

# Construcción de curvas de demanda de recursos contra incendios forestales mediante la aplicación de una herramienta de simulación

Esteban Castellano Jiménez<sup>1</sup>, Miguel Ángel Crespo Agúndez<sup>1</sup> e Isabel Nogales Ruiz<sup>1</sup>

## Resumen

El número de recursos con que cuenta un sistema de defensa contra incendios forestales y su localización espacial, influyen en el tiempo de respuesta ante una emergencia.

La modelización permite simular el comportamiento de un sistema real bajo una serie de condiciones que establece el programador, con el fin de conocer con precisión el funcionamiento del mismo y realizar las actuaciones necesarias para introducir variables que afecten a su comportamiento.

En el caso de estudio, el programa informático de simulación de sistemas discretos GPSS — General Purpose Simulation System— se emplea como una herramienta eficaz para la construcción de un modelo que simule la respuesta de un sistema de defensa contra incendios ante una emergencia.

El programa diseñado permite variar el número y la localización de los medios de defensa, retornando en cada caso el tiempo promedio que transcurre desde que se produce la alerta hasta que los equipos encargados de atenderla llegan a su punto de origen.

La iteración de simulaciones haciendo variar el número y ubicación de los recursos da como resultado una curva de demanda, que establece la relación entre los recursos de que dispone el sistema —equipos de defensa contra incendios— y el tiempo que transcurre hasta que los medios llegan al origen de la emergencia para solventarla.

La curva resultante puede ser empleada en análisis para la toma de decisiones sobre recursos contra incendios forestales.

## Introducción y objetivos

La eficacia de un sistema de defensa frente a incendios forestales se sustenta en primer lugar, una vez superadas las actuaciones de prevención, en una organización que permita reducir los tiempos de respuesta de los servicios de extinción desde el momento en el que se recibe el aviso del suceso hasta que aquéllos llegan al punto donde se les requiere.

En estos intervalos de respuesta influye la ubicación de las bases de servicios de extinción y la capacidad de los viales que los comunican con cada uno de los puntos de su zona de actuación.

Además, siempre existe la posibilidad de que otro foco surja en el momento en que un equipo se encuentra trabajando en un lugar determinado. Esto significa que la probabilidad de que surja otra emergencia al mismo tiempo, así como el tiempo de

---

<sup>1</sup> Dirección de Asuntos Medioambientales. Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A., C/Julián Camarillo, 6B, 28037 MADRID (SPAIN).

intervención en cada suceso también son otras variables a tener en cuenta a la hora de contabilizar el tiempo que se tarda en acudir a una emergencia.

Mediante una herramienta de simulación se pretende modelizar el funcionamiento de un sistema de parques contra incendios forestales en una zona y hallar una curva de demanda de recursos que presente la variación del tiempo medio de acceso a un aviso de incendio en función del número de bases de extinción que existen en una zona de actuación.

## Material y métodos

### ***La simulación***

Existen numerosas herramientas con grados de utilidad diversos que pueden servir para resolver problemas en los que intervienen procesos que requieren consumos de tiempo y recursos, tales como métodos empíricos o numéricos (Fatemi-Ghomi&Ashjari, 2002). En el caso de sistemas multi-recursos como pueden ser los despliegues de defensa ante incendios forestales, la complejidad que alcanzan obliga a usar otro tipo de herramienta como es la simulación. En concreto, la simulación de sistemas discretos es la que se muestra más ajustada a la estructura y necesidades de un servicio contra-incendios forestales.

Las técnicas de simulación son métodos flexibles, capaces de modelizar el comportamiento dinámico de los sistemas, permitiendo tener en cuenta la enorme cantidad de variables dignas de entrar a formar parte del sistema del servicio (Montini y otros, 1999): municipios, planes, medios utilizados, tiempos de respuesta, tiempos de actuación, distribución de siniestros, etc. Además permite realizar iteraciones, modificando datos de partida hasta encontrar soluciones óptimas.

En este caso la simulación de sistemas discretos se realizará mediante el lenguaje GPSS —General Purpose Simulation System— (Minuteman Software, 2004). Este lenguaje permite programar un modelo que funcione de forma análoga a un despliegue real. Al irle incorporando mayor número de variables, se consigue una mejor aproximación al funcionamiento del sistema real. La utilización de un lenguaje orientado a

### ***El modelo de simulación***

El lenguaje GPSS está basado en la teoría de colas con el que se pretende ver cómo se comporta un sistema de parques de bomberos coordinados a los que se les da avisos cada cierto tiempo desde lugares diferentes.

El modelo de GPSS tiene, en general, una estructura dividida en dos partes, una primera en la que son definidas las funciones y variables necesarias, y una segunda parte que constituye el modelo *per se*. En esta segunda parte, se enumeran de forma secuencial las tareas —bloques— que han de realizar las emergencias —transacciones—.

El objetivo del estudio ha sido construir una curva que presente el tiempo medio de atención a una emergencia en función del número de parques que configuran el sistema. Para ello se han diseñado diez modelos: En cada uno de ellos se ha hecho variar el número de parques disponibles, desde el primero, en el que sólo existiría un

parque cubriendo toda la zona de actuación, aumentando sucesivamente de uno en uno hasta el último modelo, donde diez parques se reparten las emergencias que surgen en la zona de actuación.

### **Datos de entrada del modelo**

Los datos de entrada requeridos para las simulaciones que se han llevado a cabo son los siguientes:

**Número de parques de bomberos disponibles:** Se parte de una situación inicial en la que un solo parque atiende la totalidad de los incendios de la zona, incrementándose el número de parques de uno en uno hasta completar los diez parques considerados.

**Número de puntos a los que presta servicio el sistema:** Cada uno de los parques atenderá a una serie de puntos de la zona total que cubre el sistema. En cada modelo se definen qué puntos son atendidos por cada parque. El modelo se ha construido con un total de 62 puntos.

**Período de tiempo simulado:** Se ha simulado el funcionamiento del sistema durante 365 días. Es decir, se tienen en cuenta todos los incendios que puedan surgir durante un año.

**Tiempo entre llamadas de emergencia:** Es el dato de inicio del modelo y marca el intervalo de tiempo que transcurre entre una llamada y la siguiente en un hipotético centro de coordinación de emergencias del sistema. El estudio de algunos ejemplos de series de datos ha mostrado que este intervalo de tiempo suele seguir una distribución exponencial, y es así como se ha introducido un tiempo medio de 400 minutos.

**Frecuencia de llamadas de emergencia:** La probabilidad de que surja una emergencia en un punto determinado del ámbito de actuación dependerá de factores tales como distancia a carreteras, a núcleos de población, tipo de combustible, etc. Por tanto, cada zona tendrá una probabilidad diferente. Se ha introducido en el modelo una serie de frecuencias de emergencias aleatoria para simular el sistema. En un caso real esta probabilidad podría ser asimilada a la frecuencia de llamadas al centro de emergencias desde cada uno de los puntos.

**Tiempo de ida a la emergencia:** Una vez se produce un aviso de incendio en la base, el modelo requiere la introducción de un tiempo de desplazamiento del equipo al lugar del suceso. En este programa, se ha querido introducir para cada zona un tiempo medio y un intervalo de desviación de dicha media.

**Tiempo de intervención:** El tiempo de intervención es el tiempo que requieren los equipos para resolver una emergencia una vez han llegado al lugar en el que se ha producido. Por la experiencia con otros proyectos, este tiempo suele seguir una exponencial, a la que, en este caso se le ha puesto parámetro de 90 minutos.

**Tiempo de regreso:** Se define el tiempo de regreso como aquel empleado por los equipos en retornar desde el origen de la emergencia hasta su base una vez que han atendido la misma. Del análisis de datos reales se comprueba que este tiempo suele ser mayor que el tiempo de ida a la emergencia, de modo que, para este caso se ha estimado un coeficiente de 2,21 veces el tiempo de ida desde el parque al origen de la emergencia.

**Asignación del parque que atenderá a cada punto:** En el momento que en la

simulación se dispone de varios parques de bomberos prestando servicio a todo el ámbito de actuación, se preferirá evidentemente que cada uno de los 62 puntos sea atendido por una u otra base dependiendo del tiempo que deban invertir los equipos en desplazarse desde ésta hasta el lugar de la emergencia. Siguiendo este criterio en cada una de las diez simulaciones, el modelo asigna un parque determinado a cada punto de origen de emergencias para la atención de las llamadas que desde él se produzcan. De este modo, cuando surge una emergencia en un punto, ésta debe ser atendida por su parque asignado; en caso de que en ese momento se encuentre ocupado solventando otra alerta, la nueva emergencia esperará hasta que el parque quede libre. Se ha preferido utilizar este método porque se está analizando únicamente la variación en tiempos de desplazamiento a medida que varían los recursos.

### **Estructura del modelo**

Como ya se introdujo anteriormente, en el modelo construido en GPSS se definen dos tipos de elementos:

-Las transacciones. Son las unidades que se trasladan por el modelo; en este caso, los incendios, cuya aparición desencadena la puesta en funcionamiento del sistema para resolverlos.

-Los bloques. Son los elementos estáticos de un modelo. Existen dos tipos de bloques: los bloques de control, que no requieren la llegada de una transacción para ejecutar la acción que definen, y los bloques ejecutables, los cuales ejecutarán una acción determinada cuando entra en ellos una transacción.

De este modo, el esquema general se basa en una serie de bloques por los que las transacciones van pasando, hasta que son atendidas por los equipos de los parques y éstos terminan la actuación y puede darse por finalizada la incidencia. En este intervalo, diversos bloques contabilizan el consumo de tiempos de desplazamiento, intervención y regreso a las bases.

La estructura clásica de los modelos escritos con GPSS presenta una división del programa en dos secciones: la primera reúne los bloques de control utilizados por la simulación, mientras que la segunda sección —denominada modelo corriente— está compuesta por los bloques ejecutables a través de los cuales se moverán las transacciones.

En el caso objeto de estudio se ha optado por seguir dicha estructura clásica dado su uso generalizado y la claridad lograda al adoptarla.

### **Funcionamiento del modelo**

Como ya se ha indicado anteriormente, se ha procedido a la construcción de diez modelos distintos en GPSS, cada uno de los cuales simula el funcionamiento de un sistema de parques cuyo número se incrementa sucesivamente de uno en uno, desde el primero hasta el décimo. Los diez programas diseñados difieren evidentemente en sus datos de entrada y de salida, si bien, en esencia presentan idéntica estructura y funcionamiento.

El programa simula el conjunto de procedimientos reales que acontecen desde que una llamada de emergencia hace su entrada en el sistema a través del centro de coordinación hasta que el equipo de bomberos que la atiende regresa a su base, una vez finalizada la asistencia.

**Funcionamiento de los bloques de control.** El bloque de control plantea todas las funciones y contadores que van a ser necesarios para la parte corriente.

Contador de tiempo: Primeramente se ha creado un contador de tiempo que permite simular el número de unidades de tiempo real que convenga. Como unidad de tiempo para este modelo se ha elegido el minuto por ser la que ofrece una mayor operatividad dado el orden de magnitud de los valores implicados. El contador diseñado consta de un bloque *GENERATE* y un bloque *TERMINATE*, que combinados simulan un día real de funcionamiento del sistema.

Parámetro *RMULT*: Es un número que sirve de punto de inicio para generar los números aleatorios que requieren las funciones.

Función Origen: La función Origen se define mediante 62 pares de puntos — tantos como puntos a los que presta servicio el sistema—, relacionando la probabilidad de que se origine una llamada en un lugar con el código de ese lugar.

Funciones de media del tiempo de ida: Esta función recoge el tiempo medio que demoran los equipos en llegar desde cada parque a cada uno de los 62 puntos considerados, por lo tanto queda definida por 62 pares de puntos que relacionan el código del punto con el tiempo requerido para llegar desde el parque en cuestión. El número de funciones de media del tiempo de ida que presenta cada modelo es igual al número de parques de bomberos disponibles, por lo tanto varía entre uno y diez según la situación simulada.

Funciones de desviación del tiempo de ida: Se trata de una función de concepto similar a la anterior, con la diferencia de que en este caso se definen las desviaciones típicas de los tiempos de ida desde cada parque a cada punto de origen del incendio.

Variables de media del tiempo de ida: Se trata de una variable que toma el mismo valor numérico que su correspondiente función de media del tiempo de ida.

Variables de desviación del tiempo de ida: Se trata de una variable que toma el mismo valor numérico que su correspondiente función de desviación del tiempo de ida.

Variable de media del tiempo de regreso: Es el valor resultante de multiplicar 2,21 por la correspondiente variable de la media del tiempo de ida a la emergencia.

Variable de desviación del tiempo de regreso: Variable de concepto similar a la anterior pero referida a la variable de desviación del tiempo de ida a la emergencia.

Función de preferencia: Función que relaciona el código de cada uno de los 62 puntos con el nombre del parque que se ha asignado para atender las emergencias que se originen en el mismo. Por lo tanto las preferencias de atención se definen mediante una única función con 62 pares de puntos. Esta función varía en cada uno de los diez modelos, ya que según se vayan habilitando nuevos parques la preferencia de atención de los puntos cambiará con el fin de asignar a cada lugar el parque desde el que se tarde un menor tiempo en acudir al incendio.

**Flujo de transacciones: Circulación por el modelo corriente.** Se define como flujo de transacciones el camino que siguen éstas por el sistema, desde el momento en el que entran al modelo mediante un bloque *GENERATE* hasta que salen del mismo mediante un bloque *TERMINATE*. El programa se ha construido de forma que las transacciones sigan el recorrido por el modelo corriente que se muestra a continuación:

*GENERATE (Exponential(1,0,400))*: La acción que pone en funcionamiento el mecanismo del sistema es la llegada de un aviso de incendio —transacción— al centro de coordinación, una vez recibida la llamada se iniciará el proceso con el que se responde a la petición de asistencia. En este análisis se ha establecido que el bloque *GENERATE* genera una llamada de emergencia cada 400 minutos con distribución exponencial.

*ASSIGN 1,Fn\$Origen*: Cuando las transacciones son creadas por el bloque *GENERATE* son todas “iguales”, esto es, no presentan ninguna característica o parámetro que diferencie a unas de otras. Este bloque asigna a las transacciones parámetros o características útiles para la simulación. El origen de la llamada es considerado una característica que por su importancia debe ser almacenado como un parámetro de la transacción. Esta característica es fundamental para designar qué parque se encarga de atenderla, y por lo tanto cuánto tiempo se tarda desde dicho parque al origen de la emergencia. Este bloque *ASSIGN* almacena en el parámetro 1 de la transacción el código del punto del cual procede la llamada.

*ASSIGN 2,Fn\$Pref*: Este bloque *ASSIGN* almacena en el parámetro 2 de la transacción el nombre del parque designado para atender el incendio.

*QUEUE Llegada*: El objetivo de la simulación es conocer el tiempo promedio que tarda el sistema en desplazar un equipo al origen de la emergencia desde el momento en que se produce la llamada de aviso. El programa GPSS registra ese tiempo con la definición de las instrucciones *QUEUE* y *DEPART*. Cuando una transacción pasa por el bloque *QUEUE* comienza la medición del tiempo; este “cronómetro” no se detiene hasta que la transacción entra en el bloque *DEPART*, registrando su medición en la memoria interna del programa para su posterior tratamiento estadístico.

*SEIZE \*2*: Conocido el parque designado para atender el aviso —se recuerda que su nombre está almacenado en el parámetro 2 de la transacción— pueden darse dos situaciones: que el parque asignado esté libre debido a que no se encuentre atendiendo otra emergencia, con lo que pasará automáticamente a estar ocupado en solventar la transacción en curso; o bien, que el parque esté ocupado, por lo que la transacción actual permanecerá esperando en este bloque hasta que el equipo del parque finalice la asistencia que esté prestando y quede liberado.

*TRANSFER ,\*2*: La transacción es transferida al bloque etiquetado con el nombre del parque almacenado en el parámetro 2.

*ADVANCE (Tiempo de ida)*: Simula el tiempo que transcurre desde que los equipos salen de su base hasta que llegan al lugar de la emergencia.

*DEPART Llegada*: Cuando la transacción entra en este bloque se detiene el “cronómetro” puesto en marcha mediante el bloque *QUEUE*, el tiempo que marque el “cronómetro” se guarda en el programa para su posterior tratamiento estadístico.

*ADVANCE (Tiempo de intervención)*: Una vez que el equipo de bomberos llega al origen de la emergencia comienza la intervención para solucionar el problema. El bloque *ADVANCE* simula el tiempo que requiere el equipo para prestar la asistencia. La distribución que se ha establecido para este bloque es una exponencial de parámetro 90.

*ADVANCE (Tiempo de regreso)*: Trascurrido el tiempo de intervención, la emergencia ya está solucionada, por lo cual el equipo que se encargó de ella regresará

a su base. Este bloque *ADVANCE* retiene la transacción durante el tiempo que necesitan los equipos para retornar a su base una vez solventada la emergencia.

*TRANSFER, Finalizacion*: La transacción es transferida al bloque etiquetado con el nombre “*Finalizacion*”, este bloque realizará los trámites necesarios para finalizar la asistencia y sacar la transacción del sistema.

*RELEASE \*2*: Una vez que el equipo de bomberos haya regresado a su base quedará liberado para poder atender la siguiente emergencia. El bloque *RELEASE* libera el parque especificado en el parámetro 2, dejándolo disponible para atender la próxima llamada de emergencia.

*TERMINATE*: Finalizado el proceso la asistencia se da por terminada. El bloque *TERMINATE* saca a la transacción del sistema.

## Resultados

La simulación de cada uno de los diez modelos ofrece un informe de resultados, de entre los que se extrae el tiempo promedio que las transacciones se encuentran en el bloque *QUEUE*, o lo que es lo mismo, el tiempo medio que los equipos de bomberos de cada modelo tardan en llegar a atender un incendio.

Ahora bien, debido a que el modelo se rige de forma aleatoria para generar transacciones, los resultados podrían salir diferentes en sucesivas simulaciones con sólo hacer variar el parámetro aleatorio. Parece necesario, pues, comprobar la validez de los resultados obtenidos, para verificar que lo que se obtiene es aceptable como aproximación al sistema real que imita (Barceló, 1996).

Por tanto, en este caso, para asegurar la validez de los resultados obtenidos, se ha de establecer si los diferentes tiempos obtenidos son debidos a la configuración del modelo o bien a las variaciones del aleatorio que sirve de semilla de nuevas simulaciones. Para ello, cada uno de los modelos generados se ha hecho pasar por tres simulaciones en las que únicamente se ha hecho variar el parámetro introducido en el bloque *RMULT*; es decir, se ha modificado el número a partir del cual se generan los números aleatorios que influyen en las funciones del programa. De este modo se han obtenido tres series de tiempos medios (*tabla 1*). Cada serie contiene diez valores, uno por cada modelo, que como ya se ha dicho se diferencian en el número de parques disponibles.

**Tabla 1**—Tiempo promedio (minutos) desde la base al lugar del incendio

Nº Parques	Simulación 1	Simulación 2	Simulación 3
1	180,605	169,490	197,824
2	59,329	68,845	65,774
3	37,780	41,223	40,825
4	31,463	31,010	33,076
5	28,776	29,009	29,325
6	26,286	25,286	25,594
7	24,684	23,581	25,291
8	21,296	22,203	23,282
9	20,457	20,598	21,651
10	19,998	18,865	21,034

A continuación, se ha llevado a cabo un análisis de varianzas, de modo que se pueda descartar que las diferencias entre los tres experimentos sean debidas al cambio del aleatorio, lo que supondría que el modelo presenta fallos en su formulación (tabla 2).

**Tabla 2**—Resultados del análisis de varianza para tres simulaciones

Variación	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	P-Valor
Entre simulaciones	2	39,9048	0,0148	0,9853
Dentro de las simulaciones	27	2491,02		
Total	29			

El análisis de varianzas confirma que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las tres simulaciones al 95% de nivel de confianza, puesto que el p-valor del test F es mayor que 0,05. Por tanto, se ha podido corroborar que los cambios en el factor generador de números aleatorios del modelo no supone cambios significativos en las medidas de los tiempos.

A continuación, para generar la curva de demanda de recursos se ha buscado, mediante una regresión, el modelo de distribución que mejor se ajuste a los datos obtenidos. Tras varias pruebas con diferentes distribuciones, se ha concluido que la que mejor explica los puntos obtenidos es un modelo geométrico o multiplicativo de fórmula tipo:

$$Y=aX^b$$

Donde a y b son parámetros, Y es el tiempo medio de acceso y X es el número de parques disponibles.

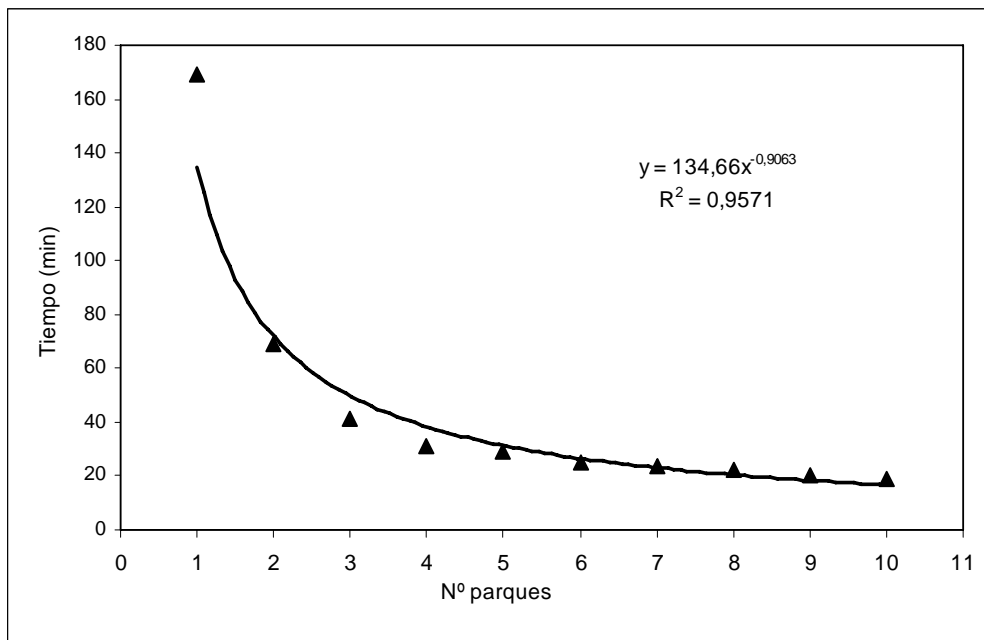
Una vez calculados para cada serie de datos los parámetros a y b, se ha evaluado la correlación entre los datos y el modelo (tabla 3).

**Tabla 2**—Resultados del análisis de varianza para tres simulaciones

Serie	Fórmula	Coefficiente R <sup>2</sup>
Simulación 1	$Y=129,28X^{-0,8840}$	R <sup>2</sup> =0,9283
Simulación 2	$Y=134,66X^{-0,9063}$	R <sup>2</sup> =0,9571
Simulación 3	$Y=141,82X^{-0,9094}$	R <sup>2</sup> =0,9291

A la vista de los datos, las tres series presentan un alto nivel de correlación, pero se decide elegir la segunda simulación, que es la que mejor coeficiente de correlación muestra (figura 1).





**Figura 1**—Curva de demanda de recursos

## Conclusiones

Los datos obtenidos muestran que, evidentemente, en el primer escenario, con únicamente un parque en funcionamiento, el tiempo medio de llegada al lugar del incendio es muy alto —unas cuatro horas—. Una vez se van incorporando sucesivamente nuevos parques, el tiempo baja de forma manifiesta, lo que se corresponde con la evidencia de que un aumento de la dotación de recursos —parques— permite minimizar el tiempo medio de acceso.

Una herramienta como la simulación permite obtener resultados útiles para construir una curva de demanda de recursos. Simplemente introduciendo datos reales obtenidos de sistemas en funcionamiento —series de datos de incendios, inventario de parques de una zona, etc.—en el lugar de los supuestos que se han introducido podría obtenerse una curva que sirva para planificar el número de recursos que deberían ubicarse en una zona de actuación con el fin de conseguir rebajar un tiempo medio de respuesta.

El informe ofrecido por la simulación permite, además, interpretar otros resultados. Por ejemplo, con los parámetros de entrada que se han supuesto en este caso, ninguno de los incendios que se hubieran producido habrían tenido que esperar a ser atendidos. Sin embargo, teniendo en cuenta que el tiempo medio obtenido en la curva no sólo depende de lo que se tarda en llegar físicamente desde la base al lugar del incendio, sino también de la frecuencia con que surgen avisos, esto implicaría que pudieran presentarse situaciones en las que se avisara de un incendio a una base que en ese momento estuviera atendiendo en otro lugar y el sistema esperara a que haya terminado éste para acudir. De darse esta situación, la interpretación de los resultados indicaría que habrían de ubicarse nuevos recursos o reubicar los ya existentes, sin más que ver qué nivel de ocupación tiene cada uno de los parques, con lo que pudiera haber algunos infrautilizados que podrían hacer mejorar el sistema con sólo cambiar de lugar.

Por último, el análisis que se ha llevado a cabo utiliza una modelización simplificada que impone ciertas limitaciones, pues se ha supuesto que sólo existe un equipo de intervención en cada base del sistema. Un modelo más complejo programado en GPSS permitiría ampliar las exigencias de un sistema tan cercano al sistema real como se necesitara, además de posibilitar la entrada de otras variables tales como ponderación de la gravedad de los sucesos y la consecuente necesidad de mayor número de equipos de varias ubicaciones.

## Referencias bibliográficas

- Barceló, Jaime. 1996. **Simulación de sistemas discretos**. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas 12. 1ª Ed. Madrid: ISDEFE; 247 p.
- Fatemi-Ghomi, S.M.T.; Ashjari, B. 2002. **A simulation model for multi-project resource allocation**. International Journal of Project Management 20 (2002): 127-130.
- Minuteman Software. 2004. **GPSS World Commercial Version 5.0.4**. [Programa informático]
- Montini, Pablo A.; Sotomayor, Nelson R.; Rocca, Horacio D. 1999. **Modelización de sistemas reales de naturaleza estocástica y discreta, mediante la utilización de un lenguaje orientado a la simulación**. Cátedra Modelos y Simulación, Facultad de Ingeniería, Universidad de FASTA.