



ARTÍCULO / ARTICLE

# APTITUD TERRITORIAL PARA ESTABLECER SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA PARA COMBATIR INCENDIOS FORESTALES

## LAND SUITABILITY FOR ESTABLISHING RAINWATER HARVESTING SYSTEMS FOR FIGHTING WILDFIRES

José María León Villalobos<sup>1</sup>, Manuel Anaya Garduño<sup>1</sup>, José Luis Oropeza Mota<sup>1</sup>, Enrique Ojeda Trejo<sup>1</sup>, Dante Arturo Rodríguez Trejo<sup>2</sup> y Jorge Luis García Rodríguez<sup>3</sup>

### RESUMEN

El control de incendios forestales con helicópteros es una práctica común en el Estado de México que está limitada por la disponibilidad de fuentes de agua para la recarga de las aeronaves. Los sistemas de captación del agua de lluvia (SCALL) se pueden usar para su abastecimiento. La identificación de sitios con aptitud para SCALL en zonas de alta incidencia de incendios es fundamental para mejorar la eficiencia del control aéreo; sin embargo, la selección de los lugares requiere integrar numerosas variables. En el presente estudio se efectuó un análisis de evaluación multicriterio mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) para identificar los sitios con aptitud para SCALL en el área de interés, para lo cual se eligieron cinco variables: velocidad de ráfaga de viento, distancia a los caminos, escurrimiento superficial, evaporación y densidad de incendios. Las variables fueron ponderadas con el apoyo del coordinador de vuelo de las aeronaves y se integraron en un mapa de aptitud por el método de combinación lineal ponderada en Arc Gis 9.2 y Arc View 3.2. Se detectaron de forma rápida y flexible dos sitios con aptitud para establecer SCALL en el área de estudio: uno al norte y otro al sur; y el mapa que los muestra se elaboró a una escala de 1 a 10.

**Palabras clave:** Evaluación multicriterio, control aéreo de incendios forestales, combinación lineal ponderada, densidad de incendios forestales, escurrimiento superficial, velocidad de ráfaga.

### ABSTRACT

Aerial fire fighting with a helicopter is a usual practice in Mexico State, the availability of water near to the wildfire area is crucial to refill the bucket and reduce the time between successive drops. Rain Water Harvesting system (RWH) can be used to supply water for the helicopter to combat wildfires. Identification of potential sites for RWH at places with high recurrence of wildfire is essential to improve the efficiency of the practice. However, selection of appropriate sites for RWH requires the integration of several variables. The identification of suitability sites for RWH was achieved using a multicriteria spatial analysis in a Geographical Information System (GIS) environment at the East of Mexico State, for three municipalities Chalco, Ixtapaluca and Tlalmanalco. Five variables were used to identify suitable sites for RWH: wind speed, wildfire density, distance to roads, runoff and evaporation. Each variable was ranked and weighted consulting the expert and a Weighted Linear Combination (WLC) was performed to generate the suitability map using Arc Gis 9.2 and Arc View 3.2. Suitability sites for RWH that met most of the criteria considered are found in North and South of the study area. The conclusion is that the identification of suitability sites to establish RWH system to supply water for the helicopter with the proposed method is a rapid and flexible tool. The output suitability map for the study area showed sites for RWH systems ranked from 1 to 10.

**Key words:** Multicriteria analysis, aero fire fighting, weighted linear combination, wildfire density, runoff, burst speed.

Fecha de recepción/date of receipt: 15 de mayo de 2012; Fecha de aceptación/date of acceptance: 18 de junio de 2013.

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Correo-e: jomalevi@yahoo.com.mx

<sup>2</sup> División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

<sup>3</sup> Subgerencia de Inventario y Monitoreo de Suelos Forestales. Comisión Nacional Forestal.

## INTRODUCCIÓN

Los efectos del cambio climático global en México y en otros países se ha manifestado en sequías más severas y duraderas, condiciones que incrementan la probabilidad de incendios y megaincendios forestales (Dury *et al.*, 2011; Semarnat-Conafor, 2011).

Los incendios forestales a nivel nacional y estatal varían en número y superficie afectada. Los años de mayor siniestralidad por estos eventos en la historia reciente de México han sido 1998 y 2011, con 849 632 y 956 405 ha afectadas, respectivamente (Semarnat, 2012); mientras que el promedio anual es de 10 521, que dañan a 292 701 ha (Rodríguez *et al.*, 2000).

El Estado de México ha sido la entidad federativa con más superficie incendiada, con 25 847 y 9 284 ha en los años antes citados, y por número de conflagraciones, con un total de 27 318 en el periodo de 1996 a 2011. La Promotora de Bosques del Estado de México (Probosque) identifica como zona de alto riesgo a la región del Izta-Popo y a los municipios: Chalco, Tlalmanalco e Ixtapaluca (Probosque, 2011).

En la entidad, la Comisión Nacional Forestal (Conafor) y Probosque utilizan el control aéreo para los incendios mayores de 5 ha o con acceso restringido, mediante dos helicópteros: un Augusta 119 tipo Koala (Probosque, 2007) y un Bell 205 o Bell 212, a los que se les adaptó una Bambi Bucket® (canastilla) y un helibalde para la recarga y transporte del agua. Un problema recurrente al usar estas aeronaves es la limitada disponibilidad de sitios para tomar el agua, lo que incide en el tiempo destinado a este fin y al correspondiente para el desplazamiento al lugar del incendio.

Los sistemas de captación del agua de lluvia (SCALL) son tecnologías para concentrar, almacenar y coleccionar el escurrimiento del agua de lluvia que se implementan a nivel local y regional (Burkhard *et al.*, 2000; De Winnaar *et al.*, 2007). Pueden proveer de este líquido para el abastecimiento oportuno de los helicópteros en el control de incendios forestales. El apoyo que brindan al control aéreo de incendios suele consistir en una ladera impermeabilizada como área de captación, un sistema de conducción y uno de almacenamiento con un depósito prefabricado (Anaya, 2011).

La localización de un SCALL en una región depende de múltiples factores y en numerosos estudios, los sistemas de información geográfica (SIG) han funcionado como una herramienta para ubicarlos. La mayoría de estos trabajos identifican los sitios con aptitud para SCALL por reglas de decisión y el conocimiento experto (Zeyad, 2001; Mbilinyi *et al.*, 2007).

Para seleccionar sitios con aptitud para las estructuras de almacenamiento de agua, Durga-Rao y Bhaumik (2003)

## INTRODUCTION

The effects of global climate change in Mexico and other countries has appeared in more severe and lasting drought, conditions that increase the likelihood of forest fires and megafires (Dury *et al.*, 2011; Semarnat-Conafor, 2011).

Wildfires, at a national and state level, vary in number and affected area. Years of higher claims by wildfires in Mexico's recent history were 1998 and 2011, with 849 632 and 956 405 ha burned, respectively (Semarnat, 2012) while the annual average is 10 521, affecting 292 701 ha (Rodríguez *et al.*, 2000).

The State of Mexico has been the hardest hit state, with 25 847 ha and 9 284 ha in the years above mentioned, and by number of fires, with a total of 27 318 from 1996 to 2011. Probosque, a pro-forest alliance in the State of Mexico, has identified as a high risk area, the Izta-Popo region and Chalco, Tlalmanalco and Ixtapaluca municipalities (Probosque, 2011).

In this state, the National Forestry Commission (Conafor) and Probosque use air control for fires over 5 ha or of restricted access with two helicopters: one 119 Aurbursta Koala type (Probosque, 2007) and a 205 Bell or 212 Bell, to which they adapted a Bambi Bucket® (cage) and a heli- bucket for recharging and transportation of water. A recurring problem in using these aircraft is the limited availability of sites to take water, which affects the time allocated for this purpose and intended for the journey to the fire.

The SCALL are technologies to concentrate, store and collect rainwater runoff that are implemented at local and regional level (Burkhard *et al.*, 2000; De Winnaar *et al.*, 2007). They can provide the liquid for the timely supply of helicopters in the control of forest fires. The support they provide to air fire control is usually a waterproof catchment slope as a driving system and one with a prefabricated storage tank (Anaya, 2011).

Locating a regional SCALL depends on multiple factors and in many studies, geographic information systems (GIS) have worked as a tool to locate them. Most of these studies identify the sites ability for SCALL by decision rules and expert knowledge (Zeyad, 2001; Mbilinyi *et al.*, 2007).

To determine suitable sites for water storage structures, Durga-Rao and Bhaumik (2003) used an expert space system and decision trees constructed based on technical guidelines and expert information with the following variables: land use, slope, runoff potential, proximity to roads, geology, soils and drainage. Isioye *et al.* (2012) identified the suitability of sites for SCALL in a GIS environment by using the weighted linear combination as a method of multicriteria assessment and the support of decision-makers to integrate the variables

utilizaron un sistema espacial experto y árboles de decisión construidos con base en directrices técnicas e información de expertos, con las siguientes variables: uso del suelo, pendiente, escurrimiento potencial, proximidad a caminos, geología, suelos y drenaje. Isioye *et al.* (2012) identificaron la aptitud de sitios para SCALL en un ambiente SIG a partir de la combinación lineal ponderada como método de evaluación multicriterio y el apoyo de tomadores de decisiones, a fin de integrar las variables de precipitación, pendiente, suelo, drenaje y uso del suelo. Con el propósito de ubicar los mejores sitios para estructuras de captación del agua de lluvia, Al-Adamat *et al.* (2010) aplicaron, mediante un SIG, la combinación lineal ponderada y la clasificación booleana a las variables de precipitación pluvial, pendiente, distancia a caminos, porcentaje de arcillas y distancia a centros urbanos.

Como el uso de aeronaves es una práctica común en el control de incendios forestales en el Estado de México es conveniente identificar lugares con aptitud para SCALL que permitan la recarga de agua de las mismas. En ese contexto, en el presente estudio se determinan sitios en tres municipios del oriente del estado; para lo cual se usó la combinación lineal ponderada como método multicriterio en un ambiente SIG y el conocimiento experto del coordinador de vuelo del helicóptero para seleccionar y priorizar las variables que definen la aptitud de los sitios.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El área de interés se localiza al oriente del Estado de México, en las estribaciones de la Sierra Nevada y comprende los municipios Chalco, Tlalmanalco e Ixtapaluca (Figura 1); cuenta con una superficie de 70 668.09 ha.

En el lugar, el intervalo altitudinal es de 2 500 a 5 200 m de oeste a este y del punto más alto al más bajo, la temperatura media anual varía entre 9 °C y 18 °C; la precipitación media anual es de 377 a 771 mm. Los suelos en las áreas de planicie y lomeríos son Feozems, Luvisoles, Gleysols, Regosols y Solonchacks; en las partes más altas corresponden a Litosols, Cambisols y Andosols. La vegetación es bosque de oyamel y zacatonales subalpinos, en las partes altas, así como bosques de pino, encino, matorrales y pastizales. Los cultivos de temporal son maíz, trigo, haba, frijol y frutales y los de riego, hortalizas. El suelo urbano se distribuye hacia el oeste de Chalco e Ixtapaluca (SMAGEM, 2010a; SMAGEM, 2010b; SMAGEM, 2010c).

### Selección de variables

Las variables más importantes para la recarga eficiente de agua por el helicóptero y la funcionalidad del SCALL (Cuadro 1) se seleccionaron de acuerdo con Dai-Ré (2003); Ramakrishnan

of precipitation, slope, soil, drainage and land use. In order to find the best sites for rain water harvesting structures, Al-Adamat *et al.* (2010) applied through a GIS, the weighted linear combination classification and Boolean classification to the variables of rainfall, slope, distance to roads, percentage of clay and distance to urban centers.

As the use of aircrafts is a regular practice in the control of forest fires in the State of Mexico it is reasonable to identify sites with SCALL ability that allow their recharge of water, for which spatial aspects are considered as well as the expertise of the personnel operating these airplanes.

The aim of this study was to determine the suitable sites to establish SCALL in three eastern municipalities of the State of Mexico to support airborne forest fire control. For this purpose the weighted linear combination as multicriteria method was used in a GIS environment and the expert knowledge of helicopter flight coordinator to select and prioritize the variables that determine the suitability of the sites.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

The study area is located at the east of the State of Mexico, in the foothills of the Sierra Nevada and includes Chalco, Ixtapaluca and Tlalmanalco municipalities (Figure 1) and is displayed over 70 668.09 ha.

On this site, the altitudinal range is 2 500 - 5 200 m from west to east and from the highest to the lowest point, the average temperature varies between 9 °C and 18 °C and the mean annual precipitation from 377 to 771 mm. The soils in the plains and low hills are phaeozem, luvisols, gleysols, regosols and solonchacks and, in the highest parts are lithosols, cambisols and andosols. The vegetation is subalpine fir forest and grasslands in the highlands and pine and oak forests, scrubs and grasslands. Rainfed crops are corn, wheat, bean, beans, and fruit and vegetables are irrigated. The urban land is distributed to the west of Chalco and Ixtapaluca (SMAGEM, 2010a; SMAGEM, 2010b; SMAGEM, 2010c).

### Selection of variables

The most important variables for the efficient water recharge by helicopter and the functionality of SCALL (Table 1) were selected according to Dai-Ré (2003), Ramakrishnan *et al.* (2009); Escamilla *et al.* (2010) and Weerasinghe *et al.* (2010) and interviews with helicopter flight coordinator For spatially process variables and develop maps, ArcView 3.2 and ArcGIS 9.2 was used.

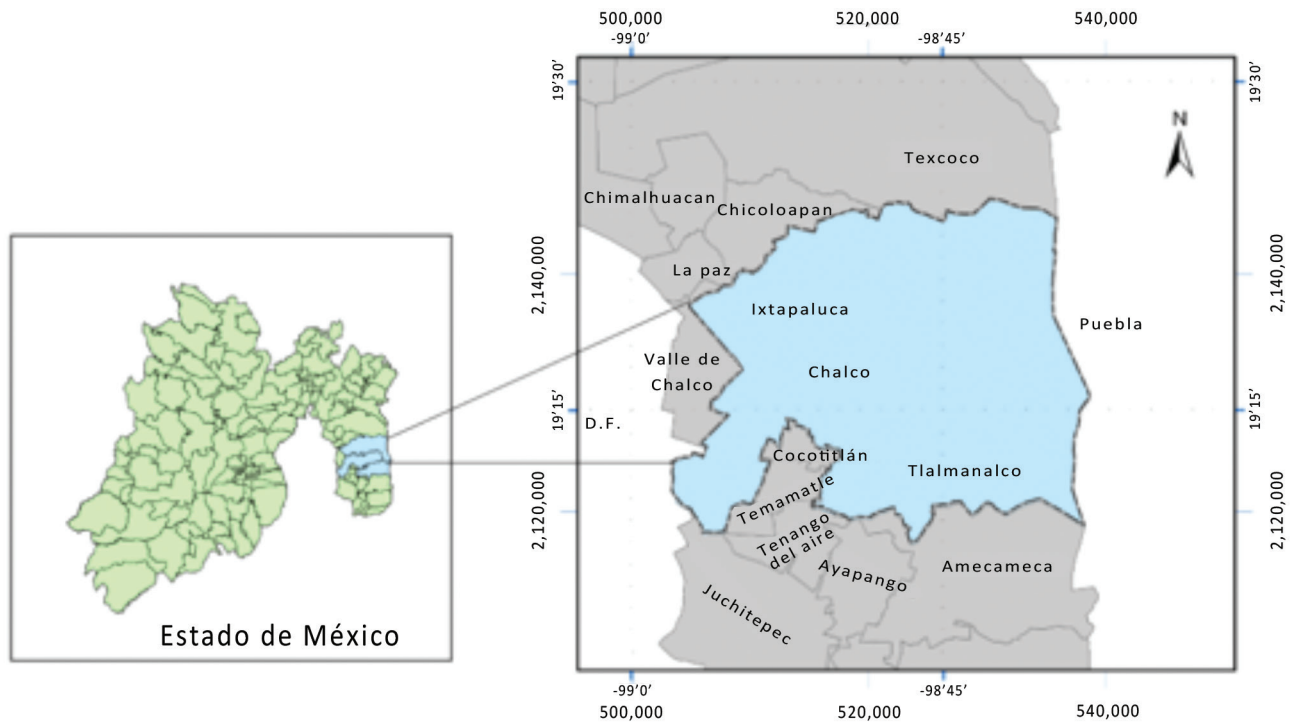


Figura 1. Localización del área de estudio.  
Figure 1. The study area.

*et al.* (2009); Escamilla *et al.* (2010) y Weerasinghe *et al.* (2010) y las entrevistas con el coordinador de vuelo. Para procesar espacialmente las variables y elaborar los mapas se utilizó ArcView 3.2 y ArcGis 9.2.

Las variables de visibilidad, temperatura del aire, pendiente y altitud fueron descartadas por las siguientes razones: a) la zona de estudio presentó solo 22 días con niebla fuera de la temporada de incendios; b) en el caso de la temperatura, se han realizado vuelos en condiciones menores de 0 °C sin contratiempo; c) las pendientes son mayores a 2 % en el área de estudio, lo que garantiza la correcta operación del SCALL; y d) el control aéreo de incendios se ha realizado con eficiencia en altitudes mayores a 4 000 m. Además, c y d fueron priorizadas con valores bajos por el experto.

Las variables se procesaron en el SIG de la manera siguiente:

a) Velocidad de ráfaga (máxima velocidad de viento): esta es una variable importante para la ubicación de los sitios con aptitud para SCALL; cuando las velocidades de ráfaga de viento son mayores a 50 km h<sup>-1</sup> son un factor de riesgo para la recarga de agua por el helicóptero.

The visibility, air temperature, slope and altitude variables were discarded for the following reasons: a) the study area provided just 22 days with fog outside the fire season; b) in the case of temperature, flights have been performed on lower conditions than 0 °C without setbacks; c) the slopes are greater than 2 % in the study area, ensuring the proper operation of SCALL and d) aerial fire control has been performed at higher altitudes 4 000 m efficiently. Furthermore, c and d were prioritized at low values by the expert.

The variables were processed by GIS as follows:

a) Burst speed (maximum wind speed): this is an important variable for the location suitable places for SCALL; when burst speeds are higher than 50 km h<sup>-1</sup> they are a risk factor for water recharge by helicopter.



Cuadro 1. Variables inicialmente seleccionadas para determinar la aptitud.

Variable	Fuente	Descripción y unidades
Velocidad de ráfaga (máxima velocidad de viento).	Estaciones Meteorológicas Automáticas (Emas) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).	Velocidad de ráfaga en km h <sup>-1</sup> en intervalos de 10 minutos, con registros de dos, tres y seis años.
Densidad de incendios (número de incendios).	Incendios forestales del periodo 2005 - 2010, Comisión Nacional Forestal (Conafor).	Datos vectoriales georreferenciados en unidades geográficas.
Cercanía a caminos (se digitalizaron).	Imágenes SPOT 5 (Système Pour l'Observation de la Terre).	Imágenes del año 2010.
Visibilidad (niebla)	Extractor Rápido de Información Climática (ERIC III), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).	Información tabular de 20 estaciones del área de estudio.
Temperatura del aire.	ERIC III del IMTA.	Registros de la temperatura diaria en grados centígrados para 21 estaciones meteorológicas.
Altitud	Subgerencia de Información Geográfica del Agua (SIGA) de la Conagua.	Modelo de Elevación Digital (DEM) de 25 m de píxel.

Table 1. Variables originally selected to determine suitability.

Variable	Source	Description and units
Burst speed (highest wind speed).	Automatic Meteorological Stations (EMAS, for its acronym in Spanish) of the National Water Commission (Conagua, for its acronym in Spanish) and of the National Meteorological Service (SMN, for its acronym in Spanish).	Burst speed in kmh <sup>-1</sup> at 10 minute intervals, with two, three and six year records.
Wildfire density (number of fires).	Forest fires of the 2005 - 2010 period National Forest Commission (Conafor).	Georeferred vector data in geographic units.
Distance to roads (they were digitalized).	SPOT 5 images (Système Pour l'Observation de la Terre).	Images of 2010.
Visibility (fog).	Fast Climatic Information Extractor (ERIC III, for its acronym in Spanish), Water Technology Mexican Institute (IMTA, for its acronym in Spanish).	Tabular information from 20 stations of the study area.
Air temperature.	ERIC III from IMTA.	Records of daily temperature in °C from 21 meteorological stations.
Altitude.	Water Geographic Information office (SIGA, for its acronym in Spanish) of Conagua.	Digital Elevation Model (DEM) of 25 m pixel.

El mapa se elaboró con las medias aritméticas de los registros de velocidad de ráfaga de ocho EMAS localizadas en el área de estudio para los meses de diciembre a julio. Las medias aritméticas se interpolaron con el método IDW (*Inverse Distance Weighting*, inverso de la distancia ponderada) en ArcGis 9.2. El tamaño del pixel utilizado fue de 30 x 30 metros con un factor de ponderación de 2 m, radio de búsqueda variable y un número de puntos de tres. El mapa se reclasificó de acuerdo con la escala de *Beaufort* que mide la intensidad de los vientos en kilómetros hora<sup>-1</sup> (Kinsman, 1969).

b) Densidad de incendios forestales: los SCALL deben estar próximos a las áreas con mayor concentración histórica de incendios forestales por razones de eficiencia operativa. Se generó un mapa de densidad de siniestros a partir de 456 registros para el periodo 2005 - 2010, mediante el módulo *point density* de ArcGis 9.2 (De la Riva *et al.*, 2004; Vilar del Hoyo, 2007).

c) Cercanía de caminos: la proximidad de los caminos al sitio del SCALL facilita su construcción y mantenimiento, así como el rápido acceso de las brigadas en tierra que asisten la aeronave. Los caminos se digitalizaron sobre imágenes SPOT 5 y se generaron intervalos con distancias verticales en metros con el módulo de distancia euclidiana en ArcGis 9.2.

d) Escurrimiento superficial: se calculó con el método de Número de Curva (NC), propuesto por el USDA *Soil Conservation Service* (SCS) (Dai-Ré, 2003) y con la expresión:

$$Q = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S} \quad (1)$$

Donde:

- Q = Escurrimiento superficial en mm
- P = Precipitación pluvial promedio anual ajustada a una función de distribución para un determinado periodo de retorno
- S = Relación complejo suelo - cubierta vegetal y es función de los NC

La precipitación pluvial se procesó de acuerdo con la metodología propuesta por Campos (1998) de la manera siguiente:

1) Se calculó la longitud de registro necesaria (número de años de registro) para que la media de los datos de precipitación pluvial variara solo en 10 % respecto de la media poblacional con un intervalo de confianza de 90 %.

The map was drawn with the arithmetic mean of burst speed records of eight EMAS (AWS, automated weather stations) located in the study area for the months of the fire season (December to July). The arithmetic means were interpolated with the IDW method (*Inverse Distance Weighting*) in ArcGIS 9.2. The pixel size used was 30 x 30 m with a weight of 2, variable radius search and a number of points from 3. The map was reclassified according to the *Beaufort* scale that measures the intensity of the winds in kilometers per hour<sup>-1</sup> (Kinsman, 1969).

b) Density of forest fires: the SCALL should be close to the areas of highest concentration of historic wildfires reasons for operational efficiency. A density map was generated fire from 456 fire records for the 2005-2010 period using the "point density" module of ArcGIS 9.2 (De la Riva *et al.*, 2004; Vilar del Hoyo, 2007).

c) Distance to roads: the proximity of the roads to the SCALL site favors their construction and maintenance as well as the quick access to ground crews attending the aircraft. The roads were digitized over SPOT 5 images and intervals were generated with vertical distance in meters by using the Euclidean distance module in ArcGis 9.2.

d) Surface runoff: it was calculated with the curve number (CN) method proposed by the USDA *Soil Conservation Service* (SCS) (Dai-Ré, 2003) and apply the following expression:

$$Q = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S} \quad (1)$$

Where:

- Q = Surface runoff in mm
- P = Average annual rain precipitation fixed to a distribution function for a specific return period
- S = Vegetation cover-soil complex relation and it is a function of the NC

Rain precipitation was processed according to the method proposed by Campos (1998) as follows:

1) The required record length (number of years of record) was calculated for the mean of the rainfall data vary by only 10 % from the population mean with a confidence interval of 90 %.

2) The coefficients of variation, skewness and asymmetry were estimated and used as criteria for selecting the distribution function Normal or Log - Normal that best fit the data, both functions are widely recommended for annual runoff (Riggs and Harrison, 1983).

3) To ensure supply of precipitation 90 % probability of a return period of 1.1 years was calculated.



2) Se estimaron los coeficientes de variación, oblicuidad y asimetría, los cuales se usaron como criterios para seleccionar la función de distribución Normal o Log - Normal que mejor ajustaba a los datos, ambas funciones son ampliamente recomendadas para los escurrimientos anuales (Riggs y Harrison, 1983).

3) Para garantizar una oferta de precipitación con probabilidad de 90 % se calculó un periodo de retorno de 1.1 año.

Se asignó un grupo hidrológico a cada unidad de suelo y un tipo de condición hidrológica por unidad de vegetación de acuerdo con los cuadros del *USDA SCS*; previamente se actualizó una cobertura de vegetación del año 2008 con imágenes SPOT 5 del 2010 y clasificación supervisada manual.

Las coberturas del grupo hidrológico y la condición hidrológica se sobrepusieron en el programa ArcView 3.2 y se les asignó un NC para una humedad antecedente tipo II. Esta última equivale a una precipitación pluvial de 12.7 a 38.1 mm ocurrida en los 5 días previos que se recomienda para el diseño en embalses pequeños (Ramakrishnan *et al.*, 2009).

El escurrimiento superficial se estimó en milímetros con la expresión arriba indicada y de manera distribuida con un valor de precipitación pluvial por pixel en el módulo de Map Calculator de ArcView 3.2. Para obtenerlo en metros cúbicos, se multiplicó por la superficie de cada celda (900 m<sup>2</sup>).

e) Evaporación: se usa para cuantificar las pérdidas que se presentan en el SCALL (Dai-Ré, 2003). Para su determinación se interpolaron los valores promedios anuales por el método de IDW en Arc Gis 9.2.

### Mapa de aptitud para SCALL

El mapa de aptitud para SCALL se integró por la combinación lineal ponderada como método multicriterio de los mapas de las variables de densidad de incendios, escurrimiento superficial, evaporación, velocidad de ráfaga y distancia a los caminos (Bojórquez - Tapia *et al.*, 2003).

Para favorecer un mapa continuo de fácil interpretación y aplicar la combinación lineal ponderada, los mapas de las variables descritas, previamente, fueron estandarizadas en cuatro clases.

El coordinador de vuelo de las aeronaves realizó la priorización de las variables según su orden de importancia; le asignó el número 1 a la variable de mayor interés, el valor 2 para la segunda y así sucesivamente de acuerdo a su conocimiento experto. Sobre las variables priorizadas se obtienen los pesos numéricos con el método de suma y recíproco con la siguiente fórmula (Semarnat - INE, 2006):

A hydrologic group was assigned to each unit and a type of soil hydrological condition to each vegetation unit according to USDA SCS tables; previously, vegetation coverage was updated in 2008 with SPOT 5 images of 2010 and supervised classification by hand.

The covers of the hydrological group and hydrological condition were overlapped on the ArcView 3.2 program and a NC was assigned for precedent moisture type II. The latter is equivalent to a rainfall of 12.7 to 38.1 mm that occurred in the last 5 previous days and is recommended for design in small reservoirs (Ramakrishnan *et al.*, 2009).

Surface runoff was calculated in millimeters with the expression shown above and in a distributed manner using a value of rainfall per pixel in the Map Calculator module of ArcView 3.2. To obtain the surface runoff in cubic meters it was multiplied by the area of each cell (900 m<sup>2</sup>).

e) Evaporation: it is used to quantify the losses that occur in the SCALL (Dai-Ré, 2003). To calculate them, the annual average values were interpolated by the IDW method in Arc Gis 9.2.

### Map of suitability for SCALL

The suitability map for SCALL was integrated by weighted linear combination as multicriteria method of the maps of the density fire, runoff, evaporation, burst speed and distance to roads variables (Bojórquez - Tapia *et al.*, 2003).

To promote a continuous map easy to interpret and apply the weighted linear combination maps the variables previously described were standardized into four classes.

The flight manager of the helicopter made a prioritization of the former variables, according to their importance from his expertise; thus, he assigned number 1 to the most interesting, 2 for the second and so on. Upon the prioritized variables the numerical weights are obtained by the reciprocal sum method by the following formula (Semarnat - INE, 2006):

$$W_j = \frac{n-r_j+1}{\sum(n-r_k+1)} \quad (2)$$

Where:

- $W_j$  = Normalized weight for the  $j - i^{\text{th}}$  attribute
- $n$  = Number of attributes to be considered
- $r$  = Position of the attribute in the list

$$W_j = \frac{n-rj+1}{\sum(n-rk+1)} \quad (2)$$

Donde:

$W_j$  = Peso normalizado para el  $j$  - iésimo atributo  
 $n$  = Número de atributos bajo consideración  
 $r$  = Posición del atributo en la lista ordenada

Las cinco variables y sus pesos numéricos respectivos: 0.33, 0.27, 0.20, 0.13 y 0.07 se integraron aplicando la fórmula de la combinación lineal ponderada:

$$\alpha_j^k = \sum_i^n W_{ij} X_{ij}^k \quad (3)$$

Donde:

$\alpha$  = Valor de aptitud de la alternativa  $k$ , para el problema  $j$   
 $W$  = Peso de importancia asignado para el atributo  $i$  por el problema  $j$   
 $X$  = Valor de la variable  $y$  que representa el atributo  $i$  del problema  $j$

El mapa de aptitud se estandarizó en una escala de 0 a 10; donde, 0 representa la mínima aptitud y 10, la máxima.

## RESULTADOS

Las variables de velocidad de ráfaga, distancia a caminos, escurrimiento superficial, evaporación y densidad de incendios fueron "espacializadas" en una superficie total del área de estudio de 70 668 ha y clasificadas en cuatro categorías; la clase 4 representa el estado deseable de la variable en todos los casos (Cuadro 2).

Para cada variable se observó lo siguiente:

a) Velocidad de ráfaga: las velocidades más intensas se registraron al noreste y las menores al suroeste del área. La clase 4 está presente en 48.39 % del área de estudio con velocidades de 29 a 38 km h<sup>-1</sup> y de 39 a 49 km h<sup>-1</sup> clasificadas como viento fresco y brisa fresca en la escala de *Beaufort*.

b) Distancia a caminos: la clase 4, distancias de 0 a 1 000 m, se obtuvo en poco más de 94 % de la superficie del área de estudio. Solo 0.64 % del territorio quedó comprendido con distancias mayores a 2 000 m.

The first five variables and their corresponding number weights (0.33, 0.27, 0.20, 0.13 and 0.07) were integrated by applying the weighted linear combination:

$$\alpha_j^k = \sum_i^n W_{ij} X_{ij}^k \quad (3)$$

Where:

$\alpha$  = Suitability value of the  $k$  option for the  $j$  problem  
 $W$  = Importance weight assigned to the  $i$  attribute for the  $j$  problem  
 $X$  = Value of the  $y$  variable that represents the  $i$  attribute of the  $j$  problem

The suitability map was standardized in a 0 to 10 scale, where 0 represents the minimal suitability and 10, the maximal.

## RESULTS

The variables of burst speed, distance to roads, runoff, evaporation and density of fires were spatialized in a total surface of the study area of 70 668 ha and classified into four categories; Class 4 is the desirable state of the variable in all cases (Table 2).

For each variable, the following was observed:

a) Burst speed: the strongest speeds were recorded towards the northeast and the lower to the southwest of the area. Class 4 is present in 48.39 % of the place of study at speeds of 29-38 km h<sup>-1</sup> and from 39 to 49 km h<sup>-1</sup> classified as fresh wind and fresh breeze on the *Beaufort* scale.

b) Distance to roads: Class 4, distances from 0 to 1 000 m, it was found in just over 94 % of the area of the study area. Only 0.64 % of the land was covered with distances greater than 2 000 m.

c) Surface runoff: higher volumes were detected south of Tlalmanalco and lower to the north, in Ixtapaluca. The four best class was 415-667 m<sup>3</sup>.

d) Evaporation: Average annual values were recorded between 1 080 and 1 968 mm. Class 4 and optimum was from 1 080 to 1 968 mm, which corresponds to 47.32 % of the surface. The greatest evaporations, 1 745 to 1 968 mm, were recorded in urban areas.

e) Density of fires: the estimated densities ranged from 0 to 3.3 fires km<sup>-2</sup>. As the optimal class, the 2.4 to 3.3 fires km<sup>-2</sup> was selected, which is found in 4.31 % of the territory.



c) Escurrimiento superficial: se identificaron los mayores volúmenes al sur del municipio Tlamanalco y los menores al norte, en el municipio Ixtapaluca. La clase cuatro y óptima fue de 415 a 667 m<sup>3</sup>.

d) Evaporación: se registraron valores promedios anuales entre 1 080 y 1 968 mm. La clase 4, y óptima, fue de 1 080 a 1 968 mm, que corresponde a 47.32 % de la superficie. Las mayores evaporaciones, 1 745 a 1 968 mm, se registraron en las zonas urbanas.

In Figure 2 are shown the maps obtained from the a) burst rate, b) a road distance, c) runoff, d) evaporation, e) fire density and f) numerical curves map. The weighted linear combination of a GIS allowed to establish support SCALLs to the aerial forest fire control (Figure 3). The major suitability was identified as northeastern of Ixtapaluca and south of Tlamanalco. In 0.12 % of these sites scored a top ten fitness value, 8.0 % with an aptitude of nine and 20.17 % with 8. The 30.49 % of the study area started with fitness of five (Table 3).

Cuadro 2. Clases, superficies y orden de las variables.

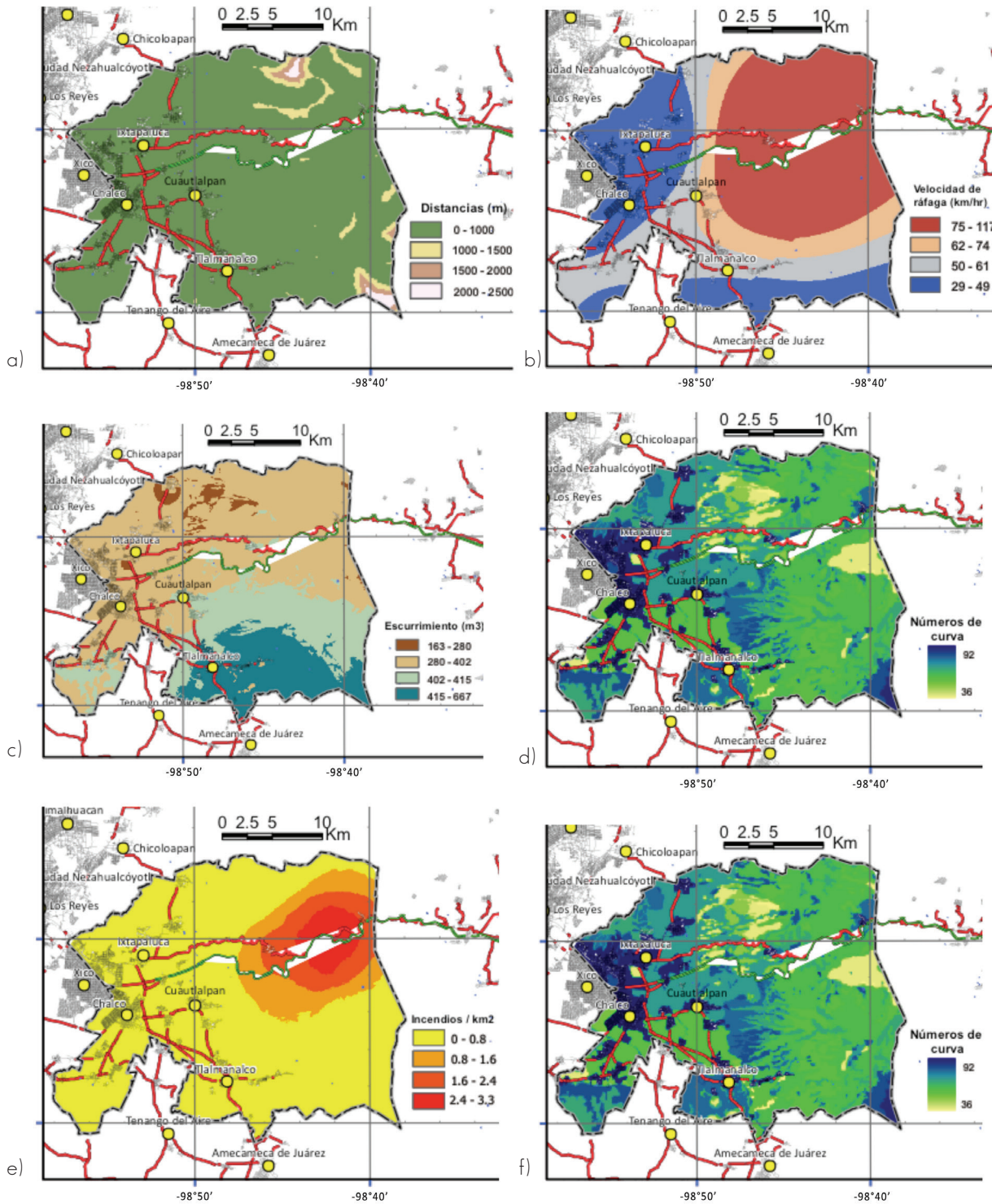
Table 2. Classes, surfaces and order of the variables.

Variable	Orden	Clases	Superficie ha	Ocupación en el territorio %
Velocidad de ráfaga (km h <sup>-1</sup> )	1	75 - 117	28 269.53	40.00
	2	62 - 74	8200.26	11.60
	3	50 - 61	13 832.61	19.57
	4	29 - 49	20 365.70	28.82
Distancia a caminos (m)	1	2 000 - 2 500	453.15	0.64
	2	1 500 - 2 000	786.96	1.11
	3	1 000 - 1 500	2 348.46	3.32
	4	0 - 1 000	67 078.62	94.92
Escurrimiento superficial (m <sup>3</sup> )	1	163 - 280	1 836.24	2.60
	2	280 - 402	41 958.08	59.45
	3	402 - 415	15 346.02	21.74
	4	415 - 667	11 432.91	16.20
Evaporación (mm)	1	1 745 - 1 968	13 390.56	18.95
	2	1 524 - 1 745	12 738.51	18.03
	3	1 302 - 1 524	11 103.03	15.71
	4	1 080 - 1 302	33 437.79	47.32
Densidad de incendios (incendios km <sup>2</sup> )	1	0 - 0.8	55 193.72	78.10
	2	0.8 - 1.6	6 949.52	9.83
	3	1.6 - 2.4	5 484.25	7.76
	4	2.4 - 3.3	3 043.71	4.31

Variable= Variable; Orden = Order; Clases = Classes; Superficie = Surface; Ocupación en el territorio = Land cover.

Velocidad de ráfaga = Burst speed; Distancia a caminos = Distance to roads; Escurrimiento superficial = Surface runoff; Evaporación = Evaporation; Densidad de fuego = Fire density.





Escala de aptitud = Suitability scale; Superficie = Surface; Representación en el territorio = Representation in the territory.

Figura 2. Mapas de las variables a) velocidad de ráfaga, b) distancia a caminos, c) escurrimiento superficial, d) evaporación, e) densidad de incendios y f) mapa de curvas numéricas.

Figure 2. Maps of a) burst rate, b) a road distance, c) runoff, d) evaporation, e) fire density and f) numerical curves map.

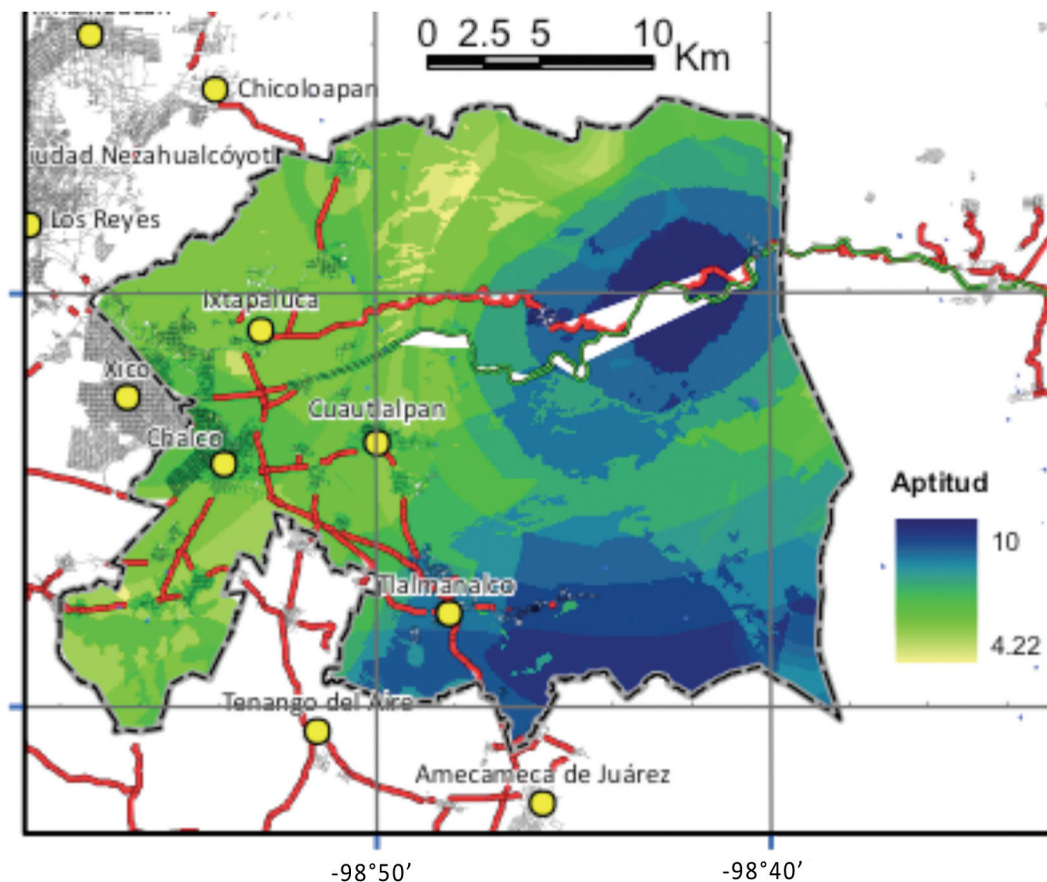


Figura 3. Mapa de aptitud para establecer SCALL de apoyo al control de incendios forestales.  
 Figure 3. Map of suitability to establish support SCALL for forest fire control.

e) Densidad de incendios: las densidades estimadas fueron de 0 a 3.3 incendios  $\text{km}^2$ . Como clase óptima se seleccionó la de 2.4 a 3.3 incendios  $\text{km}^2$ , misma que se encuentra en 4.31% del territorio.

En la Figura 2 se muestran los mapas obtenidos de las variables a) velocidad de ráfaga, b) distancia a caminos, c) escurrimiento superficial, d) evaporación, e) densidad de incendios, y f) mapa de curvas numéricas. La combinación lineal ponderada de ellas en un SIG hizo posible identificar en un mapa los sitios con aptitud para establecer SCALL de apoyo al control aéreo de incendios forestales (Figura 3). Se identificaron las mayores aptitudes al noreste del municipio Ixtapaluca y al sur de Tlalmanalco. En 0.12 % de estos sitios se verificó una aptitud máxima con valor de diez, 8.0 % con una aptitud de nueve y 20.17 % una aptitud de 8. Con cinco se ubicó 30.49 % del área de estudio (Cuadro 3).



## DISCUSSION

This investigation identified sites with suitability for SCALL to support air traffic control forest of wildfires by using the weighted linear combination as multicriteria method and the experience of experts to solve a complex problem.

Some research studies with a similar scheme simplify the suitability analysis to two variables: a) superficial runoff, by the numerical curves method (Gutpa *et al.*, 1997) and b) slopes (Mbilyini *et al.*, 2007). Some others increase the number of variables in terms of the superficial runoff and include the type of soil, vegetation and land use (Stuebe and Johnston, 2007).

In the analysis of the suitability of sites for SCALL the slope is of limited relevance, given the technology available today (waterproofed slopes) which ensures surface runoff with only 2 % slope (Anaya, 2011). Also, this can be tested *in situ* during the design of the SCALL. Instead, for Gutpa *et al.* (1997) the slope is crucial for SCALL of agricultural use by its direct influence on runoff.

Cuadro 3. Superficie de cada categoría de aptitud encontrada en el área de estudio.  
Table 3. Territory of each suitability category found in the study area.

Escala de aptitud	Superficie (ha)	Representación en el territorio (%)
4	939.51	1.33
5	21 512.43	30.49
6	13 579.11	19.24
7	14 383.71	20.39
8	14 229.45	20.17
9	5 829.93	8.26
10	85.86	0.12
Total	70 668	100%

Escala de aptitud = Suitability scale; Superficie = Surface; Representación en el territorio = Representation in the territory

## DISCUSIÓN

La presente investigación permitió identificar sitios con aptitud para SCALL de apoyo al control aéreo de incendios forestales mediante la combinación lineal ponderada como método multicriterio y la experiencia de los expertos para resolver un problema complejo.

Algunas investigaciones con un esquema similar simplifican el análisis de aptitud a dos variables: a) escurrimiento superficial, por el método de curvas numéricas (Gutpa *et al.*, 1997) y b) pendientes (Mbilinyi *et al.*, 2007). Otros esfuerzos amplían el número de variables en función del escurrimiento superficial e incluyen el tipo del suelo, la vegetación y los usos del suelo (Stuebe y Johnston, 2007).

En el análisis de la aptitud de sitios para SCALL la pendiente tiene una importancia limitada, dada la tecnología disponible, hoy día (laderas impermeabilizadas) que garantiza escurrimientos superficiales con apenas 2% de pendiente (Anaya, 2011). Asimismo, esta puede analizarse *in situ* y durante el diseño del SCALL. En cambio, para Gutpa *et al.* (1997) dicha es clave para SCALL de uso agrícola por su influencia directa sobre el escurrimiento.

La altitud también se descartó del análisis, principalmente, porque el control aéreo de incendios se ha realizado con eficiencia en condiciones mayores a 4 000 m. En la zona de estudio no se han registrado incendios que rebasen las 5 ha en altitudes superiores.

Una de las variables determinantes para la identificación de sitios con aptitud para SCALL por su variabilidad fue el escurrimiento superficial. Al sureste del área de interés se identificaron de 415 a 667 m<sup>3</sup> como resultado de números de curva altos (70, 73 y 86), suelos del tipo Regosol y

Altitude was also a variable that was discarded in the analysis mainly because air fire control has been performed with greater efficiency over 4 000 m. In the study area there have been no fires exceeding 5 ha at higher elevations.

One of the key variables for the identification of sites for their ability to SCALL variability was runoff. Southeast of the area of interest were identified from 415 to 667 m<sup>3</sup> as a result of high curve numbers (70, 73 and 86), regosol soil type and rainfall of 600 mm per year. Also the use of agricultural land, grassland or absence of vegetation with moderate permeability soils favored large runoff volumes. This was also observed by Sekar and Randhir (2007) in a similar study in which soil types and infiltration capacity directly affect these values. Instead, at the northeast of the study area were identified runoffs of 163 to 280 m<sup>3</sup> due to sheets of rain are smaller and have higher permeability soils such as feozem.

As for the distance to roads, all sites identified as optimal for SCALL were less than 1 000 m, *i. e.*, in class 4 (0-1 000 m), due to the extensive network of roads and existing roads in the three municipalities. In other proposals, mainly agricultural, the optimal distance to roads of SCALL was defined between 1 000 and 2 000 m (De Winnaar *et al.*, 2007). For this work the shortest distance was required for reasons of construction and fast access for the ground crew assisting aircraft access.

The multi-integration of five variables with a weighted linear combination identified sites with SCALL suitability to support air traffic control forest fires. In identifying them, the numerical weights assigned to each variable represents the significance that each has on the analysis (Isioye *et al.*, 2012). Furthermore, the

precipitaciones pluviales de 600 mm anuales. También el uso de suelo agrícola, los pastizales o la ausencia de vegetación con suelos de moderada permeabilidad favorecieron grandes volúmenes de escurrimiento. Lo anterior fue igualmente observado por Sekar y Randhir (2007) en un estudio similar, en el que los tipos de suelo y su capacidad de infiltración afectaron de manera directa dichos valores. En cambio, al noreste del área de estudio se identificaron escurrimientos de 163 a 280 m<sup>3</sup> debido a que las láminas de precipitación pluvial son más reducidas y que los suelos tienen mayor permeabilidad, como los Feozem.

En cuanto a la distancia a caminos, todos los sitios identificados como óptimos para SCALL estaban a menos de 1 000 m; es decir, en la clase 4 (0 a 1 000 m), debido a la amplia red de caminos y carreteras existentes en los tres municipios. En otras propuestas, sobre todo agrícolas, la distancia óptima del SCALL a los caminos se define entre 1 000 y 2 000 m (De Winnaar *et al.*, 2007). Para el presente trabajo se requería la menor distancia por razones de construcción y de acceso rápido para el equipo en tierra que asiste a la aeronave.

La integración multicriterio de las cinco variables con la combinación lineal ponderada identificó los sitios con aptitud para SCALL de apoyo al control aéreo de incendios forestales, en los cuales, los pesos numéricos asignados a cada variable representan la significancia que tienen de manera individual en el análisis (Isioye *et al.*, 2012). Asimismo, las clases definidas para cada variable son los niveles de estado favorable y de relevancia en una determinada fracción del territorio.

Las correspondientes a la densidad de incendios, escurrimiento superficial y evaporación obtuvieron los pesos numéricos más altos para definir los sitios con mayor aptitud al noreste y sur del área de estudio. Este comportamiento también fue observado por Weerasinghe *et al.* (2010) en un trabajo similar en el que los mayores pesos numéricos, así como las clases óptimas determinaron la identificación de sitios potenciales para construir SCALL.

El método multicriterio integró y maximizó los niveles óptimos de las variables para identificar la aptitud en prácticamente todos los casos (Semarnat - INE, 2006). Aunque, se identificaron algunos sitios en la zona norte del área de estudio con posibilidades altas para SCALL en clases no óptimas (clase 1: 75 - 117 kmh<sup>-1</sup>) de la variable velocidad de ráfaga. Lo anterior, se explica por el escaso número de Emas y de años de registro que miden las velocidades de ráfaga. En estudios de velocidad de viento, Simiu (1978) observó que las estaciones meteorológicas con registros menores a 10 años no cuentan con información suficiente para producir resultados satisfactorios.

Otros factores pueden considerarse en un análisis de aptitud para SCALL de apoyo al control de incendios forestales, tales como el interés de las comunidades aledañas al sitio del

clases definidas para cada variable son favorables a ciertos niveles de estado y relevantes en una cierta fracción del territorio.

The corresponding density of fire, runoff and evaporation had the highest numerical weights which defined the sites of greatest suitability at the northeast and south of the study area. This behavior was also observed by Weerasinghe *et al.* (2010) in a similar project, where the highest numerical optimal weights and classes of each variable determined the identification of potential sites for SCALL.

The multicriterion method integrated and maximized optimal levels of all the variables to identify suitability in virtually all cases (Semarnat - INE, 2006). However, some sites were found in the northern part of the study area with high possibilities for SCALL in non-optimal classes (class 1: 75 - 117 km h<sup>-1</sup>) of the burst speed variable. This is explained by the low number of years of EMAS and of registration years measuring burst speeds. In studies of wind speed, Simiu (1978) noted that the meteorological stations with records under 10 years do not have enough information to produce satisfactory results.

Other factors may be considered in an analysis of SCALL suitability to support forest fire control, such as the interest of the communities surrounding the project site, financing, environmental impact, the relief or the area of the basin, but they can be evaluated on the site selected to build the SCALL also considering soil conditions and the design of the structure (Sekar and Randhir, 2007; Ramakrishnan *et al.*, 2009).

## CONCLUSIONS

This research identified sites with SCALL suitability to establish air support forest fire management in three municipalities at the Eastern area of the State of Mexico after integrating variables that directly affect the recharge of water by helicopters; in addition, the functionality of SCALL through the weighted linear combination method and the operator's expertise of flying helicopters.

In this way and by applying the method described, the sites with good suitability for SCALL were detected in just over 28% of the northern zone of Ixtapaluca and southern Tlalmanalco. The best weighted variables and their optimal levels defined those sites, except for the case of burst rate where suboptimal classes of this variable are found in places with good suitability for SCALL, which could be due to the small number of EMAS and of registration years.



proyecto, financiamiento, impacto ambiental, el relieve o el área de la cuenca; sin embargo, estas pueden ser evaluadas sobre el sitio elegido para construir el SCALL y tomar en cuenta, además, las condiciones del terreno y el diseño de la estructura (Sekar y Randhir, 2007; Ramakrishnan *et al.*, 2009).

## CONCLUSIONES

La presente investigación identificó sitios con aptitud para establecer SCALL de apoyo al control aéreo de incendios forestales en tres municipios de la zona oriente del Estado de México, mediante la integración de variables que afectaban directamente la recarga de agua de los helicópteros; además de, la funcionalidad del SCALL a través del método de combinación lineal ponderada y el conocimiento experto del operador de vuelo de los helicópteros.

Se detectaron sitios con buenas aptitudes para SCALL en poco más de 28 % de la zona norte de Ixtapaluca y sur de Tlalmanalco. Las variables mejor ponderadas y sus niveles óptimos definieron dichos sitios, excepto para el caso de la velocidad de ráfaga en la que clases no óptimas se encontraron en algunos sitios con buena aptitud para SCALL, lo que pudo deberse al escaso número de Emas y de años de registro.

La aptitud identificada demuestra las capacidades de la combinación lineal ponderada y del conocimiento experto para identificar los sitios con potencial para SCALL de apoyo al control aéreo de incendios forestales de una forma flexible y a bajo costo, y proporciona un marco útil para la toma de decisiones en materia de incendios forestales.

Se recomienda que en futuras investigaciones se consideren como variables a los incendios con superficies impactadas mayores a 5 ha o los menos accesibles, ya que estos son los que requieren de las aeronaves; así como a las precipitaciones pluviales, en lugar de la tasa de escurrimiento superficial, que con los recursos tecnológicos disponibles (impermeabilización de laderas) se pueden controlar en favor del diseño del SCALL.

A lo anterior se tendrán que sumar elementos económicos y sociales que permitan decidir sobre el tipo de estructura (diseño) que sea más costeable y cause el menor impacto ambiental. 🌿

The identified suitability demonstrates the abilities of the weighted linear combination and of the expert knowledge to identify sites with potential for SCALL for support to aerial control of forest fires in a low cost flexible way; it also provides a useful framework for decision making on forest fires.

It is recommended that in future research are considered as variables, fire impacted areas over 5 ha or those in less accessible places, as in those is required the use of aircrafts, as well as rainfall rather than the rate of surface runoff, that with the available technological resources (waterproofing slopes) can be controlled for SCALL design.

To the latter must be added the economic and social elements that allow the decision about the kind of structure (design) that is more affordable and provokes the lightest environmental impact. 🌿

*End of the English version*



## REFERENCIAS

- Al-Adamat, R., A. Diabat and G. Shatnawi. 2010. Combining GIS with multicriteria decision making for siting water harvesting ponds in Northern Jordan. *Journal of Arid Environments* 11(74):1471-1477.
- Anaya G., M. 2011. Captación del agua de lluvia. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de Méx., México. 132 p.
- Bojórquez - Tapia, L. A., L. P. Bower, G. Castilleja, S. Sánchez-Colón, M. Hernández, W. Calvert, S. Díaz, P. Gómez-Priego, G. Alcantar, D. Melgarejo, M. Solares, L. Gutiérrez and M. Juárez. 2003. Mapping expert knowledge: redesigning the Monarch Butterfly Biosphere Reserve. *Conservation Biology* 17 (2): 367-379.
- Burkhard, R., A. Deletic and A. Craig. 2000. Techniques for water and wastewater management: a review of techniques and their integration in planning. *Urban Water* 2 (3):197-221.
- Campos A., D. F. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, SLP. México. 556 p.
- Dai-Ré T., R. 2003. Pequeños embalses de uso agrícola. Editorial Mundi Prens. Madrid, España. 385 p.
- De La Riva, J., F. Pérez-Cabello, N. Lana-Renault and N. Koutsias. 2004. Mapping wildfire occurrence at regional scale. *Remote Sensing of Environment* 92 (2):363-369.
- De Winnaar, G., G. P. W. Jewitt and M. Horan. 2007. A GIS-based approach for identifying potential runoff harvesting sites in the Thukela River basin, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 32(3):1058-1067.
- Durga-Rao, K. H. V. and M. K. Bhaumik. 2003. Spatial expert support system in selecting suitable sites for water harvesting structures. A case study of song watershed, Uttaranchal, India. *Geocarto International* 18(4):43-50.
- Dury, M., A. Hambuckers, P. Warnant, A. Henrot, E. Favre, M. Ouberdous and L. François. 2011. Responses of European forest ecosystems to 21<sup>st</sup> century climate: assessing changes in interannual variability and fire intensity. *Forest - Biogeo-sciences and Forestry* 4(1):82-99
- Escamilla, G., J. P. Pérez y L. Valenzuela P. 2010. La brigada de helitanque y los procedimientos de trabajo con helicópteros. Corporación Nacional Forestal. Santiago de Chile, Chile. 52 p.
- Gutpa, K., K., J. Deelstra and K. D. Sharma. 1997. Estimation of water harvesting potential for a semiarid area using GIS and remote sensing. [http://iahs.info/redbooks/a242/iahs\\_242\\_0053.pdf](http://iahs.info/redbooks/a242/iahs_242_0053.pdf) (22 de febrero de 2012).
- Isioye, O. A., M. W. Shebe, U. O. Momoh and C. N. Bako. 2012. A multicriteria decision support system (MSDD) for identifying rainwater harvesting site(s) in Zaria, Kaduna state, Nigeria. *International Journal of Science and Technology Education Research* 24(1):53-71.
- Kinsman, B. 1969. Historical notes on the original Beaufort scale. *Marine Observer* 39:116-124.
- Mbilinyi, B. P., S. D. Tumbo, H. F. Mahoo and F. O. Mkiramwinyi. 2007. GIS - based decision support system for identifying potential sites for rainwater harvesting. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 32(16):1074-1081.
- Promotora de Bosques del Estado de México (Probosque). 2007. Combatirán incendios por aire. Toluca, Estado de México. <http://portal2.edomex.gob.mx/edomex/inicio/index.htm> (20 de enero de 2012).
- Promotora de Bosques del Estado de México (Probosque). 2011. Probosque en alerta durante la temporada de estiaje. [http://www.forestalxxi.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=243:probosque-en-alerta-durante-la-temporada-de-estiaje&catid=76:probosque&Itemid=70](http://www.forestalxxi.com/index.php?option=com_content&view=article&id=243:probosque-en-alerta-durante-la-temporada-de-estiaje&catid=76:probosque&Itemid=70) (20 de enero de 2012).
- Ramakrishnan, D., A. Bandyopadhyay and K. Kusuma. 2009. SCS - CN and GIS - based approach for identifying potential water harvesting sites in the Kali Watershed, Mahi River Basin, India. *Journal of Earth System Science* 118 (4):355-368.
- Riggs, H. C. and C. H. Harrison. 1983. Storage analysis for water supply. Hydrological analysis and interpretation, techniques of water resources investigations of the U. S. Geological Survey. <http://pubs.usgs.gov/twri/twri4a1/pdf/twri4-Aa.pdf>. (11 de febrero de 2012).
- Rodríguez T., D. A., M. Rodríguez A. y F. Sánchez. F. 2000. Educación e incendios forestales. Mundi-Prensa. México, D.F. México. 201 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2012. Sistema Nacional de Información Forestal. Reportes semanales de resultados de incendios forestales. <http://www.cnf.gob.mx:8080/snif/portal/las-demas/reportes-de-incendios-forestales> (18 de enero de 2012).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). - Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2011. Evaluación complementaria del Programa E013 Prevención y Combate de incendios forestales. Ejercicios fiscales. [http://semarnat.gob.mx/programas/evaluaciones/evaluacione2011/Documents/complementarias/E013\\_CONAFOR\\_Informe\\_Final.pdf](http://semarnat.gob.mx/programas/evaluaciones/evaluacione2011/Documents/complementarias/E013_CONAFOR_Informe_Final.pdf) (25 de enero de 2012).
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) - Instituto Nacional de Ecología (INE). 2006. Manual del proceso de ordenamiento ecológico. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F. México. 335 p.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMAGEM). 2010a. Ordenamiento Ecológico del municipio de Chalco. Toluca, Edo. de Méx. México. 499 p.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMAGEM). 2010b. Ordenamiento Ecológico del municipio de Ixtapaluca. Toluca, Edo. de Méx. México. 375 p.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMAGEM). 2010c. Ordenamiento Ecológico del municipio de Tlalmanalco. Toluca, Edo. de Méx. México. 343 p.
- Sekar, I. and T. O. Randhir. 2007. Spatial assessment of conjunctive water harvesting potential in watershed systems. *Journal of Hydrology* 334 (2):39-52.
- Simiu, E. 1978. Wind effects on structures: an introduction to wind engineering. John Wiley and Sons, Co. New York, NY, USA. 589p.
- Stuebe, M. M. and D. M. Johnston. 2007. Runoff volume estimation using GIS techniques. *Journal of the American Water Resources Association* 26(4):611-620.
- Vilar del Hoyo, L., I. Nieto G., M. P. Martín I. y F. J. Martínez V. 2007. Análisis comparativo de diferentes métodos para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. [http://www.geogra.uah.es/firemap/pdf/VilardelHoyo\\_et\\_al\\_SPAIN.pdf](http://www.geogra.uah.es/firemap/pdf/VilardelHoyo_et_al_SPAIN.pdf) (20 de enero de 2012).
- Weerasinghe, H., U. Schneider and A. Löw. 2010. Water harvest and storage location optimization model using GIS and remote sensing. <http://balwois.com/balwois/administration/fullpaper/ffp-1653.pdf> (5 de febrero de 2012).
- Zeyad, M. 2001. Using remote sensing approach and surface landscape conditions for optimization of watershed management in Mediterranean regions. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 36(6):213-220.

