y proporcione los resultados de manera práctica. La programación informática, tanto del modelo, como del heurístico y de la interfaz, la hemos realizado con el lenguaje R.

Palabras y frases clave: contención de incendios forestales, planificación de recursos aéreos, asignación de tiempos, programación entera, algoritmos heurísticos, interfaz gráfica.

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de los incendios forestales se ha convertido en uno de los principales problemas ecológicos que sufren los bosques, debido a la alta frecuencia e intensidad que han adquirido en las últimas décadas y que conlleva graves consecuencias económicas (Butry *et al.*, 2001). Cada año se producen más de 45.000 incendios en el sur de Europa, que tienen como consecuencia la quema de cerca de 0,5 millones de hectáreas de bosques y otras tierras rurales (Camia *et al.*, 2009). Los periodos de sequía o el cambio climático no hacen más que acrecentar este fenómeno (Arno y Allison-Bunnell, 2002), y aunque el esfuerzo para prevenir incendios es importante (Martínez *et al.*, 2009), es esencial contar con herramientas que permitan una toma de decisiones eficiente cuando el fuego ya se ha producido y debe ser contenido (Mavsar *et al.*, 2013, Martell, 2015).

En Galicia (con una superficie de 29.574 km², el 69 % de la misma está formada por bosques), el organismo público regional responsable de combatir incendios forestales cuenta con 30 aviones en 2017, de los cuales 25 son helicópteros.

Es importante una buena planificación de los recursos de extinción que reduzca los costes y daños causados por el incendio. El análisis de los incendios desde la perspectiva de la optimización de los costes asociados se remonta a Headley (1916) y Sparhawk (1925). El modelo teórico que persigue una gestión de recursos basada en la minimización de costes, en sentido amplio, ha sido

denominado C+NVC (*Cost Plus Net Value Change*, Gorte y Gorte (1979)). Este modelo combina el objetivo de minimizar el coste provocado por el uso de recursos (terrestres y/o aéreos) con el de reducir los costes generados por la quema del terreno, la pérdida de materiales o las tareas de regeneración. Donovan y Rideout (2003a) proponen una reformulación del modelo inicial y Donovan y Rideout (2003b) proponen un modelo de programación lineal determinista que minimiza la función C+NVC y permite seleccionar los recursos a utilizar considerando el momento en que se puede contener el incendio con los recursos disponibles.

Lee (2006) propone una versión estocástica del modelo anterior, que tiene en cuenta que el perímetro del incendio en cada periodo de tiempo puede no ser un valor perfectamente determinado. Si bien este modelo puede ser más realista por acomodar la incertidumbre, su resolución puede incurrir en un mayor coste computacional. Hu y Ntaimo (2009) también incorporan estocasticidad en el modelo, vinculado en este caso a la posible aparición simultánea de varios incendios. Recientemente, Costafreda-Aumedes *et al.* (2015) utilizan un modelo de redes neuronales para analizar los costes y otros factores que influyen en el despliegue de diferentes recursos para la extinción.

Cabe señalar que el problema de la selección de recursos diseñado para la contención de incendios a coste mínimo, tiene similitudes con el problema de la mochila (Winston, 1994), un problema clásico de la investigación operativa en el que se busca seleccionar recursos dentro de un conjunto de posibles candidatos, sujeto a ciertas restricciones y con el objetivo de optimizar una cierta función de utilidad. Una peculiaridad notable es la componente temporal de nuestro problema, pues una vez elegido un recurso puede ser utilizado posteriormente durante varios periodos de tiempo. También la contención del incendio está ligada a un periodo de tiempo, de modo que cuanto más se tarde en contener el incendio, mayor será el área quemada.

El objetivo de este trabajo es adaptar la metodología C+NVC al caso de la contención de incendios en España. Hemos tenido en cuenta la Circular Operacional 16-B (1995) que establece como requisitos el tiempo máximo de vuelo diario para el piloto de un avión en un incendio forestal (8 horas) y el tiempo máximo de vuelo sin interrupciones (2 horas cada 40 minutos).

2. MARCO TEÓRICO Y ENFOQUE METODOLÓGICO

Proponemos un modelo de programación lineal binario cuya meta es seleccionar los recursos aéreos que se utilizarán, durante un día de trabajo, para la extinción de un incendio forestal. Al mismo tiempo, proporciona una planificación temporal de los recursos que se ajusta a los tiempos máximos de vuelo y los tiempos normativos de descanso. La función objetivo del modelo, siguiendo la metodología C+NVC, contempla minimizar el tiempo de extinción de incendios y, en consecuencia, minimizar los daños causados por el fuego y el tiempo de utilización de los recursos.

El modelo ha sido programado con el software libre R (The R Project for Statistical Computing, 2017) y su resolución ha sido contrastada mediante el solver Gurobi (Gurobi Optimizer, 2017) por medio de distintos ejemplos. Dado que la resolución exacta puede ser computacionalmente costosa cuando se consideran problemas que implican una cantidad elevada de recursos, se ha diseñado un algoritmo heurístico específico. La heurística también se ha programado en R y se ha contrastado su comportamiento analizando tanto la calidad de las soluciones que proporciona, como los tiempos de cálculo necesarios para su obtención.

La metodología heurística ya ha sido utilizada para la planificación de actividades en el contexto de la contención de incendios. Por ejemplo, Kim y Bettinger (2005) utilizan una búsqueda tabú que proporciona soluciones de alta calidad, pero no es computacionalmente eficiente. Young-Hwan *et al.* (2009) utilizan una heurística simple, que es rápida y produce soluciones de calidad. Ambos trabajos se enmarcan en la planificación óptima de actividades forestales. Pappis y Rachaniotis (2010a y 2010b) estudian el problema de planificar las jornadas de trabajo tratando este problema como un problema de horarios denominado con tiempos de procesamiento deteriorados, ya que un retraso en el inicio de las tareas de extinción puede causar un aumento en el tiempo de contención del incendio. Utilizando algunas ideas del algoritmo de Drozdowski (1996) para planificación en paralelo de tareas en un sistema multiprocesador, proponen un algoritmo heurístico para resolver el problema. Bilbao-Marón (2013) estudia la asignación de recursos a aeródromos para maximizar la utilidad de dichos recursos en relación con el riesgo de incendio y minimizar, a su vez, el coste de ejecución de la asignación. La formulación de este problema considera también, dentro de la definición de dicha función de utilidad, la distancia relativa entre el aeropuerto, el punto de

potencial riesgo de incendio y el recurso acuífero (lago, río o mar). Para su resolución eficiente se propone el uso de algoritmos de optimización basados en la denominada búsqueda de armonía.

Finalmente, en este trabajo se muestra una interfaz construida con la herramienta R que permite utilizar el algoritmo de una manera sencilla y generar informes de las actividades relacionadas con la planificación de los recursos.

3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Comenzamos introduciendo la notación necesaria, para posteriormente formular el problema.

Conjuntos

I : Conjunto de posibles aeronaves a seleccionar para combatir el incendio, $I := \{1 \dots n\}$.

T : Conjunto de periodos de tiempo en el que se tiene información de la evolución del incendio, $T := \{1 \dots m\}$.

Parámetros

Dentro de los parámetros distinguiremos entre aquellos relativos a las aeronaves, los relativos al incendio y los relativos a la normativa.

Parámetros relacionados con las aeronaves

A_i : Número de periodos de tiempo necesarios para llegar al incendio desde la situación actual de la aeronave $i \in I$.

CFP_i : Número de periodos de tiempo que ha trabajado sin descansos la aeronave $i \in I$ en el instante de realizar la planificación.

CRP_i : Número de periodos de tiempo de descanso que lleva realizados la aeronave $i \in I$ (en caso de estar en situación de descanso).

$CTFP_i$: Número de periodos de tiempo que ha trabajado la aeronave $i \in I$.

C_i : Coste de utilización de la aeronave $i \in I$ por cada periodo de tiempo que esté trabajando.

P_i : Coste fijo por selección de la aeronave $i \in I$.

BPR_i : Rendimiento de la aeronave $i \in I$ en condiciones de plena eficiencia.

Parámetros relacionados con el incendio

SP_t : Perímetro del incendio en el periodo de tiempo $t \in T$.

NVC_t : Incremento del coste del incendio en el periodo de tiempo $t \in T$ (consecuencia de las hectáreas de terreno afectadas por el fuego).

EF_t : Eficiencia de las aeronaves en el periodo de tiempo $t \in T$ (proporción de rendimiento). Este parámetro será dependiente de las condiciones meteorológicas.

$nMin_t$: Número mínimo de aeronaves trabajando en el incendio en el periodo de tiempo $t \in T$.

$nMax$: Número máximo de aeronaves trabajando en el incendio en un mismo periodo de tiempo.

Parámetros relacionados con la normativa de aviación

FP : Número máximo de periodos de tiempo volando sin descansos.

RP: Número de periodos de tiempo de descanso entre vuelos.

DFP: Número máximo de periodos de tiempo de trabajo en una jornada.

FBRP: Número de periodos de tiempo de viaje entre el punto de descanso y el incendio, y viceversa.

Además, por conveniencia, definiremos ciertos parámetros que son función de algunos de los ya introducidos.

Otros parámetros

PR_{it} : Rendimiento de la aeronave $i \in I$ en el periodo $t \in T$,

$$\forall i \in I, t \in T, \quad PR_{it} := BPR_i \cdot EF_t$$

PER_t : Incremento del perímetro del incendio en el periodo $t \in T$,

$$\forall t \in T, \quad PER_t := \begin{cases} SP_t & \text{si } t = 1 \\ SP_t - SP_{t-1} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

l_i : Número de periodos de tiempo que le lleva llegar al incendio a la aeronave $i \in I$,

$$\forall i \in I, \quad l_i := A_i + \left\lfloor \frac{A_i + CFP_i}{FP} \right\rfloor \cdot (RP + 2 \cdot FBRP) - CRP_i$$

M' : Término de penalización por el incumplimiento del número mínimo de aeronaves.

M : Término suficientemente grande que contribuye a establecer, en cada instante, si el incendio está o no contenido. Basta tomar:

$$M := \max_{t \in T} SP_t + \sum_{i \in I, t \in T} PR_{it}$$

Variables

En este caso diferenciaremos entre las variables de decisión propias del problema y aquellas auxiliares que definiremos por conveniencia.

Variables del problema

s_{it} : variable binaria que toma el valor 1 cuando el recurso $i \in I$ es seleccionado para trabajar sobre el incendio en el periodo $t \in T$.

fl_{it} : variable binaria que toma el valor 1 cuando el recurso $i \in I$ vuela (sin trabajar sobre el incendio) en el periodo $t \in T$.

r_{it} : variable binaria que toma el valor 1 cuando el recurso $i \in I$ descansa en el periodo $t \in T$.

er_{it} : variable binaria que toma el valor 1 cuando el recurso $i \in I$ termina un descanso en el periodo $t \in T$.

e_{it} : variable binaria que toma el valor 1 cuando el recurso $i \in I$ termina su trabajo en el incendio en el periodo $t \in T$.

y_t : variable binaria que toma el valor 1 si el incendio no está contenido en el periodo $t \in \{0\} \cup T$. Se toma $y_0 = 1$.

μ_t : variable continua que contabiliza el número de recursos faltantes para llegar al mínimo en el periodo $t \in T$.

Variables auxiliares

u_{it} : variable binaria que toma el valor 1 cuando el recurso $i \in I$ se encuentra seleccionado en el periodo $t \in T$,

$$\forall i \in I, t \in T, \quad u_{it} := \sum_{j \in \{1, \dots, t\}} s_{ij} - \sum_{j \in \{1, \dots, t-1\}} e_{ij}$$

w_{it} : variable binaria que toma el valor 1 cuando el recurso $i \in I$ se encuentra trabajando en el periodo $t \in T$,

$$\forall i \in I, t \in T, \quad w_{it} := u_{it} - r_{it} - fl_{it}$$

z_i : variable binaria que toma el valor 1 cuando el recurso $i \in I$ es seleccionado para trabajar en el incendio en algun periodo de tiempo,

$$\forall i \in I, \quad z_i := \sum_{t \in T} e_{it}$$

Modelo

La formulación matemática siguiente modela la función objetivo y las limitaciones que se imponen para identificar la asignación óptima en el problema de la selección de recursos para la contención de un incendio forestal.

Función objetivo

$$\text{mín} \quad \sum_{i \in I, t \in T} C_i \cdot u_{it} + \sum_{i \in I} P_i \cdot z_i + \sum_{t \in T} NVC_t \cdot y_{t-1} + \sum_{t \in T} M' \cdot \mu_t \quad (1)$$

La función objetivo (1) minimiza la suma de los costes involucrados en la extinción del incendio forestal. El primer término indica el coste variable por utilizar los recursos seleccionados, el segundo, el coste fijo asociado a la utilización de cada uno de ellos y el tercero será el producido por las hectáreas de terreno quemado. El último término se incluye para penalizar el incumplimiento en el número mínimo de aeronaves.

Restricciones sobre la contención del incendio

$$\sum_{t \in T} PER_t \cdot y_{t-1} \leq \sum_{i \in I, t \in T} PR_{it} \cdot w_{it} \quad (2)$$

$$\forall t \in T, \quad M \cdot y_t \geq SP_t \cdot y_{t-1} - \sum_{i \in I, j \in \{1..t\}} PR_{ij} \cdot w_{ij} \quad (3)$$

La restricción (2) nos indica que en algún periodo el perímetro construido (esto es, sofocado o contenido) por los recursos tiene que cubrir todo el perímetro afectado por del incendio. (3) aporta coherencia con el hecho de si el incendio está contenido o no en cada periodo.

Restricciones sobre el comienzo y fin de la actividad

$$\forall i \in I, t \in T, \quad \sum_{j \in \{1, \dots, t\}} s_{ij} - \sum_{k \in \{1, \dots, t-l_i\}} s_{ik} - r_{it} \leq fl_{it} \quad (4)$$

$$\forall i \in I, \quad \begin{cases} s_{i1} + \sum_{t \in \{2, \dots, m\}} (m+1) \cdot s_{it} \leq m \cdot z_i & \text{si } A_i = 0 \\ \sum_{t \in T} s_{it} \leq z_i & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

$$\forall i \in I, t \in T, \quad \sum_{\substack{j \in \{t-FBRP+1, \dots, t\}: \\ t-FBRP+1 \geq 1 \text{ y } t-FBRP+1 \leq t}} fl_{ij} \geq FBRP \cdot e_{it} \quad (6)$$

Las restricciones (4) y (5) fuerzan a que las condiciones de intervención de las aeronaves en el incendio sean coherentes. Por un lado, (4) establece que si una aeronave es seleccionada para combatir el incendio, lógicamente deberá de volar hasta él. Por otra parte, (5) obliga a que si una aeronave ya está trabajando sobre el incendio ($A_i = 0$) en el momento de planificar una nueva selección, en caso de que se decida que esa aeronave continúe, ha de ser seleccionada desde el principio del periodo de tiempo considerado.

Por otro lado, la desigualdad (6) establece que tras la finalización del trabajo de una aeronave esta deberá de tener tiempo suficiente para volar de vuelta a una base.

Restricciones sobre los periodos de descanso

Para facilitar la formulación de este conjunto de restricciones, definimos unas nuevas variables auxiliares, cr_{it} , que constituyen un contador del número de periodos de tiempo volados sin descanso de cada aeronave en cada periodo. Además aquí se diferencian dos situaciones, pues en caso de que la aeronave no se elija en el instante inicial, y haya realizado un periodo de vuelo inferior a FP periodos, ha de ejecutar un descanso antes de ser seleccionada. De este modo, una aeronave que haya realizado un vuelo de menos de FP periodos, y no sea seleccionada en el instante inicial, ha de realizar un descanso completo de RP periodos antes de entrar a trabajar en el incendio. Sin embargo, si esta misma situación se produjese con una aeronave que ya ha realizado su periodo de descanso, no ha de esperar los RP periodos de tiempo antes de partir.

$$\forall i \in I, t \in T,$$

$$cr_{it} := \begin{cases} \begin{cases} \sum_{j \in \{1, \dots, t\}} (t + 1 - j + CFP_i - CRP_i) \cdot s_{ij} \\ - \sum_{j \in \{1, \dots, t\}} (t - j) \cdot e_{ij} - \sum_{j \in \{1, \dots, t\}} r_{ij} \\ - \sum_{j \in \{1, \dots, t\}} FP \cdot er_{ij} \end{cases} & \begin{array}{l} \text{si } CFP_i = 0 \\ \text{o } CFP_i \geq FP \end{array} \\ \begin{cases} (t + CFP_i - CRP_i) \cdot s_{i1} + \sum_{j \in \{2, \dots, t\}} (FP + t + 1 - j) \cdot s_{ij} \\ - \sum_{j \in \{1, \dots, t\}} (t - j) \cdot e_{ij} - \sum_{j \in \{1, \dots, t\}} r_{ij} \\ - \sum_{j \in \{1, \dots, t\}} FP \cdot er_{ij} \end{cases} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Mediante el uso de estas nuevas variables, definimos las siguientes restricciones relativas a las condiciones de los periodos de descanso que ha de realizar una aeronave.

$$\forall i \in I, t \in T, \quad FP \geq cr_{it} \quad (7)$$

$$\forall i \in I, t \in T, \quad 0 \leq cr_{it} \quad (8)$$

$$\forall i \in I, t \in T,$$

$$\begin{cases} \sum_{j \in \{t-RP+1, \dots, t\}} r_{ij} \geq RP \cdot er_{it} & \text{si } t - RP \geq 0 \\ \sum_{j \in \{1, \dots, t\}} r_{ij} \geq (RP - CRP_i) \cdot er_{it} & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (9)$$

$$\forall i \in I, t \in T,$$

$$\begin{cases} r_{it} \leq \sum_{j \in \{t, \dots, t+RP\}} er_{ij} & \text{si } t + RP \leq m \\ r_{it} \leq 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (10)$$

$\forall i \in I, t \in T,$

$$\left\{ \begin{array}{l} (-1 - FBRP - (t - 1)) \cdot r_{it} + \sum_{j \in \{1, \dots, t + FBRP\}} (r_{ij} + fl_{ij}) \geq 0 \quad \text{si } t \leq FBRP \\ (-1 - FBRP - (m - t)) \cdot r_{it} + \sum_{j \in \{t - FBRP, \dots, m\}} (r_{ij} + fl_{ij}) \geq 0 \quad \begin{array}{l} \text{si } t > FBRP \\ \text{y } t \geq m - FBRP \end{array} \\ (-1 - 2 \cdot FBRP) \cdot r_{it} + \sum_{j \in \{t - FBRP, \dots, t + FBRP\}} (r_{ij} + fl_{ij}) \geq 0 \quad \text{en otro caso} \end{array} \right. \quad (11)$$

Las restricciones (7), (8), (9), (10) y (11) deben de considerarse conjuntamente. Todas ellas se establecen para forzar a las aeronaves a realizar los correspondientes descansos durante los tiempos establecidos.

Las dos primeras, (7) y (8), obligan a realizar descansos una vez que las aeronaves llegan al máximo tiempo de vuelo permitido sin descansos. La restricción (9), determina que después de los periodos de descanso obligatorios por normativa, la aeronave ya puede volver a trabajar sobre el incendio. La restricción (10) establece que cuando una aeronave realiza un descanso debe terminarlo. Por último, la restricción (11) acompaña los tiempos de vuelo entre el incendio y las bases donde se realizan los descansos con la realización de dichos descansos.

Restricciones sobre el tiempo de vuelo de las aeronaves

$$\forall i \in I, \sum_{t \in T} u_{it} \leq DFP - CTFP_i \quad (12)$$

La restricción (12) establece que el tiempo de vuelo diario de una aeronave no puede ser superior al tiempo establecido por la normativa. Por tanto, también se ha de contemplar el tiempo que lleva trabajando la aeronave antes de haber sido seleccionada.

Restricciones sobre el número de aeronaves

$$\forall t \in T, \sum_{i \in I} w_{it} \geq nMin_t \cdot y_{t-1} - \mu_t \quad (13)$$

$$\forall t \in T, \sum_{i \in I} w_{it} \leq nMax \cdot y_{t-1} \quad (14)$$

Las restricciones (13) y (14) determinan que no se podrá incumplir el número mínimo y máximo de aeronaves, respectivamente, mientras el incendio no esté contenido. Con respecto a la restricción (13), hemos de resaltar que puede ocurrir que no exista ninguna aeronave situada en el incendio en el instante inicial, y por tanto, el incendio estará desatendido durante un cierto tiempo. Este hecho inevitable ha de ser contemplado en el planteamiento del modelo. Por ese motivo, se incorpora al modelo la variable μ_t , que tomará el valor necesario para que se ajuste al número mínimo de aeronaves en el incendio en caso de que no se pueda alcanzar efectivamente.

Restricciones lógicas finales

$$\forall i \in I, \sum_{t \in T} t \cdot e_{it} \geq \sum_{t \in T} t \cdot s_{it} \quad (15)$$

$$\forall i \in I, \sum_{t \in T} w_{it} \geq z_i \quad (16)$$

$$\forall i \in I, t \in T, r_{it} + fl_{it} \leq u_{it} \quad (17)$$

Por último, el siguiente conjunto de restricciones establece las últimas condiciones lógicas que deben de satisfacer las variables. De este modo, (15) establece que el periodo en el que es seleccionado un recurso para comenzar a combatir el incendio ha de ser anterior al periodo de finalización

de su trabajo; (16) especifica que toda aeronave seleccionada para trabajar ha de contribuir efectivamente a la contención del incendio, y (17) establece que los periodos de descanso y de vuelo también son considerados como periodos de uso de las aeronaves.

4. UN ALGORITMO HEURÍSTICO

Con el fin de reducir los tiempos de obtención de la solución exacta del modelo, se diseñó un algoritmo heurístico que, además de otorgar mayor control en la toma de decisiones, nos permite controlar el tiempo de obtención de decisiones factibles.

La principal idea del algoritmo reside en descomponer el problema de decisión de partida en dos subproblemas, también de variables enteras: un denominado problema 1, cuya finalidad es seleccionar los recursos que deben trabajar en el incendio para conseguir la extinción del mismo, y un problema 2, que permite planificar el momento en el que las aeronaves deben de entrar a combatir el incendio, de forma que se maximice su rendimiento y a la vez se cumpla la normativa de aviación relativa a periodos de descanso y tiempos máximos de vuelo.

Problema 1: selección de recursos	
Función objetivo:	Minimizar costes
Restricciones:	Contención del incendio
	Fin de la actividad
	Tiempo de vuelo de las aeronaves
	Número de aeronaves

Tabla 1: Modelo para la selección de los recursos aéreos y contención del incendio.

Problema 2: planificación horaria de recursos	
Función objetivo:	Maximizar rendimiento
Restricciones:	Tiempo de vuelo de las aeronaves
	Comienzo de la actividad
	Periodos de descanso
	Número de aeronaves
	No repetición de soluciones

Tabla 2: Modelo para la planificación horaria de los recursos aéreos.

Las Tablas 1 y 2 muestran los elementos más importantes que aparecen en los dos problemas que fundamentan nuestro algoritmo. Es importante mencionar la retroalimentación existente en ambos problemas, tal y como se muestra en la Figura 1 que representa el diagrama de flujo del algoritmo. El problema 1 necesita conocer el momento en el que las posibles aeronaves entrarán en el incendio (denotado por $S1[i, t]$ en el diagrama) en caso de ser seleccionadas, y conocer también su futuro programa horario de trabajo ($Work[i, t]$) hasta que se le indique abandonar el

incendio. Esto es necesario para poder seleccionar un conjunto de aeronaves (I_select) capaces de contener el incendio en un periodo de tiempo (m_select), de tal forma que se minimicen los costes de la operación de contención. A su vez, el problema 2 hará uso de la selección de las aeronaves (I_select) y el periodo estimado de contención del incendio (m_select) para realizar la planificación horaria de los recursos aéreos ($S1[i, t]$ y $Work[i, t]$), maximizando el rendimiento de las aeronaves seleccionadas en los periodos indicados.

Otro elemento importante en la ejecución del algoritmo es la factibilidad de las soluciones ($fact$), que se establece en función del cumplimiento o no de la restricción relativa al número máximo de aeronaves permitido en el incendio. De este modo, la factibilidad necesita controlar el número de aeronaves que excede la cota máxima de aeronaves en el incendio en cada periodo (considerando factible una solución cuando $fact=0$).

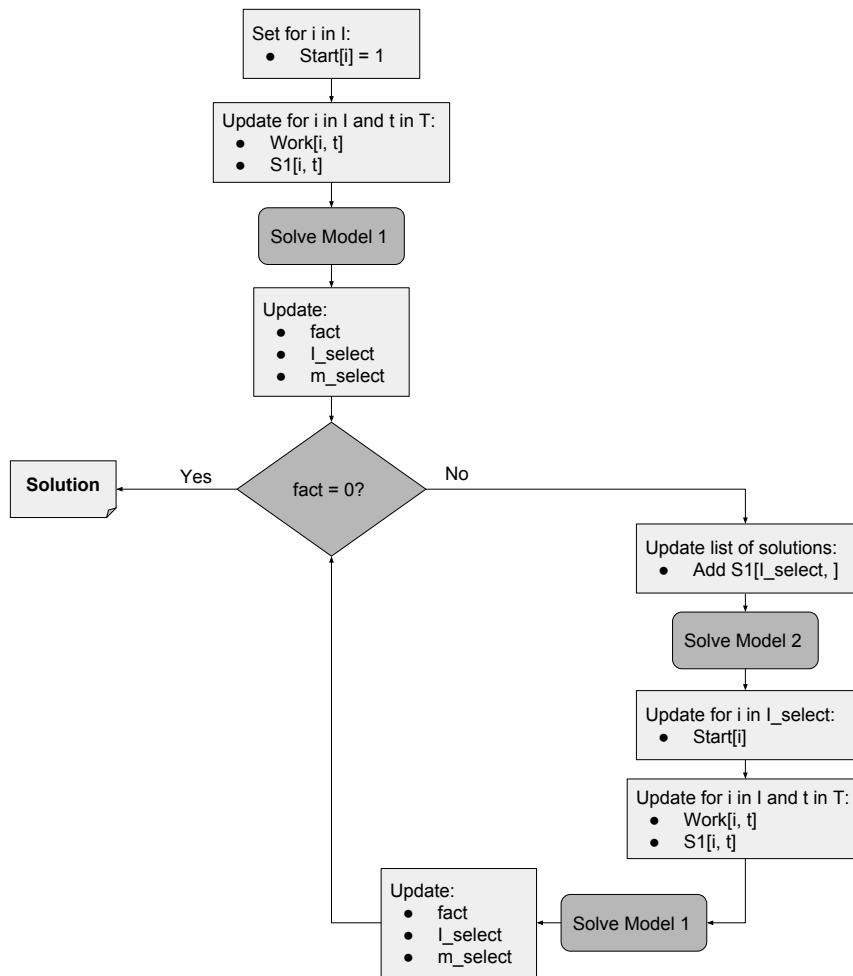


Figura 1: Diagrama de flujo del heurístico.

5. INTERFAZ

Con el fin de facilitar la ejecución de las dos propuestas (solución exacta del modelo y del heurístico) se ha creado una interfaz con el software R mediante el uso de la librería `shinydashboard`.

La interfaz permite una sencilla interacción a la hora de cargar la información de las aeronaves así como de la evolución del incendio y de la normativa española de aviación. Además ofrece la opción de ejecutar los modelos con distintos solvers (*gurobi*, *lpSolve* y *Rsymphony*, estos dos últimos de licencia libre). Una vez realizada la ejecución, se muestra una visualización de los resultados

tanto gráfica (mediante gráficos interactivos) como en forma de tablas y se permite la creación de informes para guardar la información de la instancia ejecutada en un archivo en formato html.

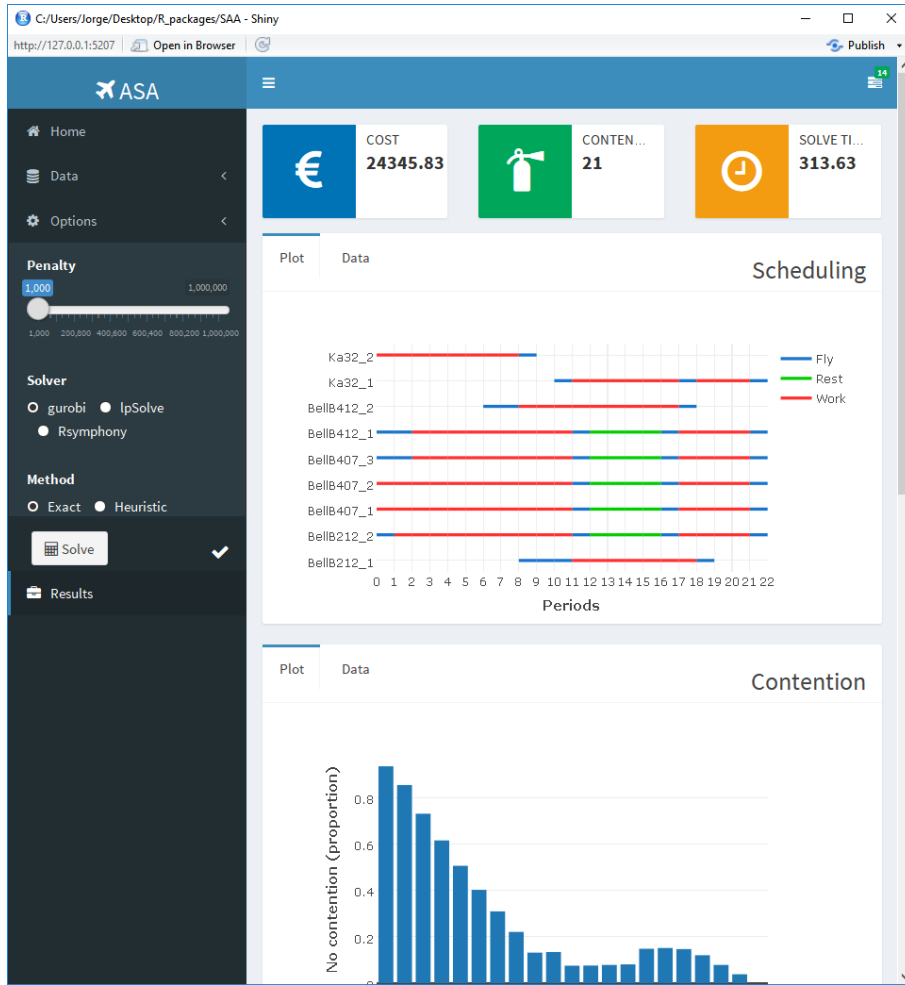


Figura 2: Datos de las aeronaves.

En la Figura 2 se muestra el resultado de resolver una instancia en la que se dispone de 9 aeronaves y se conoce la evolución del incendio durante 25 periodos de tiempo, siendo cada uno de ellos de 10 minutos, con lo que tenemos la evolución del incendio en los 250 minutos posteriores. Se tiene en cuenta además, la normativa regulada por la Circular Operacional 16-B (1995). Como vemos, se obtiene que el incendio se contendrá en el periodo 21 (a los 210 minutos) con un coste de operación de 24.345,83 €. La ventana *scheduling* nos muestra para cada aeronave seleccionada su planificación horaria que incluye los tiempos de trabajo, de vuelo y de descanso. Observamos, en particular, que en ningún periodo de tiempo el incendio queda desatendido. El tiempo que duró la ejecución fue de 314 segundos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta investigación agradecen las propuestas y comentarios realizados por A. Lorenzo y J. L. Sáiz-Díaz, de *Babcock International Group*, por M. Febrero-Bande, W. González-Manteiga y B. Pateiro-López, de la USC, y el apoyo financiero recibido desde el Ministerio de Economía y Competitividad de España a través de los proyectos MTM2014-53395-C3-2-P y MTM2016-76969-P, y desde ITMATI, a través del proyecto Enjambre.

REFERENCIAS

- [1] Arno, S. F. and Allison-Bunnell, S. (2002) *Flames in our forest: disaster or renewal?* Island Press, Washington, DC.
- [2] Butry, D. T., Mercer, D. E., Prestemon, J. P., Pye, J. M., and Holmes, T. P. (2001) What is the price of catastrophic wildfire? *Journal of Forestry* 99, 9-17.
- [3] Bilbao-Marón, M. N. (2013) *Advanced Meta-Heuristic Approaches and their Application to Operational Optimization in Forest Wildfire Management*. Doctoral Thesis, Universidad de Alcalá, Spain.
- [4] Camia, A., San-Miguel-Ayanz, J., Oehler, F., Santos De Oliveira, S., Durrant Houston, T., Kucera, J., Boca, R., Whitmore, C., Giovando, C., Amatulli, G., Libertà, G., Schmuck, G., Schulte, E., and Bucki, M. (2009) *Forest Fires in Europe 2008*. EUR 23971 EN. Luxembourg (Luxembourg): OPOCE; 2009. JRC53463.
- [5] Circular Operacional 16-B (1995) Ministerio Español de Fomento. Available online at: http://www.aecaweb.com/informes/documentos/INFORMES_Y_ESTUDIOS/anexo1aco16b.pdf. Last accessed March 6, 2017.
- [6] Costafreda-Aumedes, S., Cardil, A., Molina, D. M., Daniel, S. N., Mavsar, R., and Vega-García, C. (2015) Analysis of factors influencing deployment of fire suppression resources in Spain using artificial neural networks. *iForest-Biogeosciences and Forestry* 9, 138-145.
- [7] Donovan, G. and Rideout, D. (2003a) A reformulation of the Cost Plus Net Value Change (C + NVC) model of wildfire. *Forest Science* 49, 318-323.
- [8] Donovan, G. and Rideout, D. (2003b) An integer programming model to optimize resource allocation for wildfire containment. *Forest Science* 49, 331-335.
- [9] Drozdowski, M. (1996) Real-time scheduling of linear speedup parallel machines. *Information Processing Letters* 57, 35-40.
- [10] Gorte, J. K. and Gorte, R. W. (1979) *Application of Economic Techniques to Fire Management-A status Review and Evaluation*. USDA Forest Service General Technical Report INT-53.
- [11] Gurobi Optimizer (2017). Available online at: <http://www.gurobi.com/>. Last accessed March 6, 2017.
- [12] Headley, R. (1916) *Fire Suppression, District 5*. United States Department of Agriculture, Forest Service, Washington, 57 p.
- [13] Hu, X. and Ntaimo, L. (2009) Integrated simulation and optimization for wildfire containment. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 19, 1-29.
- [14] Kali, A. (2016) Stochastic scheduling of single forest fire-fighting processor. *Canadian Journal of Forest Research* 46, 370-375.
- [15] Kim, Y.-H. and Bettinger, P. (2005) Spatial optimization of fuel management activities. In: Bevers, M., Barrett, T.M. (Eds.), *Systems Analysis in Forest Resources: Proceedings of the 2003 Symposium*. General Technical Report PNW-656, USDA Forest Service, Portland, OR, pp. 205-214.
- [16] Lee, W. J. (2006) *A Stochastic Mixed Integer Programming Approach to Wildfire Management Systems*. Doctoral thesis. Department of Industrial and Systems Engineering. Texas A&M University.
- [17] Martell, D. L. (2015) A review of recent forest and wildland fire management decision support systems research. *Current Forestry Reports* 1, 128-137.
- [18] Martínez, J., Vega-García, G., and Chuvieco, E. (2009) Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management* 90, 1241-1252.
- [19] Mavsar, R., González-Cabán, A., and Varela, E. (2013) The state of development of fire management decision support systems in America and Europe. *Forest Policy and Economics* 29, 45-55.
- [20] Pappis, C. P. and Rachaniotis, N. P. (2010a) Scheduling in a multi-processor environment with deteriorating job processing times and decreasing values: the case of forest fires. *Journal of Heuristics* 16, 617-632.
- [21] Pappis, C. P. and Rachaniotis, N. P. (2010b) Scheduling a single fire fighting resource with deteriorating fire suppression times and set-up times. *Operations Research: An International Journal* 10, 27-42.
- [22] Rachaniotis, N. P. and Pappis, C. P. (2011) Minimizing the total weighted tardiness in wildfire suppression. *Operations Research: An International Journal* 11, 113-120.

- [23] Sparhawk, W. N. (1925) The use of liability ratings in planning forest fire protection. *Journal of Agricultural Research* 30, 693-792.
- [24] The R Project for Statistical Computing (2017). Available online at: <https://www.r-project.org/>. Last accessed March 6, 2017.
- [25] Winston, W. L. (1994) *Operations Research Applications and Algorithms*. Duxbury Press, Belmont, California.
- [26] Young-Hwan, K., Bettinger, P., and Finney, M. (2009) Spatial optimization of the pattern of fuel management activities and subsequent effects on simulated wildfires. *European Journal of Operational Research* 197, 253-265.