

ÁREAS DE RESPUESTA HOMOGÉNEA PARA EL MUESTREO DE COMBUSTIBLES FORESTALES

HOMOGENEOUS RESPONSE AREAS FOR FOREST FUEL SAMPLING

José Armando Velasco Herrera¹, José Germán Flores Garnica²,
Bertha Márquez Azúa³ y Sergio López¹

RESUMEN

Los combustibles forestales muertos son evaluados *in situ*; por tanto, se requieren sitios de muestreo ubicados, generalmente, de manera sistemática y con intensidad de muestreo entre 1 y 3% con respecto al área total. Aunque esto significa una gran inversión de recursos económicos, humanos y de tiempo, las precisiones obtenidas son bajas. Por ello, se propone una alternativa que identifica zonas con características similares, denominadas áreas de respuesta homogénea (ARH), las cuales sirven de fundamento para la estructuración de un diseño de muestreo estratificado con una tendencia a reducir la varianza dentro de cada ARH, a fin de aumentar la precisión de las estimaciones. En la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote, Chiapas, se definieron 19 ARH con base en diez tipos de vegetación: agricultura de temporal con cultivos anuales, bosque de encino, pastizal cultivado, pastizal inducido, sabana, selva alta y mediana perennifolia, selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea, selva alta y mediana subperennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea, selva baja caducifolia y selva baja subcaducifolia; además se consideraron tres intervalos de altitud: 180 - 633 m, 634 - 1 086 m y 1 087 - 1 540 m. Cada ARH estuvo conformada por varios polígonos. El ARH con mayor extensión correspondió a la condición de selva alta y mediana perennifolia localizada entre los 634 y 1 086 m, y ocupó 38 808 ha; mientras que la menor perteneció a una condición de sabana entre 180 y 633 m, con 3.4 ha.

Palabras clave: Combustibles forestales, exposición, incendios forestales, percepción remota, Reserva de la Biósfera Selva El Ocote, SIG.

ABSTRACT

Dead forest fuels are assessed *in situ*, requiring sampling sites located in a systematic way, with a sampling intensity of 1-3% with respect to the whole area. Although this entails a large investment of financial, human and time resources, the accuracies obtained are still low. Therefore, we propose an alternative sampling strategy identifying areas with similar features known as homogeneous response areas (HRAs). These are the basis for the structuring of a stratified sampling design tending to reduce the variance within each HRA in order to increase the accuracy of the estimates. This work was carried out in the Selva El Ocote Biosphere Reserve, located in the state of Chiapas. 19 HRAs were defined based on ten different kinds of vegetation: rainfed annual crops, live oak groves, cultivated grasslands, human-induced grasslands, savannahs, tall/medium evergreen forests, tall/medium evergreen forests with secondary bushy and herbaceous vegetation, and low deciduous and sub-deciduous forests. Besides, three altitude intervals were considered: 180-633 m, 634-1 086 m, and 1 087-1 540 m. Each HRA comprises several zones. The largest HRA consists of tall/medium evergreen forests and is located between 634 and 1 086 m of altitude, with a surface of 38 808 ha; while the smallest is constituted by savannahs, at an altitude of 180 to 633 m and with a surface of 3.4 ha.

Key words: Forest fuels, exposure, forest fires, remote sensing, Selva El Ocote Biosphere Reserve, GIS.

Fecha de recepción: 2 de junio de 2010

Fecha de aceptación: 7 de julio de 2012

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Correo-e: velascoherrera@gmail.com

² CE. Centro Altos Jalisco CIR-Pacífico Centro. INIFAP

³ Departamento de Geografía, Universidad de Guadalajara.

INTRODUCCIÓN

En México, los bosques y selvas son afectados constantemente por incendios forestales, lo cual provoca diferentes tipos de impacto en los recursos naturales. Al respecto, el estado de Chiapas, desde 1995, ha ocupado uno de los primeros lugares nacionales tanto en superficie afectada como por la frecuencia de ocurrencia de estos siniestros. En la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote (REBISO), 90% de los incendios forestales tienen causas antropogénicas y el resto son producidos por fenómenos naturales (SEMARNAT, 2007); sin embargo, para su ocurrencia es imprescindible la coincidencia de una serie de factores, entre ellos, la presencia de los combustibles forestales. Materiales que están constituidos por toda aquella biomasa y necromasa que potencialmente puede arder al exponerse a una fuente de calor, y abarcan árboles en pie, ramas, troncos, arbustos, pastos, hierbas, hojarasca y humus (Villers, 2006). Asimismo, dichos materiales se clasifican de acuerdo a diferentes criterios: a) por su peso, en ligeros, medianos y pesados; b) por su tiempo de retardo (tiempo que tarda un combustible en equilibrar su contenido de humedad con la humedad relativa del ambiente), en combustibles de 1, 10, 100 y 1 000 h (Byram, 1963). Categorías que deben considerarse cuando se pretende estudiar su distribución espacial, ya que su cantidad y proporción se asocian al comportamiento potencial del fuego. No obstante, su estimación es uno de los mayores retos para los investigadores forestales vinculados al tema (Flores, 2001).

Dado que la evaluación directa de los combustibles forestales es costosa e implica mucho tiempo, se han diseñado varias estrategias para llevarla a cabo. A partir de los primeros trabajos efectuados por Kourtz (1977), respecto a las principales técnicas de clasificación digital, se sentaron las bases teóricas y prácticas que permitieron valorar los combustibles vivos. Para ello se han usado técnicas como las clasificaciones no supervisadas en imágenes Landsat (Rabii, 1979; Crist y Cicone, 1984); otros se han orientado a determinar los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) sobre imágenes satelitales (Miller *et al.*, 1986; Burgan *et al.*, 1998; Wijaya *et al.*, 2010); y al uso de información auxiliar por medio de datos vectoriales topográficos y de precipitación (Root *et al.*, 1986), información de altura, pendiente, iluminación y textura (Salas y Chuvieco, 1995), redes neuronales (Vasconcelos *et al.*, 1998; Matthew *et al.*, 2004); así como a la caracterización numérica de las cargas de combustibles, la cual consiste en la extracción de los componentes de brillo, verdor y humedad para explicar particularidades espectrales de los modelos de combustibles (Flores, 2001). Además de los procesos de estimaciones indirectas de la biomasa basadas en la obtención de variables como la altura, mediante lecturas de radar y de tecnología Lidar (Riaño *et al.*, 2004; Lu, 2005; Sales *et al.*, 2007).

A diferencia de los combustibles vivos, los materiales muertos se evalúan *in situ* a partir de muestreos directos, debido a que no pueden detectarse por sensores remotos, ya que se localizan debajo de las copas de los árboles. La técnica de medición directa se fundamenta en el empleo de intersecciones planares (Brown,

INTRODUCTION

In Mexico, forests are constantly affected by fires which cause different types of impacts in the natural resources. Since 1955 the state of Chiapas has occupied one of the first places in the country for both affected surface and frequency of occurrence of this kind of disasters. In the Selva El Ocote Biosphere Reserve (in Spanish, REBISO), 90% of the forest fires are anthropogenic, and the rest are produced by natural phenomena (SEMARNAT, 2007). Nevertheless, their occurrence requires the combination of a series of factors, including the presence of the forest fuels. These consist of all the biomass and necromass that can potentially burn if exposed to a source of heat, and they include standing trees, branches, tree trunks, bushes, grass, herbs, leaves, and humus (Villers, 2006). Likewise, these materials are classified according to various criteria: a) by their weight, as light, medium and heavy; b) by their time of delay (the time that a fuel requires to balance its content of humidity with the relative humidity of the environment), as 1, 10, 100 and 1 000 h fuels (Byram, 1963). These categories should be considered when engaging in the study of their spatial distribution, since their quantity and proportion are associated to the potential behavior of fire. Nevertheless, their estimation is one of the major challenges for the forest research scientists working on this issue (Flores, 2001).

Since direct assessment of forest fuels is costly and takes considerable time, several strategies have been designed to carry it out. Kourtz (1977) set the practical and theoretical bases allowing assessment of live fuels since his early work on the main digital classification techniques. Rabii (1979) and Crist and Cicone (1984) have used such techniques as unsupervised image classifications on Landsat images. Others have focused on determining the standardized difference vegetation indices (SDVI) by means of satellite images (Miller *et al.*, 1986; Burgan *et al.*, 1998; Wijaya *et al.*, 2010), and on the use of auxiliary information through precipitation and topographic vector data (Root *et al.*, 1986); on altitude, slope, lighting and texture data (Salas and Chuvieco, 1995), neuronal networks (Vasconcelos *et al.*, 1998; Matthew *et al.*, 2004), and the numerical characterization of the fuel loads, for which the components of brightness, greenness and humidity that account for the spectrum peculiarities of the various fuel models are extracted (Flores, 2001), and on the indirect estimation of the biomass based on such variables as the altitude, obtained through radar readings and Lidar technology (Riaño *et al.*, 2004; Lu, 2005; Sales *et al.*, 2007).

Unlike live fuels, dead materials are assessed *in situ* from direct samplings because they cannot be detected by remote sensors, since these are located under the tree tops. The direct measurement technique is based on the use of plane intersections (Brown, 1974; McRae *et al.*, 1979; Sánchez and Zerecero, 1983; Flores, 2007). Nevertheless, in order to carry out these samplings it is necessary to cover extensive surfaces, and therefore this technique

1974; McRae *et al.*, 1979; Sánchez y Zerecero, 1983; Flores, 2007). No obstante, para realizar estos muestreos es necesario cubrir superficies extensas, por ende, los tiempos invertidos son largos y la actividad se torna costosa (Keane *et al.*, 2001).

Se han planteado estrategias alternativas con los diferentes tipos de combustibles, como el manejo de correlaciones espaciales de variables medibles (altitud, exposición, temperatura y tipo de vegetación). Sin embargo, es menester que estas estimaciones tengan un soporte en las evaluaciones de combustibles directas de campo, cuya operatividad y precisión requieren estar bien definidas para minimizar el grado de error. Existen varias técnicas para determinar el mejor diseño de muestreo, con un criterio de selección que procure disminuir la varianza de las muestras. Si se considera que la calidad y cantidad de los combustibles están asociadas a variables tales como tipo de vegetación, densidad y altitud, entonces es factible ubicar áreas o estratos con distribución homogénea con base en la teoría del diseño estratificado. No obstante, la cuestión básica de esta estrategia puede puntualizarse en dos aspectos: a) el criterio o criterios de estratificación, y b) las metodologías para implementarlos espacialmente.

La estratificación mediante el establecimiento de áreas homogéneas se ha utilizado en otros campos bajo el nombre de áreas de respuestas homogéneas (ARH), cuya aplicación tiende a agilizar los tiempos de muestreo; por ejemplo, Cantu (1981) las usó para seleccionar áreas homogéneas de investigación en ocho centros del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), y Palacios *et al.* (2007) realizaron un diagnóstico técnico basado en ese concepto para el cambio tecnológico en el cultivo del maíz.

Respecto a los criterios de estratificación, el uso de técnicas geomáticas ha sido una alternativa práctica en la definición de áreas homogéneas. En concreto, se ha trabajado con información generada por sensores remotos (imágenes de satélite), a través del criterio de reflectancia espectral para la diferenciación de estratos. En el ámbito de la agricultura: García *et al.* (1999) recurrieron a las áreas de respuestas espectrales homogéneas (AREH) para la identificación del patrón espacial del cultivo de maíz; además, se ha empleado la tipología ecológica, que consiste en la sobreposición de mapas edafológicos y de vegetación, con el propósito de precisar áreas ecológicas similares (Vela y Boyas, 1984; Estrada y Ángeles, 2007).

Sin embargo, el empleo de las ARH en la evaluación de combustibles forestales es reciente. Uno de los primeros trabajos es el de Flores *et al.* (2008), quienes las incluyeron como apoyo para el diseño de muestreo y evaluación de la respuesta a incendios en distintos ecosistemas, de seis entidades del país. No obstante, en la actualidad se carece de estudios que evalúen las cargas de combustibles forestales, donde el diseño de muestreo se fundamente en el concepto de ARH, y en el que la implementación espacial de los criterios de

requires a significant investment of time and financial resources (Keane *et al.*, 2001).

Alternative strategies have been presented for the different types of fuels, including the management of measurable spatial variables (altitude, exposure, temperature, and type of vegetation). Nevertheless, these estimations need to be supported by direct field assessments of fuels, whose effectiveness and accuracy must be well defined in order to minimize the degree of error. There are several techniques for determining the best sampling design, with a selection criterion meant to reduce the variance of the samples. If the quality and quantity of the fuels are considered to be associated to such variables as type of vegetation, density and altitude, then it is possible to locate areas or strata with homogeneous distribution based on the theory of stratified sampling design. Nevertheless, the core of this strategy can be broken down into two aspects: a) the stratification criterion or criteria, and b) the methodologies to implement these spatially.

Stratification based on the establishment of homogeneous areas has been utilized in other fields under the name of homogeneous response areas (HRAs); its application tends to expedite the sampling times; for example, Cantu (1981) used it to select homogeneous research areas in eight centers of the National Institute for Forestry, Agriculture, and Livestock Research (INIFAP), and Palacios *et al.* (2007) carried out a technical diagnosis for the technological change in corn production based on this concept.

Regarding the stratification criteria, the use of geomatic techniques has been a practical alternative in the definition of homogeneous areas. Specifically, information generated by remote sensors (satellite imaging) based on the criterion of spectral reflectance for stratum differentiation has been utilized. In the field of agriculture: García *et al.* (1999) resorted to homogeneous spectral response areas (HSRAs) for the identification of spatial patterns of corn production; they also made use of the ecological typology, i.e. the superposition of edaphological and vegetation maps, to pinpoint similar ecological areas (Vela and Boyas, 1984; Estrada and Ángeles, 2007).

Nevertheless, the use of HRAs in the assessment of forest fuels is recent. The paper by Flores *et al.* (2008), was among the first to use HRAs as a support for the sampling design and fire response assessment in various ecosystems in six states of the country. Nevertheless, there are at present no studies assessing the loads of forest fuels via a sampling design based on the concept of HRAs, or in which spatial stratification criteria are implemented for locating and measuring these according to geomatic strategies. Consequently, the objective of the present investigation was to develop an integral process to generate thematic maps for the different types of forest fuels. The project was carried out in the Selva El Ocote Biosphere Reserve (REBISO), which consists of diverse and complex landscapes (Flamenco *et al.*, 2007), and which

estratificación para ubicarlas y dimensionarlas se realice con base en estrategias geomáticas. En consecuencia, el objetivo de la presente investigación fue desarrollar un proceso integral para generar cartografía temática sobre los diferentes tipos de combustibles forestales. El proyecto se llevó a cabo en la Reserva de la Biósfera Selva El Ocote (REBISO), la cual está conformada por paisajes complejos y diversos (Flamenco *et al.*, 2007), y por uno de los macizos forestales tropicales más sobresalientes de Mesoamérica (PEOT CHIS, 2000).

MATERIALES Y MÉTODOS

La Reserva de la Biósfera Selva El Ocote se localiza en los municipios Ocozocoautla, Cintalapa, Tecpatán y Jiquipilas, al oeste del estado de Chiapas, México (Figura 1). Sus coordenadas extremas son 16°45'42" y 17°09'00" latitud norte, 93°54'19" y 93°21'20" longitud oeste. Tiene una superficie aproximada de 101 288 ha y su máximo nivel altitudinal es de 1 500 m (Mullerried, 1957).

includes one of the most outstanding tropical forest ranges of Mesoamerica (PEOT CHIS, 2000).

MATERIAL AND METHODS

The Selva El Ocote Biosphere Reserve is located in the Ocozocoautla, Cintalapa, Tecpatán and Jiquipilas municipalities, in western Chiapas, Mexico (Figure 1). Its coordinates are 16°45'42" and 17°09'00" N, and 93°54'19" and 93°21'20" W. It has an approximate surface of 101 288 ha and a maximum altitude of 1 500 m (Mullerried, 1957).

Stratification criteria. In keeping with the concept of homogeneous response areas, a stratified sampling design was used, on which the sampling sites were later located by stratum either systematically or at random. One of the main advantages of this process is that it allows determination of the strata requiring a larger number of sites, according to the degree of homogeneity or changeability of each. The applied stratification criterion is based on a digital elevation model and on the vegetation-covered areas.

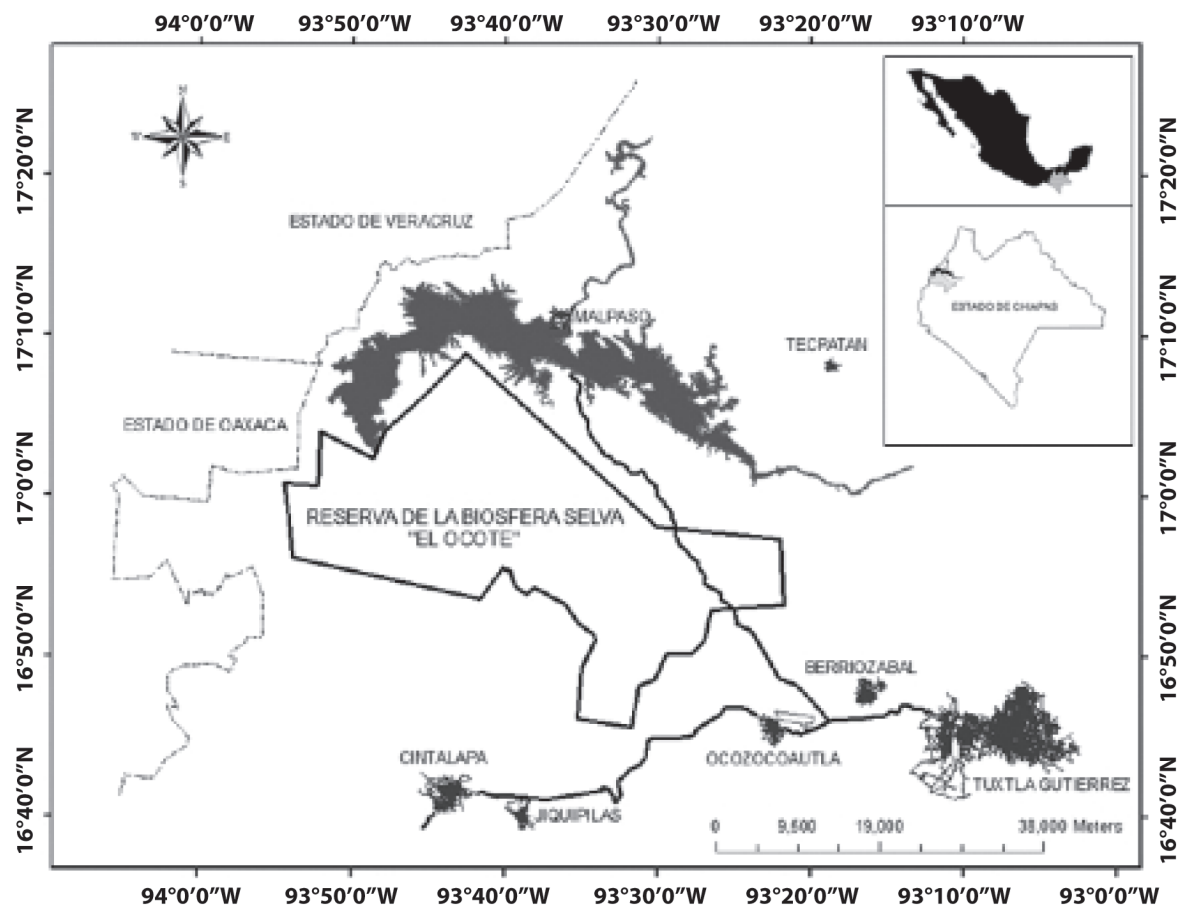


Figura 1. Localización geográfica de la Reserva de la Biósfera Selva El Ocote.

Figure 1. Geographical location of the Selva El Ocote Biosphere Reserve.

Criterios de estratificación. Bajo el concepto de áreas de respuestas homogéneas se siguió un diseño estratificado, en el que posteriormente se ubicaron los sitios de muestro por estrato en forma sistemática o aleatoria. Una de las principales ventajas de este proceso es que se puede definir en cuáles estratos se requiere un mayor número de sitios, de acuerdo al grado de homogeneidad o variabilidad de cada uno. El criterio de estratificación aplicado se basa en un modelo de elevación digital y en las coberturas de vegetación.

Modelo de elevación digital. Se utilizaron cuatro modelos digitales de elevaciones (E15c47, E15c48, E15c57, E15c58) con resolución espacial de 50 m (Figura 2) y se convirtieron a un formato GRID mediante el Sistema de Información Geográfica ArcView 3.1. Para establecer los intervalos altitudinales se tomaron en cuenta los trabajos de clasificación climática de Köppen modificados por García (2004), quien sostiene que la temperatura en la república mexicana presenta una reducción en promedio de 0.65°C por cada 100 m de altura. Se obtuvieron tres intervalos: 180 - 633, 634 - 1086 y 1087 - 1540 con temperatura menor a 3°C en cada uno.

Digital elevation model. Four digital elevation models (E15c47, E15c48, E15c57, E15c58) with 50 m spatial resolution (Figure 2) were utilized and were converted to a GRID format by means of the ArcView 3.1 GIS software. Altitude intervals were established according Köppen's climate classification, modified by Garcia (2004), who maintains that the temperature in Mexico shows an average reduction of 0.65°C for every 100 m of altitude. Three intervals were obtained: 180 - 633, 634 - 1086 and 1087 - 1540, with a temperature below 3°C in each.

Vegetation covers. Information on the types of vegetation located in the Selva El Ocote Biosphere Reserve corresponded to vectorial data originating from the National Forestry Inventory of the year 2000. The stratification was done according to the various existing vegetation types (Figure 3). The bodies of water and areas sown with rainfed crops were excluded of the analysis, since no flammable material exists in the former, and the flammable material is constantly removed from the latter by the farmers.

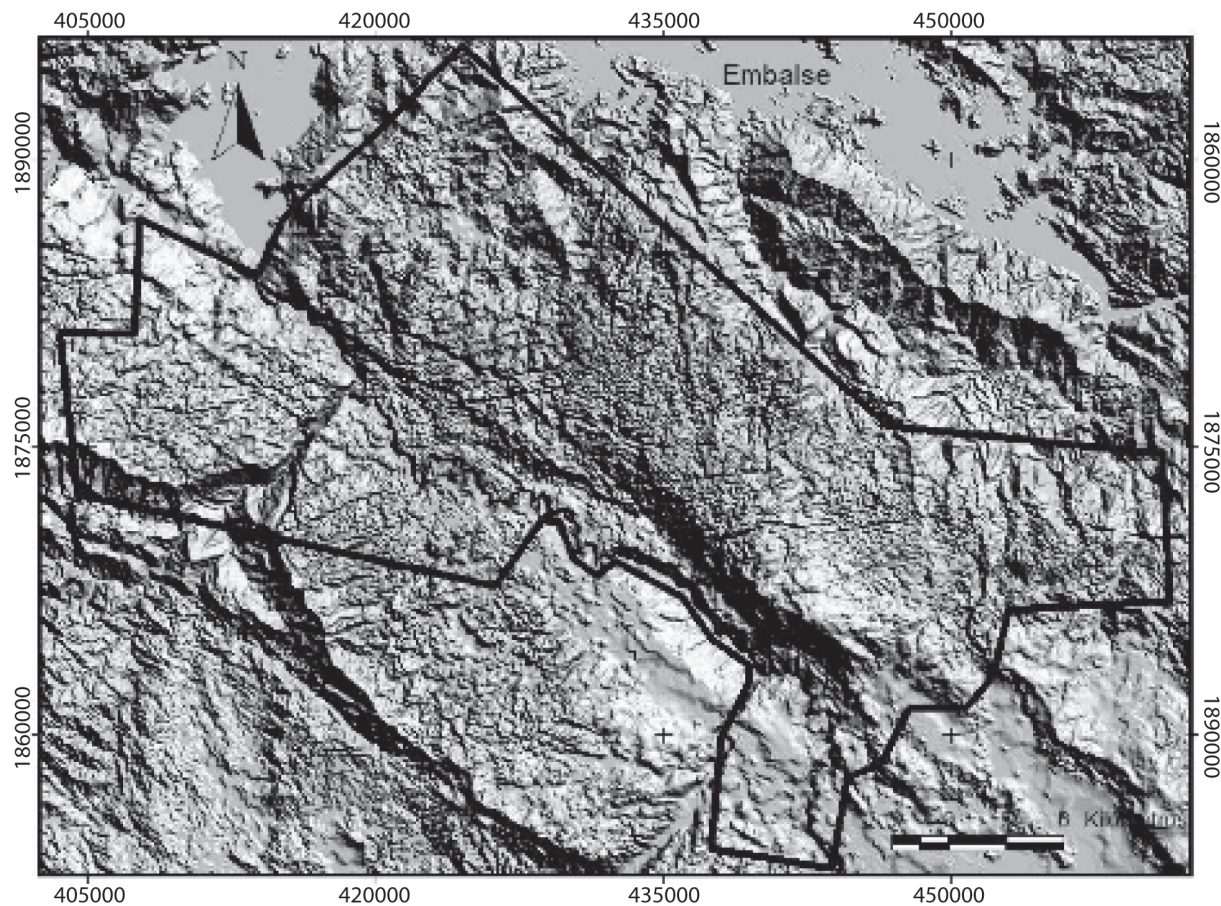


Figura 2. Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a partir del cual se derivaron las altitudes correspondientes a la Reserva de la Biósfera Selva El Ocote.

Figure 2. Digital Elevations Model (MDE) from which the altitudes of the Selva El Ocote Biosphere Reserve were derived.

Coberturas de vegetación. La información sobre tipos de vegetación ubicados en la Reserva de la Biósfera Selva El Ocote correspondieron a datos vectoriales provenientes del Inventario Nacional Forestal del año 2000. El criterio de estratificación fue cada tipo de vegetación existente (Figura 3). Los cuerpos de agua y los lugares con agricultura de temporal se excluyeron del análisis, ya que, en el primer caso, no existe material combustible y en el segundo, el material inflamable, es removido de manera constante por los campesinos.

Spatial implementation of stratification criteria

The homogeneous response areas were defined through map algebra within a Geographic Information System (GIS). Therefore, the various levels of altitude were integrated into each type of vegetation selected, and the algorithms were established to this effect:

$$([vegetation] = 1. AsGrid) \text{ and } ([altitudes] = 1. AsGrid) \quad (1)$$

$$([vegetation] = 1. AsGrid) \text{ and } ([altitudes] = 2. AsGrid) \quad (2)$$

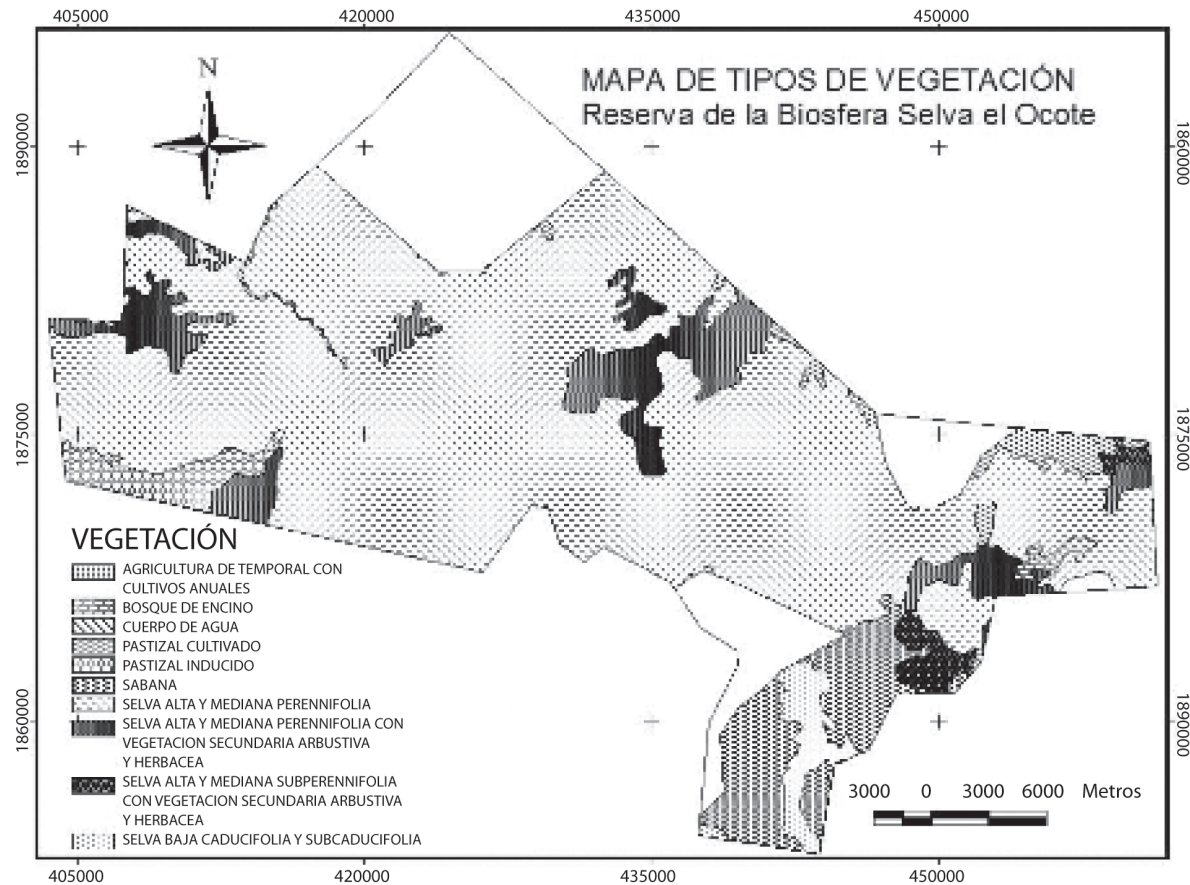


Figura 3. Vectorial de coberturas de vegetación correspondiente a la Reserva de la Biósfera Selva El Ocote.

Figure 3. Vector map of the vegetation cover of the Selva El Ocote Biosphere Reserve.

Implementación espacial de criterios de estratificación

Las áreas de respuesta homogénea se definieron con la estrategia de álgebra de mapas en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Por tanto, se integraron los distintos niveles de altitud dentro de cada tipo de vegetación seleccionado, para lo cual se establecieron los algoritmos:

$$([vegetación] = 1. AsGrid) \text{ and } ([alturas] = 1. AsGrid) \quad (1)$$

$$([vegetación] = 1. AsGrid) \text{ and } ([alturas] = 2. AsGrid) \quad (2)$$

$$([vegetation] = 1. AsGrid) \text{ and } ([altitudes] = 3. AsGrid) \quad (3)$$

$$([vegetation] = 2. AsGrid) \text{ and } ([altitudes] = 1. AsGrid) \quad (4)$$

$$([vegetation] = 2. AsGrid) \text{ and } ([altitudes] = 2. AsGrid) \quad (5)$$

$$([vegetation] = 2. AsGrid) \text{ and } ([altitudes] = 3. AsGrid) \quad (6)$$

$$([vegetation] = n. AsGrid) \text{ and } ([altitudes] = n. AsGrid) \quad (8)$$

$$([vegetación] = 1AsGrid) \text{ and } ([alturas] = 3AsGrid) \quad (3)$$

$$([vegetación] = 2AsGrid) \text{ and } ([alturas] = 1AsGrid) \quad (4)$$

$$([vegetación] = 2AsGrid) \text{ and } ([alturas] = 2AsGrid) \quad (5)$$

$$([vegetación] = 2AsGrid) \text{ and } ([alturas] = 3AsGrid) \quad (6)$$

$$([vegetación] = nAsGrid) \text{ and } ([alturas] = nAsGrid) \quad (8)$$

El algoritmo 1 modela todos aquellos píxeles relacionados con la vegetación tipo (1), correspondiente a pastizal cultivado y que se encuentran en el intervalo altitudinal (1): entre 180 y 633 msnm. El algoritmo 2 busca los píxeles de vegetación tipo (1), pero en un intervalo altitudinal superior (2): entre 634 y 1 086 msnm. Finalmente, el algoritmo 3 localiza los píxeles de la vegetación tipo (1) en el intervalo altitudinal (3): 1 087 - 1 540 msnm. De la misma forma, se continuó con la vegetación tipo (2) e intervalo altitudinal (1) ecuación 4; vegetación (2) con el intervalo altitudinal (2) ecuación 5; vegetación (2) con el intervalo altitudinal (3) ecuación 6. El proceso se repitió para todos los tipos de vegetación (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) y los intervalos altitudinales (1, 2, 3).

En algunos casos al correr el algoritmo no se obtuvieron valores, lo que se interpretó como una ausencia de píxeles con la condición buscada; en otros, el resultado registró información de píxeles con las características deseadas, lo cual se denominó área de respuesta homogénea (ARH). Una vez concluido el proceso se calcularon las superficies de dichas áreas (Figura 4).

Algorithm 1 models all those pixels related to the vegetation type (1) pertaining to cultivated grasslands that are found in the altitude interval (1), between 180 and 633 masl. Algorithm 2 searches for the pixels for vegetation type (1), but within a higher altitude interval (2), between 634 and 1 086 masl. Finally, algorithm 3 locates the pixels for vegetation type (1) in altitude interval (3), between 1 087 and 1 540 masl. The same procedure was followed for vegetation type (2) and altitude interval (1), equation 4; for vegetation type (2) and altitude interval (2), equation 5, and for vegetation type (2) and altitude interval (3), equation 6. The process was repeated for all vegetation types (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) and altitude intervals (1, 2, 3).

In some cases no values were obtained when running the algorithm; this was interpreted as an absence of pixels with the condition sought; in others, information about pixels with the desired characteristics was registered, and these pixels were then referred to as homogeneous response areas (HRAs). Once the process was concluded, the surfaces of these areas were calculated (Figure 4).

The blank squares in Figure 5 represent a combination in which no HRA was defined. The bodies of water were not considered due to the absence of fuel; neither were the areas sown with rainfed annual crops, since fuels are constantly being removed from them in the form of fodder.

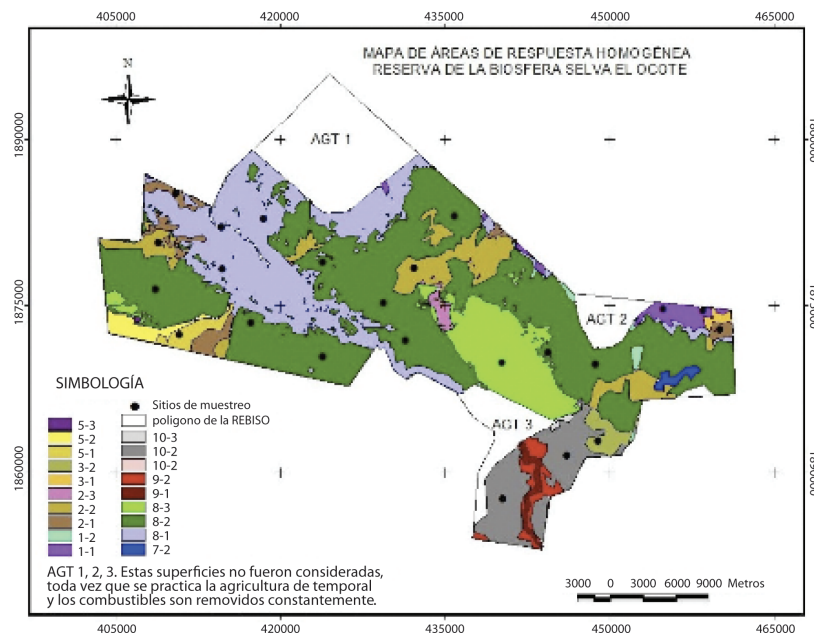


Figura 4. Mapa de áreas de respuestas homogéneas para el muestreo de combustibles forestales construidas a partir de las variables de vegetación y altura para la REBISO.

Figure 4. Map of homogeneous response areas for the sampling of forest fuels, based on the vegetation and altitude variables for REBISO.

En la Figura 5, los cuadros en blanco representan una combinación donde no se definió un ARH. Los cuerpos de agua no se consideraron debido a la ausencia de combustible, tampoco las áreas de agricultura de temporal con cultivos anuales, ya que en ellas existe remoción constante de combustible en forma de forraje.

RESULTS

The process is illustrated in a thematic map, in which a series of zones pertaining to the combinations of the vegetation type and altitude criteria are indicated. 19 homogeneous response areas

Cálculo de ARH		Intervalos de Alturas			Intervalos de altura (m)	Tipos de Vegetación
		1	2	3		
Tipos de Vegetación	1				1) 180 a 633	1) Pastizal cultivado
	2				2) 634 a 1086	2) Selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea
	3				3) 1087 a 1540	3) Selva alta y mediana sub-perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea
	4	Cuerpos de agua				4) Cuerpos de agua
	5					5) Pastizal inducido
	6	Agricultura de Temporal				6) Agricultura de temporal con cultivos anuales
	7					7) Bosque de encino
	8					8) Selva alta y mediana perennifolia
	9					9) Selva baja caducifolia y sub-caducifolia
	10					10) Sabana

Figura 5. Combinación de tipos de vegetación e intervalos altitudinales para definir áreas de respuesta homogénea (ARH), a través del proceso de álgebra de mapas.
Figure 5. A combination of vegetation types and altitude intervals for defining homogeneous response areas (HRAs), through the map algebra process.

RESULTADOS

El proceso se ilustra en un mapa temático, en el que se ubican una serie de polígonos correspondientes a las combinaciones de los criterios de tipo de vegetación y alturas. De esta manera, se representaron 19 áreas de respuestas homogéneas con características similares; por lo tanto, el muestreo efectuado en una o varias arrojará resultados que podrían extrapolarse a otras ARH parecidas que no fueron muestreadas, lo que significa una enorme ventaja respecto al muestreo tradicional.

La suma total de la superficie de los polígonos que componen el mapa resultante de las áreas de respuestas homogéneas fue de 85 182 ha (Figura 6). De ellas, la que mayor extensión ocupó fue la 8-2 que pertenece a selva alta y mediana perennifolia localizada entre 634 y 1 086 msnm, con una superficie igual a 38 808 ha (Cuadro 1). El área de respuesta homogénea con menor superficie correspondió a la 10-1, con 3 ha. Una vez conocida la ubicación y extensión de cada área de respuesta homogénea, el siguiente paso es la planeación del diseño de muestreo (intensidad y distribución de las muestras), el cual, con base en el

with like characteristics were represented; therefore, the sampling performed in one or several of these areas will yield results that can be extrapolated to other similar HRAs that were not sampled; this implies an enormous advantage over the traditional sampling.

The total surface of the zones that make up the resulting map of the homogeneous response areas was 85 182 ha (Figure 6). The largest of these zones was No. 8-2, occupied by a tall/ medium evergreen forest and located at an altitude between 634 and 1 086 masl, on a surface of 38 808 ha (Table 1). The homogeneous response area with the smallest surface, of 3 ha, was No. 10-1. Once the location and the extension of each homogeneous response area are known, the following step is planning the sampling design (intensity and distribution of the samples), based on a random distribution within the defined HRAs (strata). Since in many cases it is not possible to sample all the zones of an HRA (stratum), we propose a selection, taking into account the roads and paths that facilitate the access to the sampling sites.

It was determined that, of the 19 homogeneous response areas, numbers 3-1, 3-2, 5-1, 7-2, 9-1, and 10-1 consist of a single zone

concepto de ARH, se apoya en una distribución aleatoria dentro de las ARH (estratos) definidas. Dado que, en muchos casos, no es posible el muestreo en todas las zonas de una ARH (estrato), se propone seleccionar solo algunas. Para ello, se deben considerar los caminos, brechas y veredas que faciliten el acceso al sitio.

De 19 áreas de respuestas homogéneas se determinó que las 3-1, 3-2, 5-1, 7-2, 9-1, 10-1 están integradas por un solo polígono (Figura 7) y superficie diferente (Figura 6), y corresponden a selva alta y mediana subperennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea, y una altitud de 180 a 633 m; selva alta y mediana sub-perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea, y una altitud de 634 a 1 086 m; pastizal inducido y una altitud de 180 a 633 m; bosque de encino y una altitud de 634 a 1 086 m; selva baja caducifolia y subcaducifolia y una altitud de 180 a 633 m; sabana y una altitud de 180 a 633 m, respectivamente.

DISCUSIÓN

La selección de sitios de muestreo para la estimación de los combustibles forestales generalmente se ha realizado mediante muestreos: a) probabilístico aleatorio simple (Flores *et al.*, 2008); b) sistemáticos con sobreposición de mapas topográficos (Flores y Moreno, 2005; Root *et al.*, 1986); y c) estratificados al azar y en rodales (Bautista *et al.*, 2005). Métodos tradicionales que se distinguen por el gran número de muestras requeridas para representar la variabilidad de una zona de estudio (Guimarães, 1993). En consecuencia, la preocupación por desarrollar técnicas y estimadores más eficientes que permitan determinar las características de una zona o porción de la superficie terrestre han sido los objetivos de varios estudios, no solo en la ciencia del suelo, sino también en otras áreas del conocimiento (Wojciechowski *et al.*, 2009).

La importancia de la metodología expuesta sobre la generación de mapas de áreas de respuesta homogénea radica en que reduce el trabajo de campo, pues los sitios de muestreo se reparten en cada ARH; por lo tanto los puntos son seleccionados de manera directa. Además, las ARH cumplen con una de las condiciones del muestreo en inventarios forestales: disminuir la varianza, contrario a lo que ocurre con el uso de un muestreo al azar, en el que la muestra se distribuye en forma aleatoria en toda la zona de estudio, lo que muy probablemente implica la obtención de una varianza muy alta. Por otro lado, se tiene la opción del muestreo por medio de estratos, en el cual se espera cierta homogeneidad que aminore la varianza. Para lograr la homogeneidad en las ARH se utilizan las variables con mayor injerencia: vegetación, altura y clima (Flores y Benavides, 2004); no obstante, es primordial estudiar los parámetros: pendiente, exposición, humedad, temperatura y suelo; toda vez que guardan una relación estrecha con la vegetación del lugar, así como con la acumulación y disposición de los combustibles forestales. De acuerdo a lo anterior, la definición de áreas de respuesta homogénea implica dos ventajas básicas:

- 1) Desde la perspectiva de la estadística tradicional, se disminuye la varianza, con ello se tiende a aumentar la

(Figure 7) with a diverse surface (Figure 6), and correspond to a tall/medium sub-evergreen forest with a bushy and herbaceous secondary vegetation at an altitude between 180 and 633 m; a tall/medium sub-evergreen forest with a bushy and herbaceous secondary vegetation at an altitude between 634 and 1 086 m; a human-induced grassland at an altitude between 180 and 633 m; a live oak grove at an altitude between 634 and 1 086 m; a low deciduous and sub-deciduous forest at an altitude between 180 and 633 m, and a savannah at an altitude between 180 and 633 m, respectively.

Cuadro 1. Áreas de respuesta homogénea definidas para la Reserva de la Biósfera El Ocote.

Table 1. Homogeneous response areas defined for the Selva El Ocote Biosphere Reserve.

Clave (Altitud-Vegetación)	Número de polígonos	Superficie (ha)
1-1	16	1 260
1-2	19	418
2-1	20	1 991
2-2	23	6 133
2-3	9	466
5-2	8	1 012
5-3	2	21
8-1	70	17 538
8-2	12	38 808
8-3	41	7 578
9-2	11	1 194
10-2	7	5 556
10-3	3	123

DISCUSSION

The selection of the sampling sites for the estimation of the forest fuels has generally been based on a) probabilistic simple random sampling (Flores *et al.*, 2008); b) systematic sampling with topographic map superposition (Flores and Moreno, 2005; Root *et al.*, 1986), and c) random stratified samplings and samplings in stands (Bautista *et al.*, 2005). These traditional methods are distinguished by the large number of samples required to represent the changeability of a study zone (Guimarães, 1993).

Consequently, the concern for developing more efficient techniques and estimators that allow determination of the characteristics of a zone or portion of the land surface have been the objects of various studies, not only in the science of the soil but also in other areas of knowledge (Wojciechowski *et al.*, 2009).



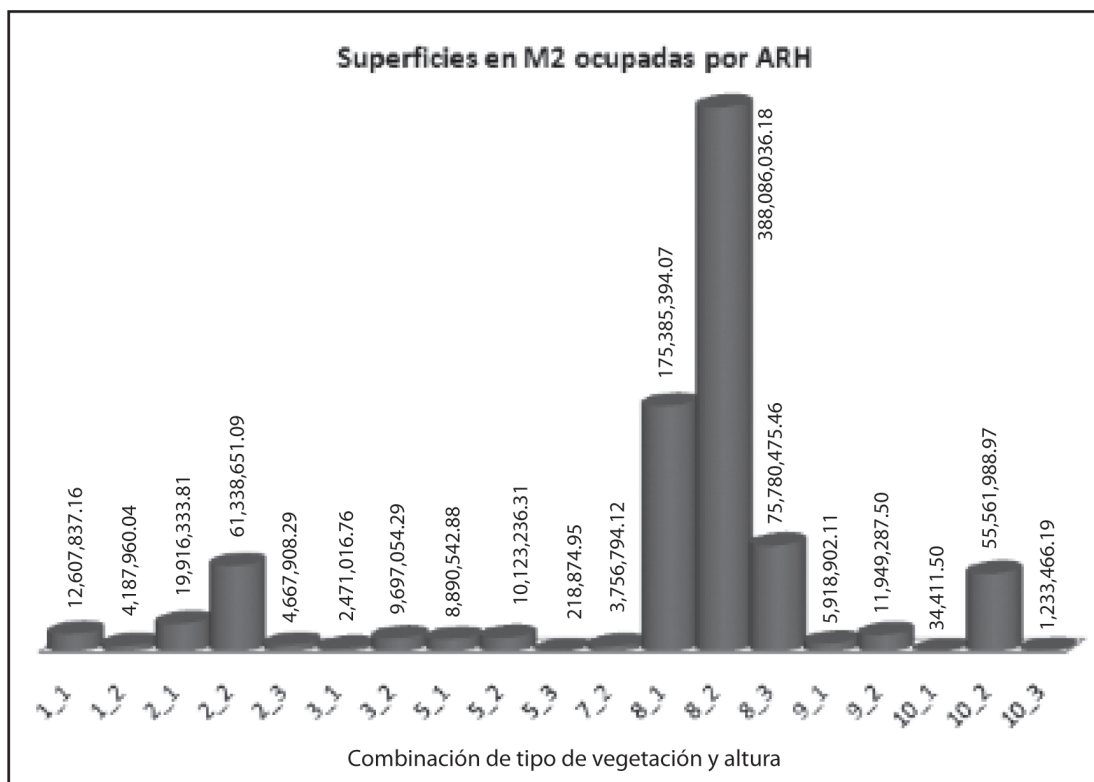


Figura 6. Superficies ocupadas por las áreas de respuesta homogénea de la Reserva de la Biósfera Selva El Ocote.
Figure 6. Surfaces occupied by the homogeneous response areas of the Selva El Ocote Biosphere Reserve.

precisión de los resultados. Esto se debe a la estrategia de estratificación, en la que se espera que las cargas de combustibles dentro de cada estrato estén distribuidas espacialmente en forma homogénea.

- 2) Desde la perspectiva de la estadística espacial, se tiene la gran ventaja de que se pueden extrapolar las estimaciones de cargas de combustibles entre ARH similares. Así, se ahorra una considerable cantidad de tiempo.

En resumen, estadísticamente se tiende a una mayor precisión, mientras que geoestadísticamente se ahorra trabajo y tiempo de muestreo.

La siguiente etapa del presente proyecto consistirá en la validación de los resultados a partir del muestreo de sitios localizados en el interior de la Reserva de la Biosfera Selva el Ocote y se extraerán muestras de los diferentes tipos de combustibles, de acuerdo a la metodología descrita por Brown (1974), a fin de construir mapas de combustibles forestales de 1, 10, 100 y 1 000 h, bajo la aplicación de métodos geoestadísticos de interpolación para determinar los datos de sitios no muestreados. Con ello se pretende definir la precisión de los mapas de ARH generados con la metodología descrita en este documento.

The importance of the exposed methodology for generating maps of homogeneous response areas resides in that it reduces the field work because the sampling sites are distributed in each HRA, and therefore the spots are directly selected. Besides, the HRAs meet one of the conditions for sampling of forest inventories: they reduce the variance, contrary to what occurs with the use of random sampling, in which the sample is randomly distributed in all of the study zone, and therefore a very high variance is likely to be obtained. On the other hand, there is the option of stratified sampling, with the use of which a certain homogeneity is expected to reduce the variance. In order to achieve homogeneity in the HRAs, the most prominent variables (vegetation, altitude and climate) are utilized (Flores and Benavides, 2004). Nevertheless, it is crucial to examine the parameters, i.e. slope, exposure, humidity, temperature and soil, as they keep a close relation to the vegetation of the place, as well as to the accumulation and disposal of forest fuels. Accordingly, the definition of the homogeneous response areas involves two basic advantages:

- 1) From the perspective of traditional statistics, the variance is reduced, and consequently the accuracy of the results tends to increase. This is due to the stratification strategy, in which the fuel loads within each stratum are expected to have a homogeneous spatial distribution.
- 2) From the perspective of spatial statistics, there is a considerable advantage in that the fuel load estimations

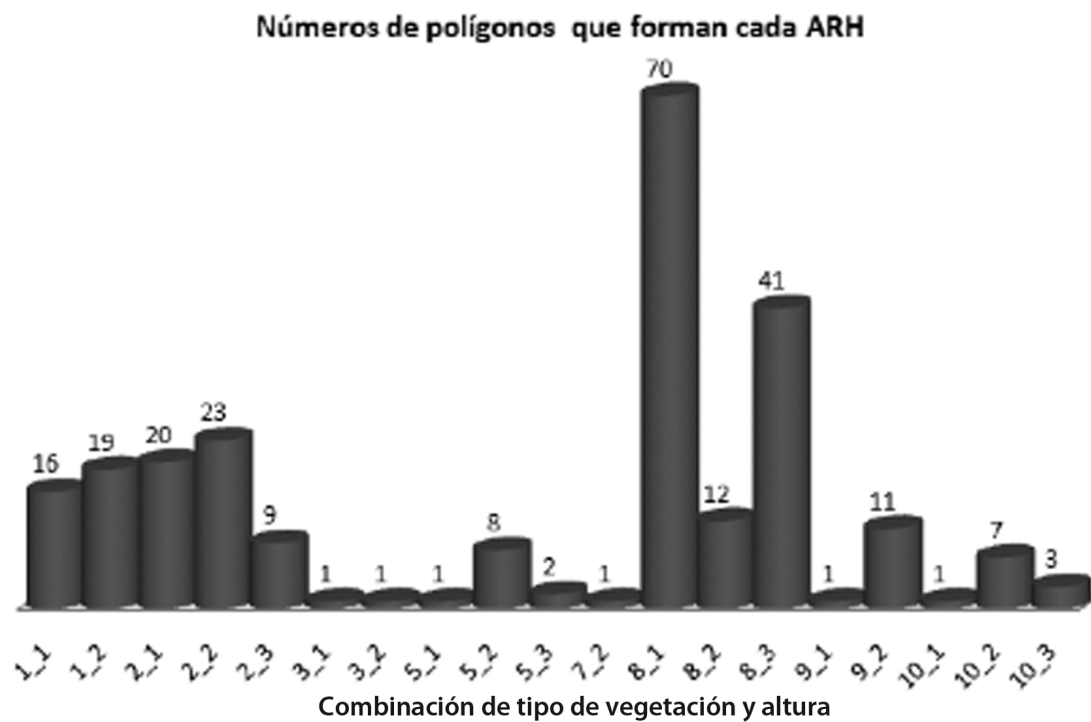


Figura 7. Números de polígonos que integran cada área de respuesta homogénea de la Reserva de la Biósfera Selva El Ocote.

Figure 7. Numbers of zones that constitute each homogeneous response area of the Selva El Ocote Biosphere Reserve.

CONCLUSIONES

Los sistemas de información geográfica (SIG) constituyen una revolución tecnológica y metodológica para efectuar la adquisición, manejo y análisis de información geográfica; integran el eje que sustenta los sistemas de consulta y análisis empleados en aplicaciones forestales, y permiten el manejo de volúmenes de información cartográfica relevante para el proceso de toma de decisiones. Además, son una alternativa más precisa para realizar clasificaciones edafo-climáticas y fisiográficas, con la ventaja de que se pueden estimar los valores para cada píxel (imagen raster y matrices de valores); y permiten cuantificar superficies y sobreponer vectores; derivado de esto, los mapas resultantes tienen un carácter más objetivo. A partir de esas ventajas es posible la construcción de mapas de áreas de respuestas homogéneas en los cuales se agrupan píxeles similares para apoyar el muestreo orientado a la evaluación de los combustibles forestales.

Aunque el presente trabajo está encauzado, originalmente, a facilitar la selección de sitios de muestreo de combustibles forestales en la Reserva de la Biósfera Selva El Ocote, el concepto de ARH es aplicable en otros campos disciplinarios, pues a partir de él se comparten criterios básicos predeterminados a través de la combinación de variables incidentes en el problema estudiado, se generan mapas específicos, lo cual favorece el uso eficiente de los recursos económicos y materiales, y, con ello, la optimización del factor tiempo dedicado a la selección y muestreo de los sitios.

can be extrapolated between similar HRAs, whereby a significant amount of time is saved.

In short, there is a tendency toward a higher degree of statistical accuracy, while in terms of geostatistics both time and effort are economized along the sampling process.

The next stage of this project will consist of the validation of the results based on the sampling of sites located within the Selva El Ocote Biosphere Reserve. Samples of the various types of fuels will be drawn according to the methodology described by Brown (1974), in order to map the distribution of forest fuels in areas measuring 1, 10, 100 and 1 000 ha, and geostatistic interpolation methods will be applied to determine the data for unsampled sites. We hereby intend to determine the accuracy of the HRA maps generated with the methodology described in this paper.

CONCLUSIONS

The geographic information systems (GIS) represent a technological and methodological revolution for the obtainment, management and analysis of geographic data. They constitute the basis for the consultation and analysis systems that are applied to forestry and provide access to relevant volumes of cartographic data for the decision-making process. Besides, they are a more accurate alternative for carrying out edapho-climatic and physiographic classifications, with

AGRADECIMIENTOS

A las autoridades de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), al Consejo de Ciencia y Tecnología del estado de Chiapas (COGyTECH) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAGYT) por la beca otorgada para cubrir los gastos de campo; a la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) por las facilidades brindadas para el ingreso a la Reserva de la Biósfera Selva El Ocote; a todos los revisores por sus valiosos comentarios.

REFERENCIAS

- Bautista, R. A., G. Treviño, C. Navar, C. Aguirre y S. Cantú. 2005. Caracterización de combustibles leñosos en el ejido pueblo nuevo, Durango. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 11 (1):51-56.
- Brown, J. K. 1974. Handbook for inventorying downed woody material. USDA Forest Service. UT USA. pp. 1-24.
- Burgan, R. E., R. W. Klaver and J. M. Klaver. 1998. Fuel models and fire potential from satellite and surface observations. *International Journal of Wildland Fire* 8 (3): 159-170.
- Byram, G. M. 1963. An analysis of the drying process in forest fuel material. *International Symposium of Humidity and Moisture*. Washington, DC USA. 38 pp.
- Cantu, V. J. 1981. Estructura, objetivos, políticas y programas pecuarios actuales del INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias SARH. México, D.F. México. 15p.
- Crist, E. P. and R. C. Cicone. 1984. Application of the tasseled cap concept to simulated Thematic Mapper data. *Photogrammetric Engineering of Remote Sensing* 50: 343-352.
- Estrada, C. y C. Ángeles. 2007. Evaluación de combustibles forestales en el Parque Nacional "El Chico", Hidalgo. *Ecología y biodiversidad, claves de la prevención*. Sevilla, España. http://www.fire.uni-freiburg.de/sevilla-2007/contributions/doc/cd/ SESIONES TEMATICAS/ ST3 / Estrada _Angeles _SPAIN _Zaragoza.pdf. (26 de agosto 2009).
- Flamenco, S. A., R. M. Martínez and O. R. Masera. 2007. Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. *Biological Conservation*. 138: 131-145.
- Flores, J. G. 2001. Modeling the spatial variability of forest fuel arrays. Ph. D. Dissertation. Department of Forest Sciences, Colorado State University, Fort Collins CO, USA. 201 p.
- Flores G., J. G. y J. D. Benavides S. 2004. Avances de la Investigación en incendios forestales en México. Grupo Mundi-Prensa. México, D.F. México. 2: 11-25.
- Flores G., J. G. y D. A. Moreno G. 2005. Modelaje espacial de la influencia de combustibles sobre la regeneración natural de un bosque perturbado. *Agrociencia*. 3 (39):339-349.
- Flores G., J. G. 2007. Plan de protección contra incendios forestales en el estado de Chiapas, basado en la ubicación de áreas de mayor riesgo. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro-Altos de Jalisco. Guadalajara, Jal. México. 224p.
- Flores G., J. G., A. A. Chávez D., C. Xelhuanzi J. y G. S. Villela A. 2008. Establecimiento de áreas de respuesta homogénea en el proyecto "Evaluación de la respuesta de diferentes ecosistemas forestales a los incendios forestales". Mesa Reforestación y Restauración de Suelos. II Coloquio Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo. Instituto Politécnico Nacional. México D.F. México. 15 p.
- García C., J., G. Cisneros y E. Navarro. 1999. Alternativas a la determinación de las zonas espectrales homogéneas. In: VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España. pp. 191-194.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. México. 243 p.
- Guimarães, E. C. 1993. Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um latossolo-roxo. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo. Brasil. 160 p.

the advantage that the values can be estimated for every pixel (raster imaging and value matrices); surfaces can be assessed and vectors can be superposed, and, consequently, the resulting maps are more objective. These advantages make it possible to map homogeneous response areas in such a way that similar pixels are grouped to support the sampling for the assessment of forest fuels.

While this paper is originally intended to facilitate the selection of sites for fuel sampling in the Selva El Ocote Biosphere Reserve, the concept of HRAs may be applied to other fields, as it allows the sharing of redetermined basic criteria through the combination of variables that are incidental to the studied issue; it also makes it possible to generate specific maps, whereby the efficient use of financial and material resources is enhanced, and the time devoted to site selection and sampling is optimized. ■

ACKNOWLEDGEMENTS

We wish to express our gratitude to the Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), to the Consejo de Ciencia y Tecnología del estado de Chiapas (COGyTECH) and to Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAGYT) for the grant awarded to cover the field work expenses; to the National Commission for Protected Natural Areas (CONANP) for facilitating the access to the Selva El Ocote Biosphere Reserve, and to all the reviewers for their valuable observations.

End of the English version

- Keane, R. E., R. Burgan and J. Van Wagtenonk. 2001. Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. *International Journal of Wildland Fire*. 10: 301-319.
- Kourtz, P. H. 1997. An application of Landsat digital technology to forest fire fuel type mapping. 11th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. pp. 1111-1115.
- Lu, D. 2005. Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in Brazilian amazon. *International Journal of Remote Sensing*. 26 (12):2509-2525.
- Matthew, G. R., E. K. Robert and A. P. Russel. 2004. Mapping fuels and fire regimes using remote sensing, ecosystem simulation, and gradient modeling. *Ecological Applications*. 14 (1):75-95.
- McRae, D. J., M. E. Alexander and B. J. Stocks. 1979. Measurement and description of fuels and fire behavior on prescribed burns: a handbook. Canadian Forestry Service, Department of the Environment. Sault Ste Marie, Ontario, Canada. 44 p.
- Miller, W. A., S. M. Howard and D. G. Moore. 1986. Use of AVHRR data in an information system for fire management in the Western United States. 20th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Nairobi, Kenya. pp. 67-79.
- Mullerried, F. K. G. 1957. La geología de Chiapas, México, Gobierno Constitucional del Estado de Chiapas. [cd] Chiapas. México. 180 p.
- Palacios C., V., M. Vázquez G., D. R. González E., E. Villareal F. and K. F. Byerly M. 2007. Technical diagnosis for technology change in the corn Crop. *TERRA Latinoamericana* 25 (3):321-332.
- Programa Estatal de Ordenamiento Territorial Chiapas. (PEOT-CHIS) 2000. Programa de ordenamiento territorial de Chiapas. Colegio de la Frontera Sur. Tuxtla Gutiérrez. Chis. México. 291 p.
- Rabii, H. A. 1979. An investigation of the utility of Landsat-2 MSS data to the fire-danger rating area, and forest fuel analysis within Crater Lake National Park. Oregon State University. Corvallis OR USA. 419 p.

- Riaño, D., E. Chuvieco, S. Condés, J. González-Matesanz and S. L. Ustin. 2004. Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from Lidar. *Remote Sensing of Environment* 92: 345-352.
- Root, R. R., S. C. F. Stitt, M. O. Nyquist, G. S. Waggoner and J. K. Agee. 1986. Vegetation and fire fuel models mapping of North Cascades National Park. ACSM-ASPRS Annual Convention. Washington, D.C. USA. pp.75-85.
- Salas F., J. y E. Chuvieco. 1995. Aplicación de imágenes Landsat-TM a la cartografía de modelos combustibles. *Revista de Teledetección*. 5:18-28.
- Sales M., H., C. M. Souza, P. C. Kyriakidis, D. A. Roberts and E. Vidal. 2007. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics. A case study for Rondonia, Brazil. *Ecological Modelling* 205 (1-2): 221-230.
- Sánchez C., J. y L. G. Zerecero. 1983. Método práctico para calcular la cantidad de combustibles leñosos y hojarasca. Nota Divulgativa No 9 CIFONOR - INIF. SFF. SARH. México, D.F. México. 14 p.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2007. Programa de manejo integrado del fuego de la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote. Chiapas, México. 43p.
- Vasconcelos M., J. P., J. C. U. Paul, S. Silava, J. M. C. Pereira, M. S. Caetano, F. X. Catry and T. M. Oliveira. 1998. Regional fuel mapping using a knowledge based system approach. III International Conference on Forest Fire Research. 14th Conference on Fire and Forest Meteorology. 2: 2111-2123.
- Vela G., L. y J. D. Boyás. 1984. La tipología ecológica como base de la planeación agropecuaria y forestal. SARH-INIFAP. *Rev. Cienc. For. en Mex.* 9 (47): 3-20.
- Villers R., L. 2006. Parámetros ambientales físico bióticos y modelos para estudiar el comportamiento del fuego. *Mundi-Prensa. Comisión Nacional Forestal, México, D.F., México.* pp. 27-37.
- Wijaya, A., S. Kusnadi, R. Gloaguen and H. Heilmeyer. 2010. Improved strategy for estimating stem volume and forest biomass using moderate resolution remote sensing data and GIS. *Journal of Forestry Research*. 21 (1):1-12.
- Wojciechowski, J. C., M. V. Schumacher, C. A. da F. Pires, P. R. de A. Madruga, R. de V. Kilca, E. J. Brun, C. R. S. da Silva, S. Vaccaro and N. M. R. Rondon. 2009. Geostatistics applied to the study of soil physiochemical characteristics in seasonal deciduous forest areas. *Ciência Florestal*. 19 (4):383-391.





Ejido Santa Catarina, municipio Tehuacán, Puebla. José Manuel Godos Lima, (2008).