

CARTOGRAFÍA DE TIPOS DE COMBUSTIBLE EN UNA REGIÓN DEL DURANGO, MÉXICO, MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE

ARMANDO CORTÉS ORTIZ¹ y EMILIO CHUVIECO SALINERO²

¹Instituto Nacional de Geografía e Informática. Dirección General de Geografía
Av. Héroe de Nacozari No. 2301. Jardines del parque. C. P. 20270. Aguascalientes, Ags.
México. c_armando25@hotmail.com

²Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. Colegios 2. Alcalá de Henares 28801,
Madrid. España. emilio.chuvieco@uah.es

RESUMEN

Se presentan los métodos y resultados obtenidos en un proyecto orientado a generar cartografía de tipos de combustible a partir de imágenes Landsat ETM+. El trabajo se ha desarrollado sobre una región forestal del estado de Durango, México. Se emplearon las bandas reflectivas del sensor, así como otras derivadas y datos auxiliares de topografía. Los datos originales de la imagen fueron corregidos geométrica y radiométricamente, para atenuar el efecto del sombreado por topografía. Se empleó una clasificación supervisada y trabajo de campo, que permitió recopilar datos sobre la estructura vertical y horizontal de la vegetación. Como resultado se obtuvieron cartografías de cobertura el suelo y tipos de combustible. La validación de los resultados arroja una fiabilidad bastante aceptable, con valores comprendidos entre el 60 y el 98%, según el tipo de combustible considerado, con mayores problemas para los combustibles de matorral. En consecuencia, el método parece aceptable para obtener una cartografía de tipos de combustible a nivel regional, en tiempo razonable y en forma económica, lo que resulta clave para la prevención de incendios forestales en la zona.

Palabras clave: tipos de combustible, teledetección, incendios forestales, Landsat.

ABSTRACT

Digital image analysis was applied to a multispectral image Landsat ETM+ to produce a fuel type map for the Durango forestry region, Mexico. The method involved the use of the reflective bands of ETM+, as well as synthetic bands and elevation data. The original bands were geometrically and radiometrically corrected. Shadows were removed using a simple topographic correction method. Supervised classifications and field work were undertaken. Field data were used to model the vertical and horizontal structure of the vegetation. As a result of the classifications, a land cover and a fuel type map were obtained. Accuracy ranged from 60 to 98% depending on the fuel type considered, being less precise the shrub fuels. Consequently, the method can be considered acceptable to obtain reliable cartography of fuel types at regional level, which is a critical variable in fire prevention management.

Keywords: fuel type mapping, remote sensing, forest fires, Landsat.

1. Introducción

El estado de Durango es uno de los estados de mayor importancia forestal de México, ya que cuenta con el 48% de las zonas forestales de producción y el 33% de la madera en rollo de coníferas del país. Al igual que en otros estados del territorio mexicano, una gran cantidad de incendios forestales afectan a estos recursos en la época seca, principalmente entre los meses de marzo a junio. En los años comprendidos entre 1991 y 1998 se contabilizaron 2607 incendios, afectando una superficie de 190.684 ha. Las estadísticas recientes muestran un volumen total de entre 130 y 180 incendios anuales, afectando una superficie entre 3.400 y 13.060 hectáreas (SEMARNAT, <http://www.semarnat.gob.mx/wps/portal/cmd/cs/ce/155/s/4696/s.155/4691>). Las causas de los incendios son diversas, si bien la mayoría son producidos por las actividades humanas o provocados intencionalmente. Entre las causas más frecuentes se encuentran las actividades agropecuarias y forestales, negligencias debidas a fumadores, fogatas, quemas de basura, rencillas, cazadores fortuitos, cultivos ilícitos, descargas eléctricas y otras no determinadas.

La teledetección ha sido una de las herramientas más empleadas en la prevención de incendios forestales (Chuvieco y Martín, 2004). Entre las posibilidades más destacadas de esta tecnología está la obtención de cartografía de combustibles, que permite actualizar la información sobre el estado y composición de la vegetación potencialmente inflamable. Esta variable es clave para los índices de riesgo, en donde se integra información referida a los agentes de ignición y comportamiento (viento, rayos, pendiente, actividad humana), frecuentemente en el marco de los sistemas de información geográfica. La teledetección espacial presenta ventajas para la cartografía de combustible debido a que resulta fácilmente actualizable, ofrece unos costes razonables, principalmente cuando se trabajan grandes áreas, y facilita información sobre el conjunto del territorio, que es preciso muestrearlo cuando se parte del trabajo de campo.

Uno de los trabajos pioneros en el empleo de la teledetección para cartografía de combustible fue el de Kourtz (1977) en la provincia de Québec, Canadá, quien evaluó varios métodos de clasificación sobre imágenes Landsat-MSS. En la misma línea está el trabajo de Rabii (1979) sobre Crater Lake National Park de Oregon, USA, obteniendo con una clasificación no supervisada trece tipos de combustible. En este trabajo expuso la necesidad de normalizar las diferencias de iluminación con el fin de obtener una clasificación más precisa. Root et al. (1986) emplearon imágenes Landsat MSS, información auxiliar topográfica y un mapa de precipitación, para obtener una cartografía de tipos de combustible con una precisión entre el 84 y 88%. Por su parte, Cosentino y Estes (1981) obtuvieron una clasificación fisonómica de tipos de combustible vegetal y densidades (cobertura relativa de copas) en el sur de California a partir de datos de Landsat y canales de textura, con una fiabilidad del 89,9%. Salas y Chuvieco (1994) continúan esta línea en España, aplicando diversos métodos de clasificación (supervisada, no supervisada y mixta), en imágenes TM e información auxiliar (altitud, pendiente, iluminación y textura). Los mejores resultados, con una fiabilidad global del 75%, fueron obtenidos mediante una clasificación mixta con todas las bandas TM (excepto la térmica), junto con la altitud y la textura de la banda TM-3. En estudios más recientes en esta misma línea se han obtenido precisiones algo más altas (83%), a

partir de incluir información textural y multitemporal, como indica el trabajo de Riaño et al. (2001) en el Parque Nacional de Cabañeros. En este caso, se utilizaron como base los tipos de combustible Prometheus, adaptación europea de los propuestos en el programa BEHAVE. También se han empleado imágenes SPOT para este tipo de cartografía (Castro y Chuvieco, 1998).

Los sensores hiperespectrales también han sido utilizados en este campo. González-Alonso et al. (1997) utilizaron imágenes procedentes del sensor AVIRIS para la cartografía de combustible en el Chaparral de California. El resultado obtenido lo consideraron positivo ya que pudieron identificar las áreas donde predominaba la vegetación muerta o no activa y en consecuencia la acumulación de combustible seco era mayor. También hay algunos estudios con datos radar y lidar. Riaño et al. (2004; 2003) presentan resultados de un proyecto para generar parámetros de combustibilidad en masas forestales a partir de datos lidar con muy buena precisión para determinar la altura de los árboles, la altura de la base de las copas, la cobertura arbórea, la altura y cobertura de la vegetación de superficie y la densidad de las copas.

A menor escala espacial se han empleado sensores a bordo de satélites meteorológicos para cartografiar combustibles en grandes zonas de estudio aprovechando sus características de alta resolución temporal y bajo costo. Entre los trabajos más interesantes, merece citarse los de Werth et al. (1985) para diez estados occidentales de EE.UU., y Burgan et al. (1998), basado sobre una clasificación forestal de imágenes AVHRR.

El objetivo principal de nuestro trabajo es proponer un método que permita obtener una cartografía de combustibles a escala regional (1:250.000), que no requiera excesiva inversión en tiempo y dinero. Elegimos como área piloto una zona forestal del estado de Durango, México, sobre la que teníamos información disponible. El propósito último de esta cartografía es obtener un índice de riesgo de incendio para la misma zona, considerando las variables de riesgo más estáticas. La información base disponible se ceñía a una imagen del sensor ETM+, a bordo del Landsat 7, trabajo de campo, y cartografía topográfica y datos auxiliares. Como objetivos secundarios se trataba de valorar qué combinación de bandas resultaba más idónea para separar los diferentes tipos de combustibles, así como analizar la contribución de los datos auxiliares en esta discriminación.

2. Área de estudio

El área seleccionada para realizar este estudio se encuentra ubicada en el estado de Durango y comprende una superficie de 14.583 km² aproximadamente. Los límites norte y sur son: 25° 00' N y 24° 00' N; los límites oeste y este son: 106° 00' W y 104° 42' W ([figura 1](#)). Esta región se localiza en la provincia fisiográfica denominada Sierra Madre Occidental, con un relieve muy accidentado, en donde existen altitudes menores de 450 m y sitios con una altitud de 3250 m. Lo más frecuente es el intervalo de altitud entre 2251 y 2500 m, seguido por el intervalo de 2501 a 2750 m de altitud.

Los sistemas de topofomas que existen en el área son variados (INEGI, 1981). El predominante corresponde a las grandes mesetas, es decir, terrenos elevados y relativamente llanos de gran extensión, las cuales se encuentran interrumpidas por grandes cañadas. Las sierras enmarcan estas mesetas; se trata de líneas de montañas que se combinan con cañadas y cañones. También en el área de estudio existe una llanura, sin elevaciones prominentes, en donde se

encuentran algunas lagunas y llanuras inundables y salinas. También se encuentran valles, depresiones alargadas e inclinadas hacia el mar o a una cuenca endorreica, generalmente ocupada por un río.

La complejidad del relieve y la fuerte variación altitudinal, junto con otros factores geográficos, hacen que el área de trabajo presente características climáticas muy variadas; según el Sistema de Clasificación Climática de Köppen, modificado por García Soto (1973), en el área de estudio existen los siguientes tipos o grupos climáticos: Cálido subhúmedo, Semicálido subhúmedo, Templado subhúmedo, Semifrío subhúmedo y Semiseco templado.

La cobertura vegetal es el resultado de la compleja interacción entre los diferentes factores, incluyendo la actividad humana, por lo que es variada dentro del área de estudio ([figura 2](#)). Se encuentran comunidades arbóreas (bosques templados y selvas subtropicales), arbustivas (matorrales), pastizales, áreas dedicadas a la agricultura y áreas que no presentan vegetación aparente (INEGI, 2002). Entre las comunidades arbóreas destaca el Bosque de pino, cuyo estrato arbóreo es de 10 a 20 metros, formado principalmente por *Pinus leiophylla* (pino chino), *Pinus chihuahuana*, *Pinus lumholtzii* (pino triste), *Pinus engelmanni* (pino real), *Quercus sp.*, y *Pinus durangensis*. También conviene destacar el Bosque de pino encino y Bosque de encino pino, con estructura y composición florística diversa, en el área de estudio tienen un estrato superior de 7 a 10 metros de altura con *Pinus cembroides* (pino piñonero), *Quercus grisea* (encino blanco), *Pinus chihuahuana* y *Quercus emoryi*, entre otras especies. El bosque de encino, con un estrato superior de 2,5 a 8 metros, está formado por especies de *Quercus grisea* (encino blanco), con estrato arbustivo abundante. Finalmente, el bosque bajo abierto cuenta con un estrato de gramíneas, salpicado por dosel arbóreo de 4 a 7 metros con especies como *Quercus grisea* (encino blanco) y *Quercus chihuahuensis*; el estrato arbustivo con *Quercus chihuahuensis*, *Opuntia leucotricha*, *Opuntia robusta* y *Acacia schaffneri*.

La comunidad arbórea de clima subtropical o semicálido en el área corresponde a la Selva baja caducifolia cuya altura varía entre 4 y 15 metros; más del 75% de los árboles pierden la hoja durante la época seca, entre las principales especies se citan: *Lysiloma divaricata* (tepemezquite), *Bursera excelsa* (copal) y *Bursera spp.* (papelillos), acompañadas de *Bernardia mexicana*, *Plumeria rubra*, *Ceiba acuminata*, *Stenocereus thurberi*, *Pachycereus spp.*, *Acacia pennatula*, *Haematoxylum brasiletto*, *Tabebuia sp.*, *Pithecellobium dulce* y otras (González Elizondo, 1983).

La vegetación arbustiva del área es diversa en altura, composición florística y densidad. La mayor parte se desarrolla en las zonas semiáridas del área de estudio. Las comunidades más destacadas son el matorral crasicaule, con predominancia de cactáceas y un estrato superior de 1,5 a 4 metros, con especies como: *Opuntia durangensis*, *Opuntia robusta* (nopal tapón), *Acacia schaffneri* (huizache chino), *Mimosa biuncifera* (gatuño), *Bouvardia sp.*, *Ptelea trifoliata*, *Aloysia gratissima*, *Yucca spp.*, *Quercus sp.*, *Juniperus deppeana*; el chaparral, vegetación densa asociada con el fuego y con especies de los géneros *Quercus*, *Cercocarpus*, *Amelanchier*, *Forestiera*, *Dasyllirion*, *Opuntia*, *Mimosa*, *Pinus*, *Juniperus* y *Arbutus*, y el matorral desértico micrófilo, de zonas áridas y semiáridas con plantas de hojas o folíolos pequeños, altura de 0,6 a 1,5 metros, con baja cobertura, formado por especies como: *Larrea tridentata* (gobernadora), *Flourensia cernua* (hojasén), *Fouquieria splendens* (ocotillo), *Prosopis juliflora* (mezquite), *Acacia spp.* (huizaches), *Mimosa spp.* (gatuños) y *Opuntia imbricata* (tasajillo).

Las comunidades de gramíneas (pasto o zacate) están determinadas por condiciones naturales del medio o establecidos por la influencia humana. Se agrupan en pastizal natural, con altura de hasta 0,8 m, el pastizal halófilo, que se desarrolla en suelos con alto contenido de sales, con altura de hasta 0,30 m, y el Pastizal inducido, que se desarrolla al eliminarse la vegetación original o en áreas agrícolas abandonadas, con altura variable de 0,1 a 0,4 m.

Las áreas dedicadas a la agricultura se encuentran en dos modalidades: 1) Agricultura de temporal, en la que el cultivo depende del agua de la lluvia (maíz y frijol) y 2) Agricultura de riego, en la que el cultivo tiene garantizada el agua durante todo el ciclo agrícola mediante algún sistema de riego (cultivos de manzanos, perón, trigo, avena, maíz, frijol, chile, alfalfa y nogales).

3. Metodología

3.1. Adquisición de datos, materiales y equipo

La imagen de satélite empleada para este trabajo corresponde al sensor multiespectral ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) a bordo del satélite Landsat 7. La imagen corresponde a la escena 031/043, obtenida por el sensor el 8 de marzo de 2000.

En cuanto a la información auxiliar, se dispuso de los siguientes datos digitales:

- Modelo Digital de Elevación (MDE) escala 1:250.000 (G13-11, Durango)
- Conjunto de Datos Topográficos escala 1:250.000 (G13-11, Durango)
- Conjunto de Datos Toponímicos escala 1:250.000 (G13-11, Durango)
- Mapas topográficos escala 1:50.000.
- Mapa topográfico escala 1:250.000 (G13-11, Durango).
- Espacio-mapa escala 1:250.000 (G13-11, Durango).
- Fotografías aéreas en blanco y negro, escala 1:75.000 tomadas en 1985 y 2001.
- Programas de cómputo: PCI V9.0, Geomatica. 50 East Wilmot, Ontario. Canada y IDRISI. Clark University, Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis, 950 Main Street, Worcester MA 01610-1477, USA.

3.2. Corrección geométrica

La corrección geométrica de la imagen se abordó a partir de la obtención de puntos homólogos imagen-mapa, aplicándose funciones de transformación que consideran simultáneamente todas las fuentes de error, asumiendo que esos puntos de control son representativos de la deformación geométrica que tiene la imagen (Chuvieco, 2002). La imagen fue corregida geométricamente utilizando como referencia la red de vías terrestres (carreteras, terracerías y brechas) correspondientes al conjunto de datos topográficos vectoriales escala 1:250.000, que fueron elaborados con una proyección UTM, con NAD27 como sistema de referencia geodésico, y con el esferoide de Clarke de 1866. Se ubicaron para el área de trabajo 80 puntos de control.

Se determinaron las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y los datos de referencia, usando un modelo lineal polinómico. La calidad general de ajuste se evaluó a través del error medio cuadrático, que se calculó en 0,49 píxeles en x y 0,41 en y . Para la transferencia de los datos originales se utilizó el método del vecino más próximo. En ese proceso se hizo también un recorte de la imagen de acuerdo a los límites del área de estudio y se aplicó un remuestreo para generar píxeles con una resolución espacial de 50 x 50 metros. El resultado fue una subescena de la imagen que cubre el área de estudio y comprende seis bandas o canales (1, 2, 3, 4, 5 y 7) de 2640 píxeles y 2228 líneas cada una.

3.3. Corrección del sombreado topográfico

La utilización de imágenes de satélite en zonas montañosas requiere una corrección previa del efecto del sombreado topográfico, es decir, una corrección topográfica que disminuya apropiadamente la radiancia de las zonas más iluminadas y la aumente en las que han recibido menor radiación solar. La compensación de esa diferente iluminación solar, que causa una alta variación en la reflectividad para tipos de vegetación similares, se puede realizar a partir de varios métodos. Casi todos parten de un modelo de iluminación de la zona, generado a partir del modelo digital del terreno. La fórmula habitualmente utilizada para ello es (Chuvieco, 2002):

$$IL = \cos \gamma_i = \cos \theta_p \cos \theta_z + \sin \theta_p \sin \theta_z \cos (\Phi_a - \Phi_o)$$

donde γ_i indica el ángulo de incidencia de los rayos solares, θ_p es el ángulo de la pendiente, θ_z es el ángulo cenital solar; Φ_a es el ángulo acimutal solar y Φ_o es el ángulo de orientación de la pendiente. Los datos solares se tomaron de la cabecera de la imagen para igualar las condiciones del sombreado a las observadas por el sensor. El ángulo de elevación solar era 53,334 grados y el acimutal solar 133,491 grados. El MDE, con resolución espacial de 100x100 m, fue generado por el INEGI a partir de las curvas de nivel de la Carta Topográfica escala 1:250.000. Lamentablemente, no se pudo disponer de una cartografía topográfica digital más detallada.

Tras el cálculo del sombreado topográfico, la corrección de iluminación puede basarse en modelos Lambertianos y no Lambertianos, según que consideren o no la reflectividad como hemisférica. Para este trabajo aplicamos un método lambertiano propuesto por Civco (1989):

$$ND'_{ij} = ND_{ij} + (ND_{ij} * (IL_m - IL_{ij}) / IL_m)$$

donde ND'_{ij} es el valor de salida del píxel corregido, ND_{ij} valor de entrada de ese mismo píxel, IL_m el valor medio de la imagen de iluminación y IL_{ij} el valor de iluminación para ese píxel.

El resultado puede verificarse comparando la variación de los valores digitales de los píxeles de antes y después de la corrección topográfica. Si la corrección es adecuada, se reduce la variabilidad interna de los valores digitales de los píxeles localizados en diferentes posiciones topográficas, ya que ésta implica una homogeneización de las condiciones de iluminación (Riaño et al., 2002). En nuestro caso, para verificar la corrección topográfica de la imagen se delimitaron visualmente diez áreas que reunieran las condiciones siguientes: estar en la zona topográfica más accidentada; presentar una cobertura vegetal homogénea y estar en diferentes condiciones de

pendiente o en exposición del terreno. En estas diez áreas se obtuvo la desviación típica, para las bandas originales y para las bandas con corrección topográfica.

3.4. Selección de las áreas de entrenamiento

El siguiente paso fue la selección de sitios de muestreo de campo, que se realizó apoyándose inicialmente en una clasificación no supervisada, con el fin de conocer la variabilidad espectral que presentaba la imagen. Además, se tomó en cuenta la existencia y distribución de las vías de acceso terrestre como carreteras, tercerías y brechas. La clasificación no supervisada de la imagen se basó en las seis bandas reflectivas de la imagen ETM+, empleándose para el agrupamiento el algoritmo ISODATA (Chuvieco, 2002). Como resultado de la clasificación se obtuvieron 24 clases espectrales. Para cada clase espectral se seleccionaron varias áreas de entrenamiento a visitar en terreno, siempre que estuvieran cerca de una vía de acceso. A la clasificación resultante se le superpusieron los datos vectoriales de caminos y se obtuvieron las coordenadas x , y del centroide del área o del punto más cercano a él. De esta manera se seleccionaron áreas que fueran accesibles para el trabajo de campo, que fueron marcadas sobre una composición en color (bandas 5, 4 y 3 en RGB) y las hojas 1:50.000 de la zona. De esta manera, los puntos seleccionados cumplían dos condiciones: correspondían a las áreas más grandes de las clases espectrales, y se localizaban cerca de alguna vía de comunicación terrestre.

3.5. Trabajo de campo

La información recabada comprendió datos sobre el tipo de cobertura, estructura horizontal y vertical de la vegetación, altura y continuidad vertical de los estratos. Se recabó información de 68 puntos de muestreo. Otros no fueron visitados por estar los caminos en malas condiciones y ya fuera de uso, debido a que cambian frecuentemente de acuerdo a la extracción de madera y, por lo tanto, la carta topográfica se desactualiza rápidamente. En la [figura 3](#) se muestra la ubicación de los puntos visitados.

3.6. Definición de leyenda para tipos de combustible

La definición se realizó con el resultado del trabajo de campo y la información sobre la cobertura del suelo existente (Carta de Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:250.000, elaborada por INEGI). Además, se tomó como base el sistema de clasificación de tipos de combustible empleado en el Proyecto Prometheus (<http://www.algo.com.gr/>), cuyo principal criterio de clasificación es el elemento de propagación de los incendios y tiene tres grandes grupos: pastizal, matorral y hojarasca del Suelo (Riaño, 2002). En la [tabla 1](#) se da una breve descripción de los tipos de combustible y los tipos de cobertura equivalentes o correspondientes. Aunque nuestro objetivo último era la cartografía de tipos de combustible, empleamos como definición temática intermedia las clases de cobertura, ya que las coberturas permiten una definición espectral más coherente que los tipos de combustible. Éstos se diferencian, no tanto por la especie, como por la abundancia, continuidad vertical y horizontal, que no son siempre directamente discriminables a partir de la imagen. De ahí

que optáramos por esta clasificación de cobertura como paso previo a la cartografía de tipos de combustible. Las equivalencias entre coberturas y tipos de combustible aparecen en la [tabla 4](#).

3.7. Análisis exploratorio de bandas

Se realizó un análisis exploratorio con la finalidad de conocer cual era la combinación de bandas que permitiría discriminar mejor las cubiertas del suelo y tipos de combustible. Se efectuó la clasificación de la imagen con un enfoque no supervisado empleando diferentes combinaciones de bandas corregidas de ETM+, datos derivados y datos auxiliares. Los datos utilizados en las combinaciones para la clasificación fueron los siguientes:

Bandas ETM corregidas:

- 6 ETM. Seis bandas reflectivas.
- 5 ETM. Igual que el anterior, pero sin considerar la banda 7.

Bandas derivadas:

- NDVI. Índice de Vegetación Normalizada cuya formula es
$$\text{NDVI} = (\text{Banda 4} - \text{Banda 3}) / (\text{Banda 4} + \text{Banda 3}).$$
- NDII. Índice de Vegetación de Infrarrojo, cuya formula es
$$\text{NDII} = (\text{Banda 4} - \text{Banda 5}) / (\text{Banda 4} + \text{Banda 5}).$$
- Homogeneidad C2. Una imagen de Homogeneidad derivado de la matriz de concurrencia para una ventana de 3x3 píxeles de la banda 2 corregida.
- Desviación Típica C2. Una imagen de desviaciones típicas sobre la banda 2, derivadas de una ventana móvil de 3x3 píxeles.
- Homogeneidad del CP1. Imagen derivada del análisis de textura (Homogeneidad) del Primer Componente Principal generado a partir de las seis bandas reflectivas.
- Desviación Típica del CP1. Imagen derivada del análisis de textura (Desviación Típica) del Primer Componente Principal generado a partir de las seis bandas no térmicas corregidas de ETM+.

Bandas topográficas:

- Pendiente. Imagen formada con los datos de pendiente del terreno medida en grados. Estos datos fueron derivados del Modelo Digital de Elevación a escala 1:250.000 clave G13-11.
- Iluminación. Imagen con datos relativos a la iluminación (con ángulo de elevación solar de 53,334 grados y un ángulo azimutal de 133,49°), generada en el proceso de la corrección topográfica de las bandas con el Modelo Digital de Elevación escala 1:250.000, clave G13-11.

La imagen fue clasificada de modo no supervisado con 30 combinaciones diferentes de las bandas mencionadas anteriormente, generándose clasificaciones con diferente número de clases espectrales. Posteriormente, cada resultado fue comparado con un mapa digital con áreas de "verdad de campo", en los cuales disponíamos del tipo de cobertura en terreno. Así fue posible cruzar los resultados de cada intento de clasificación con la información de campo, de cara a identificar qué combinaciones de bandas ofrecían mejor discriminación de tipos de cobertura del suelo.

3.8. Clasificación de la imagen

A partir del muestreo en campo, fotografía aérea, y los resultados de la fase anterior, se seleccionaron las áreas de entrenamiento y validación definitivas ([tabla 2](#) y [figura 4](#)). Este laborioso proceso aseguraba que las clases resultantes tuvieran suficiente coherencia espectral, además de la temática. De estas áreas se tomaron las estadísticas básicas para realizar la agrupación: media, desviación típica, matriz de varianza-covarianza. Además, para evaluar la utilidad de las áreas de entrenamiento se generó la matriz de separabilidad entre clases a partir de la divergencia transformada.

Para clasificar la imagen se utilizó un algoritmo de máxima probabilidad (*Maximum Likelihood*), que se reconoce como uno de los más adecuados para clasificar imágenes, siempre que las variables de entrada sean cuantitativas y se ajusten a una distribución normal.

Para evaluar la imagen clasificada se determinaron áreas de verificación, que fueron ubicadas y delimitadas con ayuda de la interpretación visual de las fotografías aéreas y con la información obtenida en campo y los datos de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250.000 elaborada por INEGI. La [tabla 3](#) indica el número de áreas y píxeles para cada categoría o tipo de cobertura del suelo y la [figura 5](#) muestra la distribución geográfica. Finalmente, se generó una matriz de error con la imagen clasificada y con los sitios o áreas de verificación.

4. Resultados y discusión

4.1. Corrección por sombreado topográfico

El resultado de la corrección topográfica puede verificarse visualmente comparando las imágenes de antes y después de la corrección ([figura 6](#)). Puede observarse que las sombras presentes en la imagen original, debido al relieve, son menos evidentes en la imagen corregida. En cuanto a la verificación cuantitativa, la [tabla 5](#) muestra que las áreas delimitadas con diferentes condiciones topográficas presentaron una marcada tendencia a la homogenización de los datos, lo cual se manifiesta con la disminución de la desviación típica en cada una de las bandas (valores negativos). Sólo en la banda ETM 1 aumentó la variación (valores positivos). En la banda ETM 2 en un caso se presentó un aumento y en el resto de las bandas ocurrió una disminución en la variación. Estos resultados muestran que el proceso de corrección topográfica fue efectivo, ya que se redujo la heterogeneidad espectral causada por la exposición de las laderas. Estos resultados indican que el método, en este caso, no fue efectivo para la banda correspondiente a las longitudes de onda más cortas, en donde son más frecuentes los efectos de dispersión y absorción por los constituyentes atmosféricos y las condiciones que presentan.

4.2. Análisis exploratorio

En el desarrollo del análisis exploratorio se realizó la clasificación no supervisada de la imagen empleando 30 combinaciones de bandas con datos ETM, derivados y auxiliares. El resumen

del resultado de la clasificación se muestra en la [tabla 6](#). La tabla está formada por 30 filas, cada una de las cuales corresponde a una imagen clasificada. La columna 1 corresponde a la combinación de datos utilizada para obtener la clasificación, la columna 2 (Clases, número) indica el número de clases espectrales que presenta la imagen clasificada (30, 40 ó 50 clases). La columna 3 (Clases, +60%) señala cuales de esas clases espectrales presentaron un porcentaje de píxeles mayor de 60% para una cierta categoría de cubierta del suelo, lo que indica que esos grupos espectrales corresponden, *grosso modo*, a alguna de las clases temáticas de nuestra leyenda. La columna 4 (Clases, %) es el porcentaje de clases espectrales que tuvieron más del 60% de los píxeles para una categoría informativa, una variante de presentación de la tercera columna. La columna 5 (Categorías, Total) corresponde al número total de categorías informativas de cubierta del suelo que se pueden extraer de la imagen señalando como umbral el 60% de pertenencia. Las columnas 6 a 21 (Tipos de cobertura de 1 a 18) indican el número de la clase espectral con más del 60% de píxeles para cada tipo de cobertura del suelo).

El análisis exploratorio ayudó a determinar con qué combinación se lograba distinguir más fácilmente un mayor número de categorías de cubierta del suelo. La combinación considerada como más adecuada es aquella que presentó mayor número de categorías de cubierta del suelo (columna 5) y el mayor número o porcentaje de clases espectrales que presentaron una pertenencia superior al 60% con una cubierta del suelo (Columnas 3 y 4).

Parece deducirse de este análisis que la combinación de ocho canales, correspondiente a **6 ETM, NDVI y Pendiente**, es la más adecuada para separar tipos de cobertura en el área de estudio, ya que permite diferenciar el mayor número de clases espectrales con un significado temático claro, para distinto número de agrupaciones (30, 40 y 50 clases).

4.3. Matriz de separabilidad de áreas de entrenamiento

Las estadísticas resultantes de las áreas de entrenamiento, 57 áreas para 15 clases o categorías, incluyen la matriz de Divergencia Transformada que se muestra en la [tabla 7](#). En la matriz los valores mayores de 1,9 indican una separabilidad adecuada y 2 una separabilidad idónea. Con las clases establecidas, el valor mínimo fue de 1,923, correspondiente al Bosque con pastizal y Bosque de pino encino y matorral, y el valor máximo fue de 2,0. Con base en estos resultados las clases establecidas y las áreas de entrenamiento se consideraron aceptables para clasificar la imagen.

4.4. Evaluación de imagen clasificada

La evaluación de la imagen clasificada con las áreas de verificación permitió obtener la matriz de la [tabla 8](#), dicha matriz indica que para la imagen clasificada en tipos de cobertura el error total fue de 0,1672, con una fiabilidad global de 83,28%. Además, el índice Kappa fue de 0,7399, lo que puede interpretarse como un resultado consistente y significativo. En esta clasificación, el pastizal natural e inducido se confunde con las áreas agrícolas. Pensamos que esta confusión se debe a dos razones: por un lado, el pastizal presenta baja cobertura y el suelo pueda estar influyendo en la respuesta espectral, y, por otro, las áreas agrícolas incluyen pastizal inducido cuando no se

practica algún cultivo o las parcelas presentan rastrojo del cultivo de la cosecha anterior. El error que se presenta con el pastizal con matorral o bosque, puede deberse a la cobertura variable del matorral y el criterio personal utilizado para separarlo del pastizal sin matorral o bosque.

A partir de la imagen clasificada en tipo de cobertura del suelo se elaboró el mapa de tipos de combustible, agrupando o reclasificando las coberturas en los siete tipos definidos en la leyenda Prometheus, tal como se indicó en la [tabla 4](#). Los valores de equivalencia de esta tabla fueron aplicados a la imagen clasificada y al mapa con las áreas de evaluación para poder obtener el mapa de tipos de combustible y poder hacer la evaluación correspondiente. La matriz de error resultante se incluye en la [tabla 9](#). El error total fue de 0,0978, lo que supone un 90,22% de fiabilidad global, con un índice Kappa de 0,8079. Los valores pueden considerarse muy satisfactorios, si los comparamos con otros estudios similares publicados. La matriz de confusión nos indica que la categoría del Tipo 2 (matorral menor de 60 cm.) presenta un valor de error de comisión muy alto (0,8241), ya que se observa una notable confusión con el Tipo 7 (arbolado con matorral en el sotobosque, en este caso Selva baja caducifolia). Este error proviene de la confusión que presenta la clasificación de tipos de cobertura del suelo, por lo que aplicamos una regla post-clasificación para solventar algunos de estos problemas.

Por un lado, se apreciaba que la Selva baja caducifolia quedaba clasificada en zonas que no contaban con las características ecológicas más propicias para su desarrollo. Sabemos que este tipo de bosque tiene una distribución en lugares cálidos y semicálidos, que en el área de trabajo están localizados en altitudes menores de 1700 metros. Por tanto, se introdujo un criterio condicional a partir de umbrales de altitud y del mapa de cobertura, de cara a solventar algunas confusiones espectrales. La [figura 7](#) muestra el proceso realizado.

También se observó que existían píxeles de zona urbana en áreas donde no existían asentamientos humanos, que correspondieron a áreas sin vegetación. Su delimitación y corrección se logró mejorar utilizando una banda en la que se indicaron como umbrales las zonas cercanas a los asentamientos humanos (1000 m de radio en los asentamientos con menos de 2500 habitantes y 2500 m de radio en los asentamientos con más de 2500 habitantes) como se muestra en el diagrama de la [figura 8](#).

Una vez realizados los procesos anteriores de subdivisión de clases espectrales, la imagen clasificada y modificada con tipos de cobertura del suelo fue evaluada utilizando las áreas de verificación y generando una matriz de error. El mapa de tipos de cobertura se presenta en la [figura 9](#). Una vez obtenida y evaluada la imagen clasificada y modificada se procedió a reclasificarla para generar el mapa de tipos de combustible ([figura 10](#)) utilizando la tabla de equivalencia anteriormente descrita.

La matriz de confusión resultante ([tabla 10](#)) ofrece un valor pequeño de error (0,0791), con una fiabilidad global de 92,09%. La matriz también indica que los Tipos 2 (matorral menor de 60 cm.) y 4 (matorral mayor de 2 m), son los que presentaron mayor error de comisión, con valores próximos a 0,4. Esta confusión espectral entre la altura de los matorrales se debe a la dificultad de detectar diferencias de altura con este tipo de imágenes de satélite. El índice total Kappa alcanza un valor muy alto (0,8681), lo que indica que los resultados son significativamente mejores a los que puedan obtenerse aleatoriamente.

5. Conclusiones

La metodología propuesta permitió generar un mapa de tipos de combustibles ([figura 10](#)) con un nivel de fiabilidad aceptable para su aplicación a nivel regional. Este método puede aplicarse a otras regiones ecológicas de difícil acceso y obtener información confiable y económica.

El análisis exploratorio para encontrar la mejor combinación de bandas consumió tiempo y esfuerzo, pero aportó resultados satisfactorios para lograr los objetivos del trabajo. De ese análisis se determinó que para obtener los mejores resultados era recomendable utilizar la combinación de las seis bandas ETM+ no térmicas, un índice de vegetación normalizado (NDVI) y la pendiente del terreno. Esta clasificación obtuvo una tasa de fiabilidad próxima al 85%. La imagen clasificada en forma no supervisada con la combinación fue una ayuda importante para la ubicación y selección definitiva de las áreas de entrenamiento. Para mejorar los resultados de la clasificación no supervisada se subdividieron varias clases espectrales tomando en cuenta la altitud del terreno y la cercanía a los asentamientos humanos, lo que supuso aumentar la fiabilidad final al 92%, que puede considerarse muy adecuada para este tipo de estudios.

Con los resultados obtenidos se puede considerar que la metodología puede ser aplicada a regiones con características similares y obtener resultados de confiabilidad y nivel de detalle aceptables.

En cuanto a mejoras futuras, algunos problemas que todavía se mantienen en la clasificación resultante podrían solventarse incluyendo imágenes de otras épocas del año, si bien no resulta sencillo obtener adquisiciones libres de nubes en esta zona. También convendría verificar si se mejoraría la clasificación de la imagen con otras técnicas de clasificación, como las Redes Neuronales Artificiales y Lógica Difusa.

Referencias bibliográficas

- Burgan, R.E., Klaver, R.W. y Klaver J.M. (1998): "Fuel models and fire potential from satellite and surface observations", *International Journal of Wildland Fire*, 8, pp. 159-170.
- Castro Ríos, R. y Chuvieco, E. (1998): "Modeling forest fire danger from geographic information systems", *Geocarto International*, 13, pp. 15-23.
- Chuvieco, E. (2002): *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel Ciencia, Barcelona, España.
- Chuvieco, E. y Martín, M.P. (2004, Eds.): *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Civco, D. L. (1989): "Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 19, pp. 2685-2704.
- Cosentino, M.J. y Estes, J.E. (1981): "Use of Landsat data to develop a fuels database for a wildland fire simulation model", *Pecora VII Symposium*. Sioux Falls, pp. 590-599.
- García Soto, E. (1973): *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México, D. F., Instituto de Geografía, UNAM.

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

- González-Alonso, F., Ustin, S. L., Gardner, A. y Palacios-Orueta, M. (1997): "Utilización de imágenes AVIRIS en la cartografía del combustible en el Chaparral de California", *Ecología*, 11, pp. 31-36.
- González Elizondo, S. (1983): "La vegetación de Durango", *Cuadernos de Investigación Tecnológica*, 1, 1. CIIDIR-IPN Unidad Durango, pp. 1-114.
- INEGI (1981): *Atlas del Medio Físico. Carta Fisiográfica, escala 1:1.000.000*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (2002): *Conjunto de datos de uso del suelo y vegetación (vectoriales), escala 1:250.000*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Kourtz, P. H. (1977): "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.
- Mather, P. (1987): *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. John Wiley and Sons.
- Rabii, H. (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*. Ph.D., Oregon, Oregon State University.
- Riaño, D. (2002): *Analysis and mapping of fuel properties from remote sensing and GIS*. Alcalá de Henares., Universidad de Alcalá (tesis doctoral inédita).
- Riaño, D., Salas, F.J. y Chuvieco, E. (2001): "Cartografía de modelos de combustible con teledetección: aportaciones a un desarrollo ambiental sostenible", *Estudios Geográficos*, 62, pp.309-333.
- Riaño, D., Chuvieco, E., Ustin, S. L., Zomer, R., Dennison, P., Roberts, D. y Salas, F. J. (2002): "Assessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains", *Remote Sensing of Environment*, 79, pp. 60-71.
- Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, F. J. y Aguado, I. (2003): "Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, pp. 1056-1061.
- Riaño, D., Meier, E., Allgöwer, B., Chuvieco, E. y Ustin, S.L. (2003): "Modelling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behaviour modelling", *Remote Sensing of Environment*, 86, 177-186.
- Riaño, D., Chuvieco, E., Condés, S., González-Matesanz, J. and Ustin, S.L. (2004): "Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from Lidar", *Remote Sensing of Environment*, 92, pp. 345-352.
- Root, R. R., Stitt, S. C. F., Nyquist, M. O., Waggoner, G. S. y Agee, J. K. (1986): "Vegetation and fire fuel models mapping of North Cascades National Park". *Proceedings of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing and American Congress on Surveying and Mapping*. Washington, D. C., pp. 75-85.
- Salas, F.J. y Chuvieco, E. (1994): "Sistemas de información geográfica y teledetección en la prevención de incendios forestales: un ensayo en el Macizo Oriental de la Sierra de Gredos", *Estudios Geográficos*, 40, pp. 683-710.
- Werth, L. F., McKinley, R. A. y Chine, E. P. (1985): "The use of wildland fire fuels maps produced with NOAA-AVHRR scanner data". En *Pecora X Symposium*, Fort Collins, pp. 326-331.

TABLAS

Tabla 1. Tipos de combustible y tipos de coberturas del suelo observadas en el área de estudio

Tipo	Nombre	Descripción	Tipo de cobertura del suelo del área de estudio
1	Combustibles del suelo	Pastizal	- Pastizal halófilo - Pastizal natural o inducido - Área agrícola - Pastizal con matorral - Pastizal con bosque
2	Combustibles de superficie (matorral)	Matorral (entre 0,3 – 0,6 m y con alto porcentaje de pastizal) y áreas cortadas, donde el rastrojo no fue removido.	- Matorral de <i>Quercus sp.</i> o chaparral
3	Matorrales de altura media	Incluye arbustos entre 0,6 y 2,0 m, así como árboles jóvenes resultantes de regeneración natural o forestación.	- Matorral secundario de varias especies, <i>Arctostaphylos sp.</i> - Matorral de <i>Opuntia sp.</i> , nopalera
4	Matorrales altos	Contiene matorrales altos (mayores de 2 m), y árboles de regeneración.	- Matorral y bosque bajo de encino pino -Bosque bajo <i>Quercus sp.</i> y/o <i>Pinus sp.</i>
5	Bosque sin combustibles de superficie	El combustible del suelo fue removido por quema o por medios mecánicos. Esta situación también puede ocurrir en doseles cerrados en los cuales la falta de luz solar inhibe el crecimiento de vegetación superficial.	- Bosque de <i>Pinus sp.</i> - Bosque denso de <i>Pinus sp.</i> y <i>Quercus sp.</i>
6	Bosque con combustibles de superficie	En este tipo de combustible la base del dosel está muy por encima de la capa de combustible superficial. El combustible consiste esencialmente en pequeños arbustos, pastizal, hojarasca y leña.	- Bosque – pastizal
7	Bosque con combustible de superficie pesados	Con una capa muy densa de combustible de superficie y con un pequeño espacio o hueco vertical a la base del dosel.	- Selva baja caducifolia (sin follaje verde en época seca del año)
	No combustible		- Zona urbana - Suelo desnudo - Cuerpo de agua

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

Tabla 2. Áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada de la imagen ETM+

Clase	Descripción	Número de polígonos	Número de píxeles
1	Pastizal halófilo	3	2136
2	Pastizal natural o inducido	3	2324
3	Área agrícola	4	1169
4	Pastizal con matorral o bosque	4	997
6	Matorral de <i>Quercus sp.</i>	3	232
7	Matorral secundario	2	289
8	Matorral de <i>Opuntia sp.</i>	3	204
10	Bosque bajo de encino	3	515
11	Matorral y Bosque bajo de pino encino	4	472
12	Bosque de pino y pino encino	16	1388
14	Bosque con pastizal	2	381
15	Selva baja caducifolia	5	959
16	Zona urbana	2	309
17	Suelo desnudo	1	7882
18	Cuerpo de agua	2	2912
Total		57	22176

Tabla 3. Número de áreas de verificación y píxeles para cada tipo de cobertura del suelo para clasificar la imagen ETM+

No.	Tipo de cobertura del suelo	Número de áreas	Número de píxeles
1	Pastizal halófilo	2	960
2	Pastizal natural o inducido	16	3412
3	Área Agrícola	19	7924
4	Pastizal con matorral y/o bosque	52	10112
6	Matorral de <i>Quercus</i>	3	232
7	Matorral secundario	15	1596
8	Matorral de <i>Opuntia</i>	3	204
10	Bosque bajo de encino	13	914
11	Bosque bajo de encino pino	4	472
12	Bosque de pino y pino encino	90	50342
14	Bosque con pastizal	2	369
15	Selva baja caducifolia	22	8318
16	Zona urbana	5	1663
17	Suelo desnudo	3	444
18	Cuerpo de agua	7	2149
	Total	256	89111

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

Tabla 4. Equivalencias entre tipos de cobertura del suelo y tipos de combustible

No.	Tipo de cobertura del suelo	Tipo de combustible
1	Pastizal halófilo	Tipo 1
2	Pastizal natural o inducido	
3	Área Agrícola	
4	Pastizal con matorral y/o bosque	
6	Matorral de <i>Quercus</i>	Tipo 2
7	Matorral secundario	Tipo 3
8	Matorral de <i>Opuntia</i>	
10	Bosque bajo de encino	Tipo 4
11	Bosque bajo de encino pino	
12	Bosque de pino y pino encino	Tipo 5
14	Bosque con pastizal	Tipo 6
15	Selva baja caducifolia	Tipo 7
16	Zona urbana	No Combustible (8)
17	Suelo desnudo	
18	Cuerpo de agua	

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

Tabla 5. Diferencia en la desviación típica en los datos en las bandas ETM, antes y después de la corrección topográfica, para 10 áreas seleccionadas con selva baja caducifolia y bosque de pino encino

Sitio	Tipo de cobertura vegetal	Banda	ETM 1	ETM 2	ETM 3	ETM 4	ETM 5	ETM 7
1	Selva Baja Caducifolia	Original	5,09403	6,19254	10,06978	6,06692	15,50872	12,26613
		Corregida	6,52272	5,32236	7,04877	4,90072	11,16696	8,53229
		Diferencia	1,42869	-0,87018	-3,02101	-1,1662	-4,34176	-3,73384
2	Selva Baja Caducifolia	Original	7,08668	10,1279	16,78041	12,04928	32,97207	22,33499
		Corregida	11,16377	6,80822	10,26295	7,03904	21,89472	15,2119
		Diferencia	4,07709	-3,31968	-6,51746	-5,01024	-11,0774	-7,12309
3	Selva Baja Caducifolia	Original	9,57916	13,24085	20,60168	12,04085	34,16543	27,97234
		Corregida	5,00698	7,51343	12,25095	6,77474	20,92656	17,28537
		Diferencia	-4,57218	-5,72742	-8,35073	-5,26611	-13,2389	-10,68697
4	Selva Baja Caducifolia	Original	3,78749	4,59438	7,51597	5,19666	10,751	7,28693
		Corregida	3,32995	3,77216	6,14249	4,31138	8,89252	5,89504
		Diferencia	-0,45754	-0,82222	-1,37348	-0,88528	-1,85848	-1,39189
5	Selva Baja Caducifolia	Original	6,68546	9,16973	15,54978	11,98143	28,99589	20,68568
		Corregida	15,06691	9,07275	10,12805	7,53256	20,32315	13,96949
		Diferencia	8,38145	-0,09698	-5,42173	-4,44887	-8,67274	-6,71619
6	Bosque de pino encino	Original	5,35432	7,04652	11,41791	12,07826	20,3383	13,82929
		Corregida	6,54508	4,98872	7,78871	5,57854	15,27646	11,46581
		Diferencia	1,19076	-2,0578	-3,6292	-6,49972	-5,06184	-2,36348
7	Bosque de pino encino	Original	3,72181	4,63777	7,46026	6,43869	11,85225	9,92786
		Corregida	4,67424	4,58595	6,97729	4,63422	10,92889	9,58972
		Diferencia	0,95243	-0,05182	-0,48297	-1,80447	-0,92336	-0,33814
8	Bosque de pino encino	Original	2,65707	3,3432	5,19418	7,54103	10,47578	7,58159
		Corregida	5,38302	3,61643	4,59757	4,54255	8,20577	6,65719
		Diferencia	2,72595	0,27323	-0,59661	-2,99848	-2,27001	-0,9244
9	Bosque de pino encino	Original	3,34639	4,54213	7,07114	10,80468	13,86089	9,07638
		Corregida	3,76439	2,79366	5,09702	6,68772	9,31184	6,72681
		Diferencia	0,418	-1,74847	-1,97412	-4,11696	-4,54905	-2,34957
10	Bosque de pino encino	Original	3,40316	4,16076	6,55175	8,7774	12,34611	9,29296
		Corregida	5,74425	4,06002	5,90616	4,76305	10,17031	8,50243
		Diferencia	2,34109	-0,10074	-0,64559	-4,01435	-2,1758	-0,79053

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

Tabla 6. Relación de los tipos de cubierta y tipos de combustible con las clases espectrales de las imágenes clasificadas con 10 diferentes combinaciones de datos

TIPO DE COBERTURA DEL SUELO	TIPO DE COMBUSTIBLE			Pastizal halófilo		Pastizal natural o inducido		Área agrícola	Pastizal con matorral y/o bosque		Matorral de Quercus		Matorral secundario		Matorral de Opuntia		Bosque bajo de encino		Matorral y Bosque bajo mixto		Bosque de pino encino		Bosque con pastizal		Selva baja caducifolia		Zona urbana		Suelo desnudo		Cuerpo de agua	
	Combinación para la clasificación	Clases			Te1		Te2		Te3		Te4		Te5		Te6		Te7		NC													
		Núm.	+60%	%	Categoría		1	2	3	4	6	7	8	10	11	12	14	15	16	17	18											
1 6 ETM y NDVI	30	14	47	7	1	1	1	1							5													3	2			
	40	25	63	8	2	3	3	2							7		1										4	3				
	50	31	62	8	3	3	4	2							9		1										6	3				
2 6 ETM y NDII	30	18	60	7	1	1	3	1							6												4	2				
	40	24	60	7	1	3	3	2							8												5	2				
	50	27	54	7	3	3	2	2							8												6	3				
3 6 ETM y Pendiente	30	14	47	6	1		1	1							7												2	2				
	40	25	63	8	1	2	2	3							10		3										2	2				
	50	34	68	9	2	1	3	4							10		5	1								5	3					
4 6 ETM, NDII y Desviación Típica del CPI	30	12	40	6	1	2		1							5												2	1				
	40	27	68	8	1	2	2	2							6											1	4	1				
	50	33	66	8	2	2	3	3							7											1	5	2				
5 6 ETM, NDVI y Pendiente	30	19	63	7	1	1		2							9		2										2	2				
	40	26	65	7	1		2	3							11		5									1	3					
	50	34	68	8	2	2	2	3							15		7									1	2					
6 5 ETM, NDVI y Pendiente	30	17	57	8	1	1	1	2							7		2										2	1				
	40	24	60	5				4							12		5										1	2				
	50	34	68	7	1		2	4							16		7									1	3					
7 5 ETM y NDII	30	16	53	7	1	1	1	1							8												1	3				
	40	27	68	8	1	1	2	2							14		1									1	5					
	50	31	62	8	2	2	1	1							13		2									4	6					
8 5 ETM, NDII y Pendiente	30	18	60	7	1		1	2							10		2										1	1				
	40	30	75	5				3							15		5									1	1					
	50	34	68	8	2	2	2	5							15		5									2	1					

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

Tabla 7. Matriz de separabilidad con Divergencia Transformada de las áreas de entrenamiento de 15 tipos de cobertura del suelo

		1	2	3	4	6	7	8	10	11	12	14	15	16	17
		Pasto Hal.	Pastizal nautral	Agrícola	Pastizal m-b	M, Quercus	Matorral Secund.	M, Opuntia	B, bajo Encino	B, bajo qp	B, pino y pq	B, pastizal	Selva	Z, urbana	Suelo
2	Pastizal Natural	2,000000													
3	Agrícola	1,999864	1,999807												
4	Pastizal m-b	2,000000	1,975756	2,000000											
6	M, Quercus	2,000000	2,000000	2,000000	1,992935										
7	Matorral Secund.	2,000000	1,999985	2,000000	1,932550	1,946967									
8	M, Opuntia	2,000000	1,987486	1,998290	1,942307	2,000000	1,999990								
10	B, bajo Encino	2,000000	2,000000	2,000000	1,999975	1,999445	2,000000	2,000000							
11	B, bajo Qp	2,000000	2,000000	2,000000	1,944749	1,977115	1,999962	1,999520	1,999503						
12	B, pino y pq	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	1,999279	1,968827					
14	B, Pastizal	2,000000	1,999967	2,000000	1,998687	2,000000	2,000000	1,999447	2,000000	1,923560	2,000000				
15	Selva	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	1,999961	2,000000	2,000000	1,999963	2,000000	1,999961	2,000000			
16	Z, Urbana	2,000000	2,000000	1,953176	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000		
17	Suelo	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	
18	Agua	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000	2,000000

Tabla 8. Matriz de confusión obtenida de la imagen clasificada en cobertura del suelo y las áreas de verificación.

		ÁREAS DE EVALUACIÓN																	
T. COMB		T 1				T 2		T 3		T 4		T 5	T 6	T 7	N C				
T. COBER		1	2	3	4	6	7	8	10	11	12	14	15	16	17	18	Total	ErrorC	
I M A G E N C L A S I F I C A D A	1	948	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	954	0,0063	
	2	0	2892	2479	2019	0	38	0	0	6	96	4	7	10	4	18	7573	0,6181	
	3	2	30	3941	529	0	1	5	0	0	13	0	0	528	0	2	5051	0,2198	
	4	0	224	215	4533	9	0	1	0	6	95	0	147	0	8	0	5238	0,1346	
	6	0	24	24	0	201	0	0	0	7	24	0	818	0	45	0	1143	0,8241	
	7	0	10	65	255	0	313	0	0	0	2	0	64	0	0	0	709	0,5585	
	8	0	4	0	93	0	682	197	0	0	0	0	1	0	0	1	978	0,7986	
	10	0	13	17	215	0	26	0	903	0	68	0	797	0	64	0	2103	0,5706	
	11	0	74	46	0	9	329	0	0	393	0	0	77	0	9	8	945	0,5841	
	12	0	20	200	2076	1	97	1	8	38	49940	0	198	0	5	4	52588	0,0504	
	14	0	0	12	0	0	0	0	0	22	80	365	6	0	0	0	485	0,2474	
	15	0	88	20	372	12	106	0	3	0	2	0	6202	0	46	111	6962	0,1092	
	16	3	33	905	19	0	4	0	0	0	22	0	1	1120	0	1	2108	0,4687	
	17	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	263	0	270	0,0259	
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2004	2004	0
	Total		960	3412	7924	10112	232	1596	204	914	472	50342	369	8318	1663	444	2149	89111	
	ErrorO		0,0125	0,1524	0,5027	0,5517	0,1336	0,8039	0,0343	0,012	0,1674	0,008	0,0108	0,2544	0,3265	0,4077	0,0675		0,1672

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

Tabla 9. Matriz de confusión del mapa de combustibles obtenido a partir de los tipos de cobertura

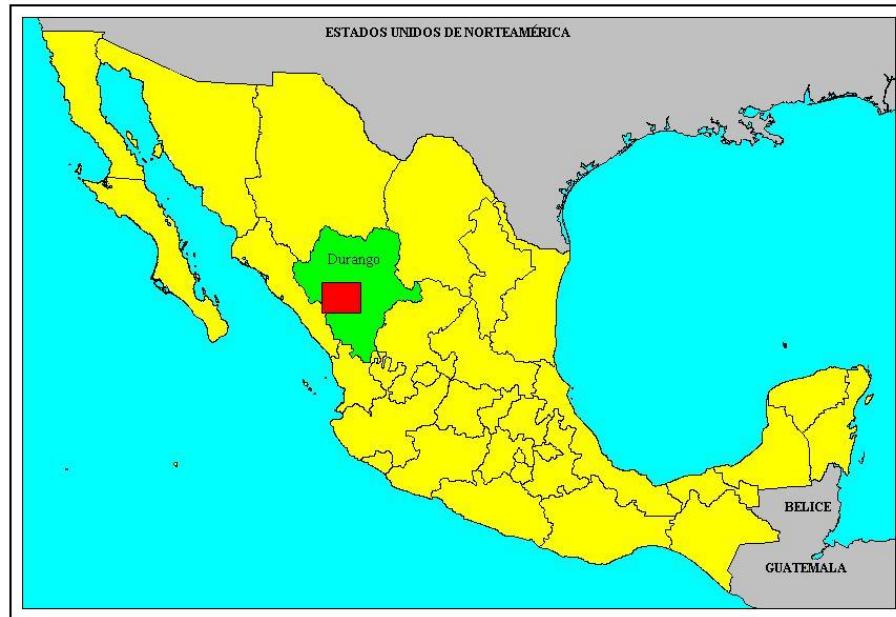
Tipos de Combustible		Áreas de evaluación								Total	ErrorC
		1	2	3	4	5	6	7	8		
Imagen Clasificada	1	17813	9	45	12	204	4	154	575	18816	0,0533
	2	48	201	0	7	24	0	818	45	1143	0,8241
	3	427	0	1192	0	2	0	65	1	1687	0,2934
	4	365	9	355	1296	68	0	874	81	3048	0,5748
	5	2296	1	98	46	49940	0	198	9	52588	0,0504
	6	12	0	0	22	80	365	6	0	485	0,2474
	7	480	12	106	3	2	0	6202	157	6962	0,1092
	8	967	0	4	0	22	0	1	3388	4382	0,2268
Total		22408	232	1800	1386	50342	369	8318	4256	89111	
ErrorO		0,2051	0,1336	0,3378	0,0649	0,008	0,0108	0,2544	0,2039		0,0978


Tabla 10. Matriz de confusión del mapa de combustibles final (tipos de cobertura e información auxiliar)

Tipos de Combustible		Áreas de evaluación								Total	ErrorC
		1	2	3	4	5	6	7	8		
Imagen Clasificada	1	18288	9	47	12	225	4	8	576	19169	0,0460
	2	48	201	0	7	24	0	89	45	414	0,5145
	3	427	0	1192	0	2	0	65	1	1687	0,2934
	4	365	9	355	811	0	0	77	81	1698	0,5224
	5	2296	1	98	46	49940	0	198	9	52588	0,0504
	6	12	0	0	22	80	365	6	0	485	0,2474
	7	480	12	106	488	70	0	7875	157	9188	0,1429
	8	492	0	2	0	1	0	0	3387	3882	0,1275
Total		22408	232	1800	1386	50342	369	8318	4256	89111	
ErrorO		0,1839	0,1336	0,3378	0,4149	0,0080	0,0108	0,0533	0,2042		0,0791

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

FIGURAS



 **Figura 1: Ubicación del área de estudio**

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

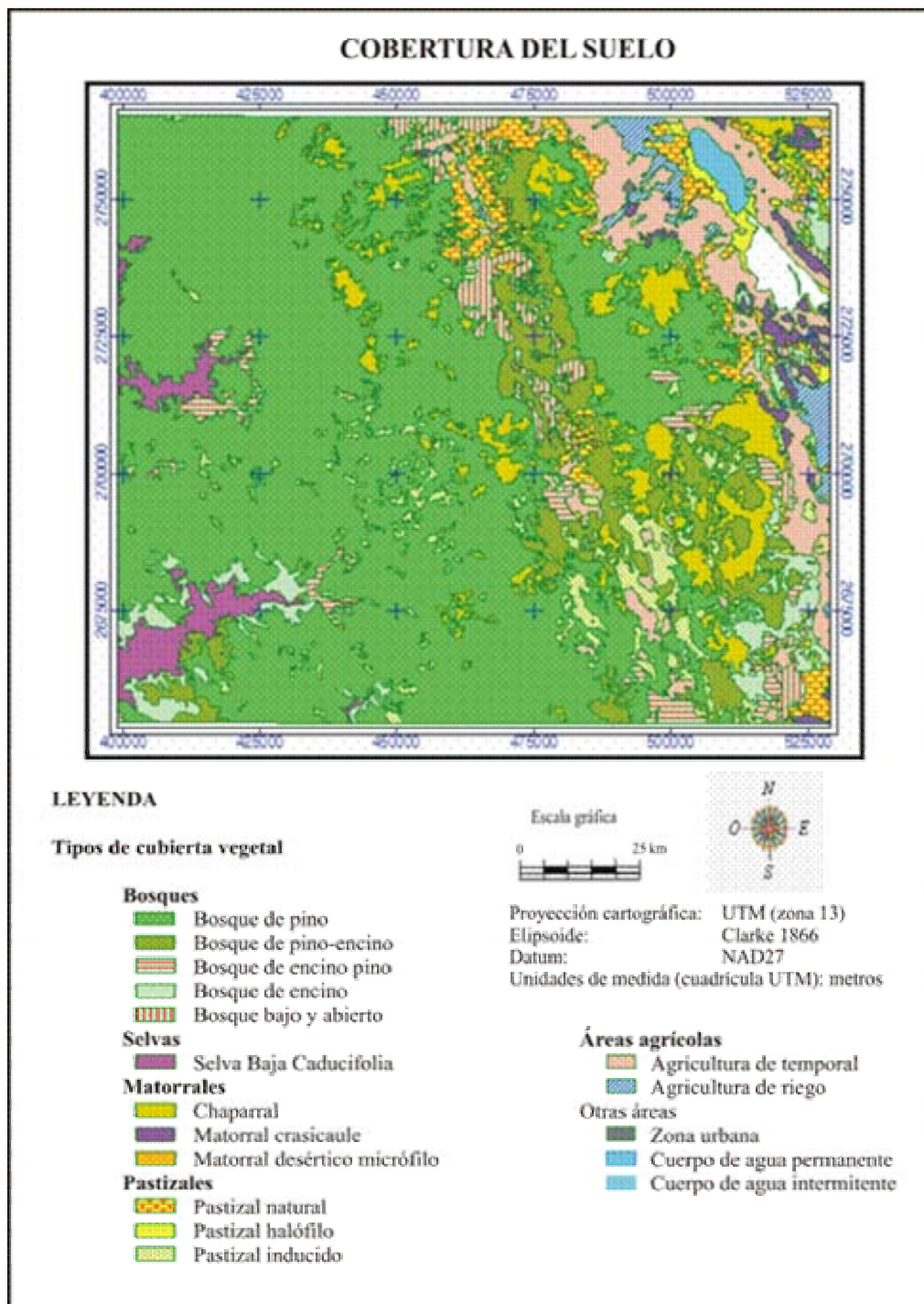


Figura 2. Mapa de tipos de cobertura del suelo y vegetación del área de estudio.

Fuente: Carta de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250.000 (INEGI, 2002).

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

PUNTOS VISITADOS EN CAMPO

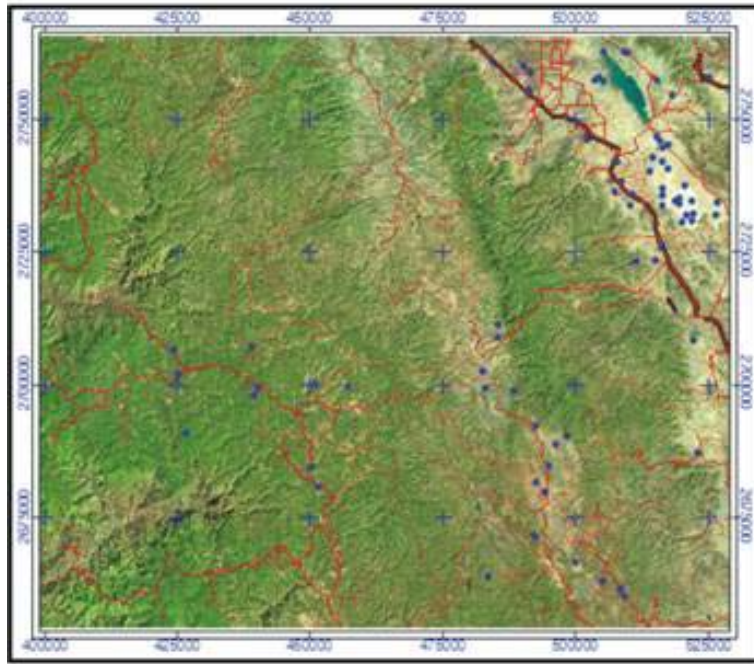


Figura 3. Subescena de la imagen ETM+ de Landsat del área de trabajo, donde se muestran los 68 sectores de muestreo visitados en campo.

ÁREAS DE ENTRENAMIENTO

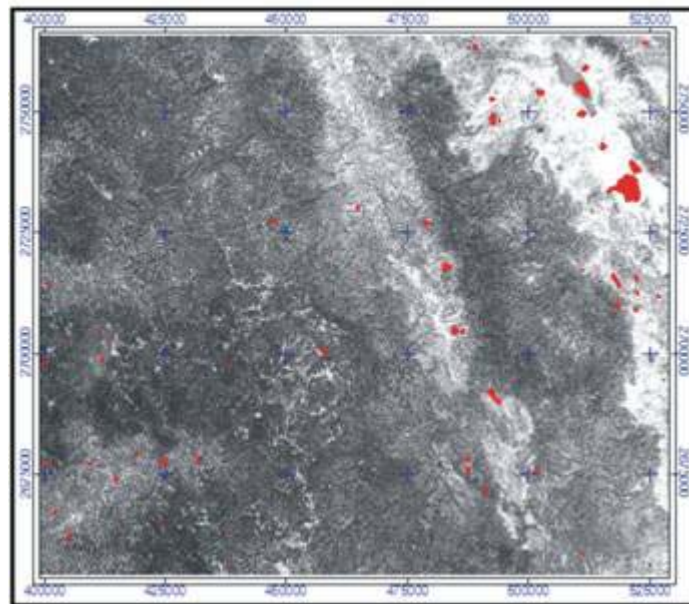


Figura 4. Distribución de las áreas de entrenamiento en color rojo sobre la banda ETM 3.

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

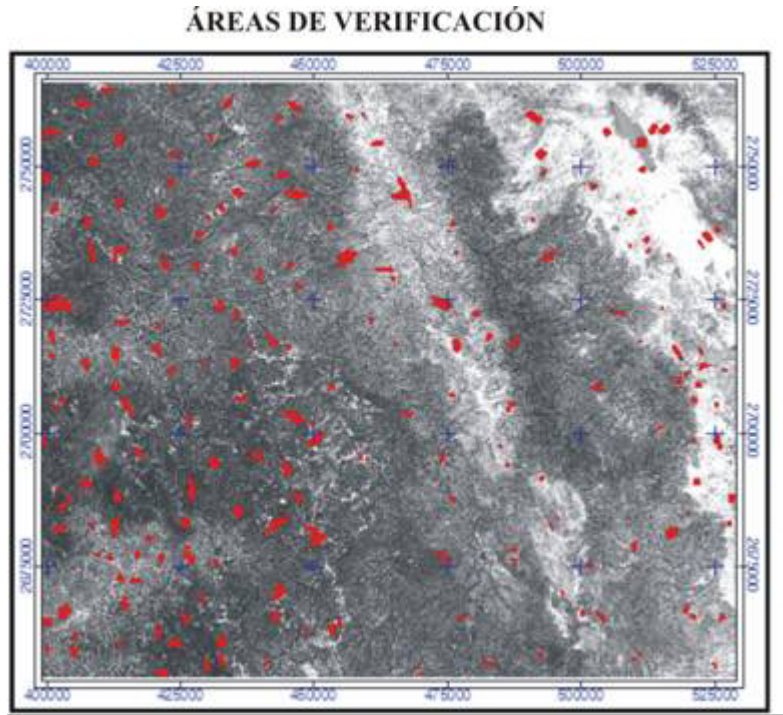


Figura 5. Distribución de las áreas de verificación marcadas sobre la banda ETM 3.

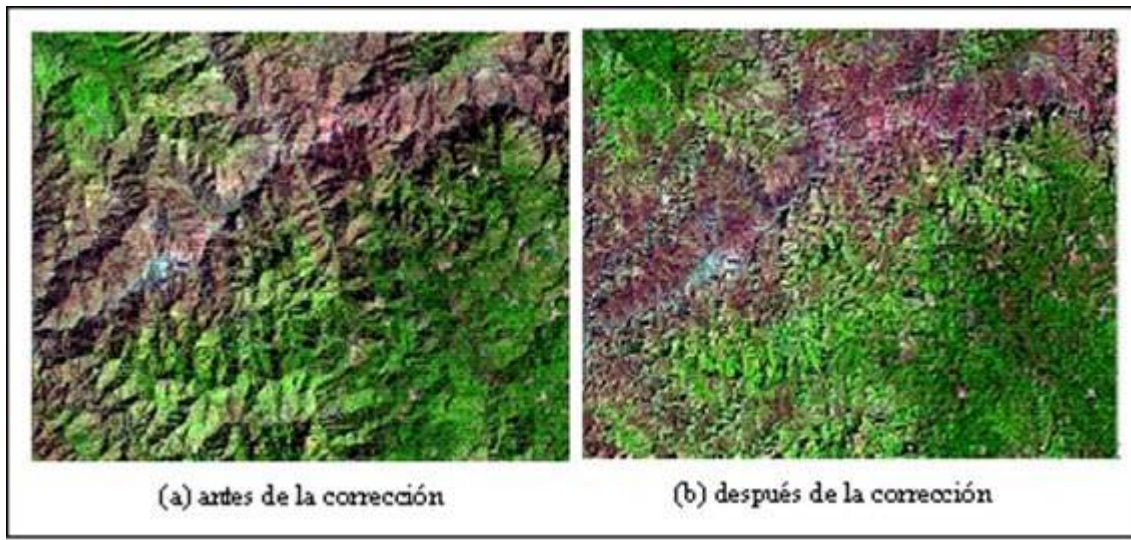


Figura 6. Secciones de la subimagen ETM antes (a) y después (b) de la corrección topográfica.

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

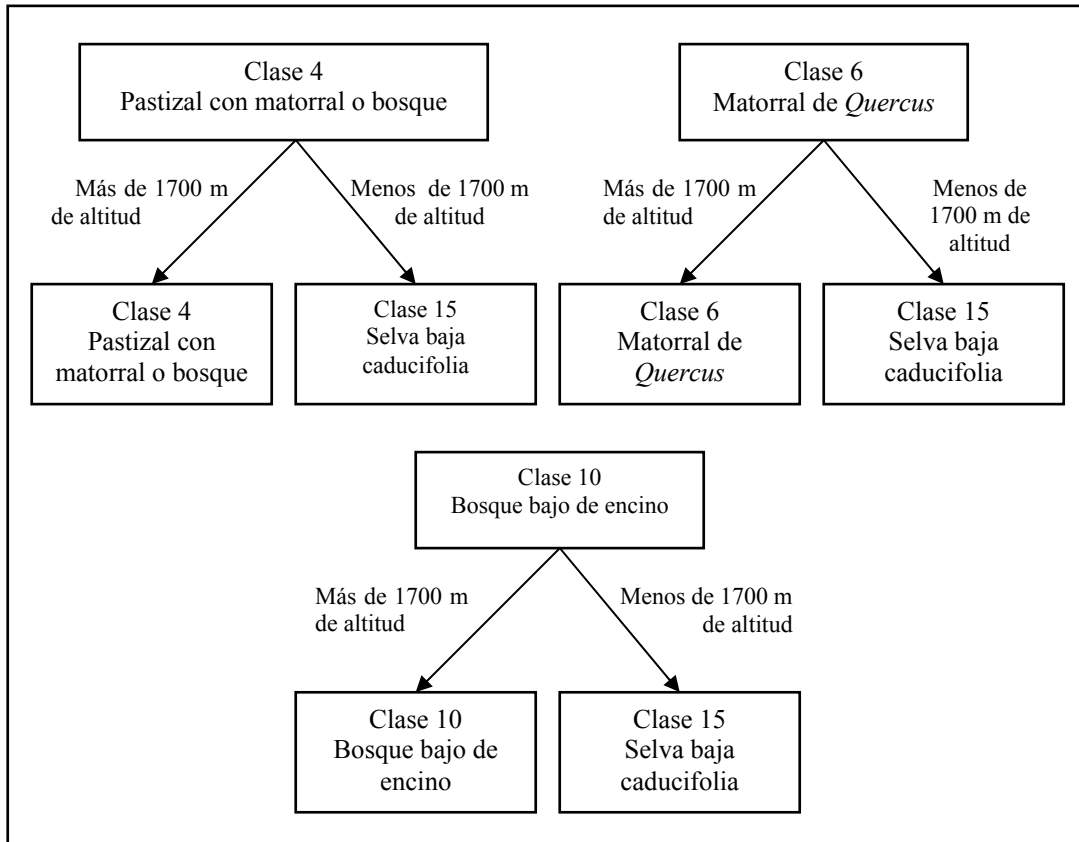


Figura 7. Diagramas con el criterio para subdividir clases espectrales en diferentes tipos de cobertura.

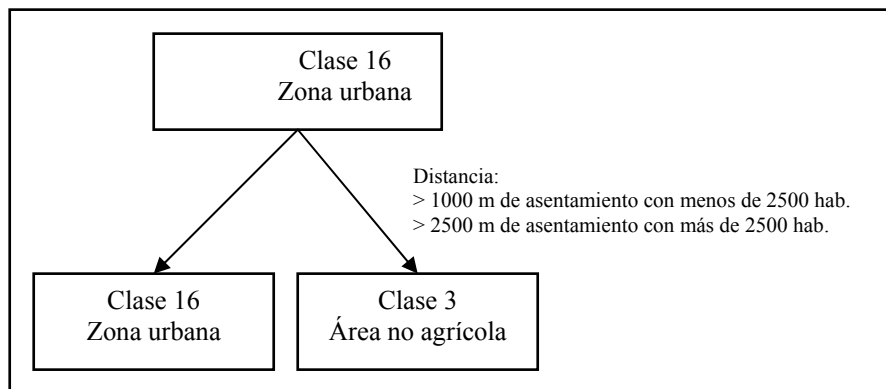


Figura 8. Diagrama del proceso de separación de las áreas agrícolas de las zonas de asentamientos humanos.

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

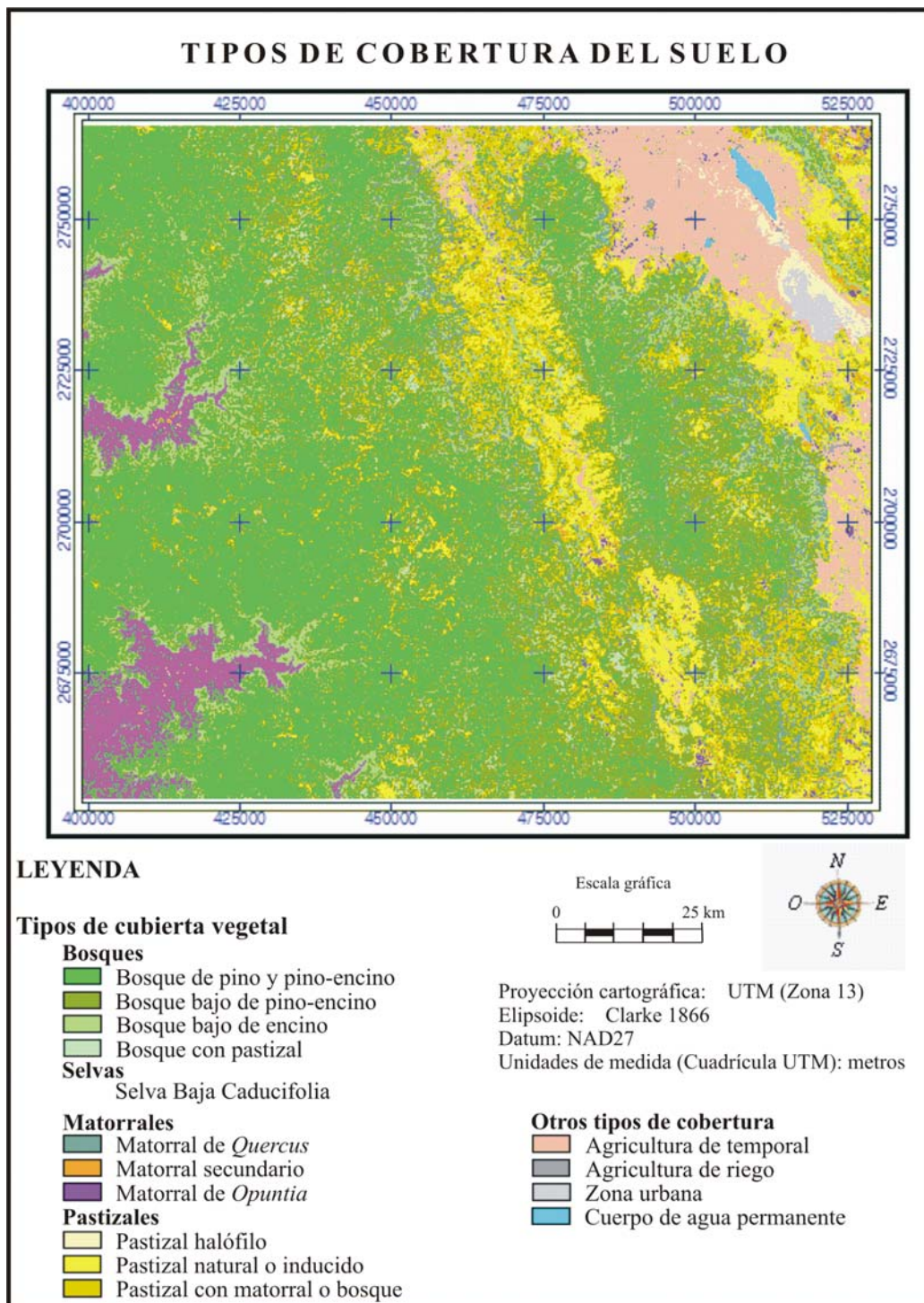


Figura 9. Mapa de cobertura del suelo.

Fuente: clasificación supervisada de imagen ETM de Landsat 7, con bandas derivadas y auxiliares.

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005) "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite", *GeoFocus* 5, n°5, p. 129-155. ISSN: 1578-5157

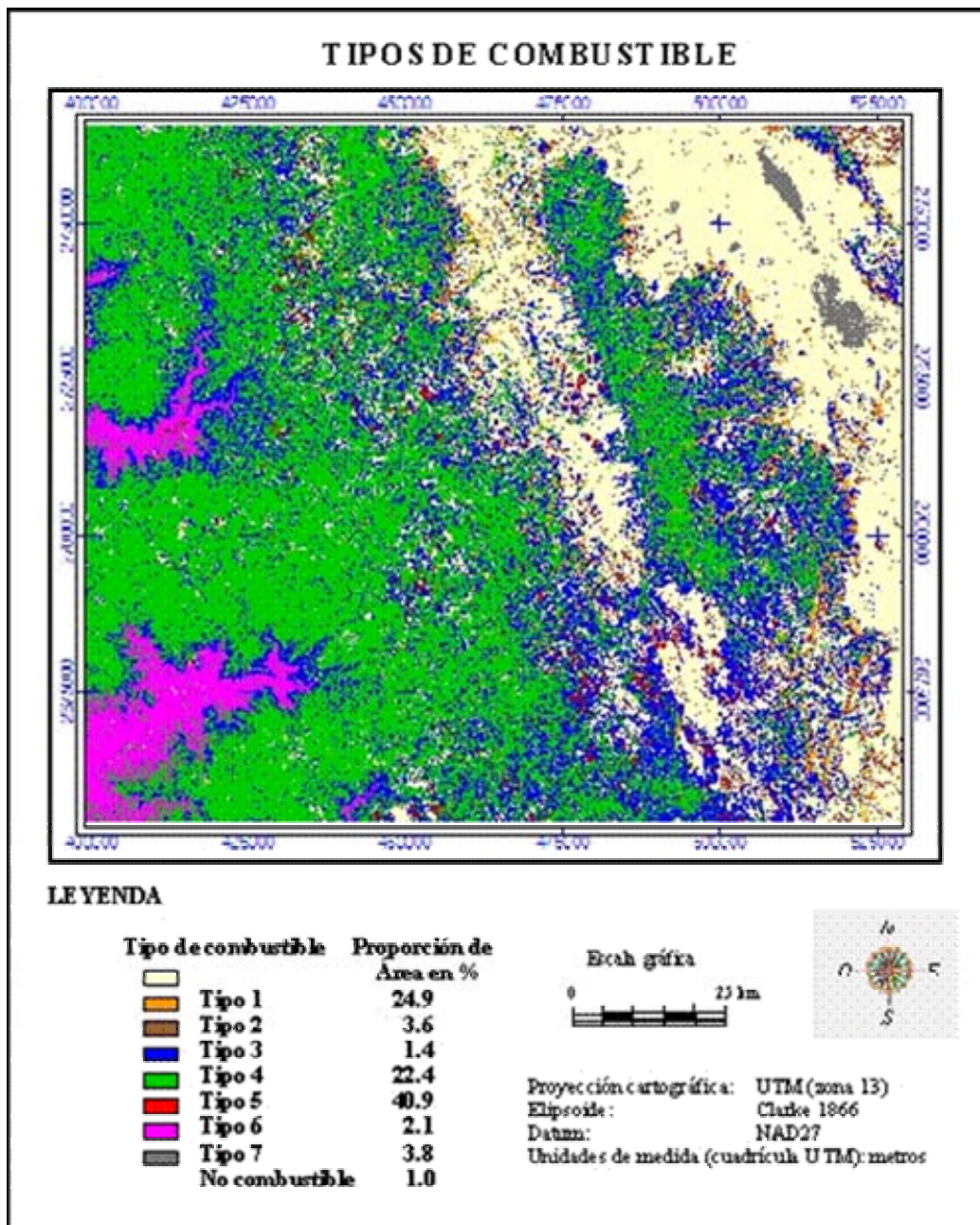


Figura 10. Mapa de tipos de combustible derivado de la imagen clasificada en tipos de cobertura del suelo.