

CARTOGRAFÍA DE ASOCIACIONES ARBÓREAS MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE LANDSAT TM Y MODELOS ECOLÓGICOS

M.A. Márquez-Linares; E. Vargas-Pérez

División de Ciencias Forestales y del Ambiente de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. C.P. 56230

RESUMEN

Se elaboró la cartografía de cinco asociaciones arbóreas o tipos forestales en la microcuenca del Tecolote, San Dimas, Durango. Se usaron dos métodos cartográficos: el primero basado en información digital del satélite Landsat TM mediante el criterio de la mínima distancia cuadrada generalizada (testigo); y el segundo mediante la combinación de información del satélite, información topográfica del sitio (topografía y exposición) y relaciones de probabilidad de las asociaciones arbóreas con respecto a la topografía (combinada). La cartografía testigo tuvo una precisión de 65.6% mientras que la cartografía por el método combinado de 82.42%, y su generalización mediante un filtrado de moda, de 91.91%. Existen diferencias significativas entre ambos métodos cartográficos. La mejoría en la clasificación fue debida a las clases forestales que tuvieron una mayor relación con las variables topográficas usadas.

PALABRAS CLAVE: Bosques de coníferas, clasificación forestal, imágenes Landsat TM, cartografía de la vegetación, Durango.

CARTOGRAPHY OF TREE ASSOCIATIONS USING LANDSAT TM INFORMATION AND ECOLOGICAL MODELS

SUMMARY

In this study, charts of five tree associations in the El Tecolote watershed, Durango, Mexico, were made. Two methods were used. The first was based on Landsat Thematic Mapper digital data and classified with a criterion of generalized squared distance (control classification). The second method used topographic information of aspect and topographic position in combination with Landsat TM data, using Bayes' theorem (combined classification) through relationships of probability. The control classification had a mapping accuracy of 65.6% and a combined classification of 82.42%. There were significant differences between the two methods employed.

KEY WORDS: Geographic Information System, forest classification, Landsat TM, cartography of vegetation, Durango, Mexico.

INTRODUCCIÓN

La percepción remota se utiliza con mucha frecuencia en la actualidad para elaborar estudios de vegetación de diferentes índices. Sin embargo uno de los problemas que surge con esta tecnología es la baja precisión cartográfica que se obtiene sobre todo en estudios de detalle y semidetalle. Por esta razón aun no es aceptada como un método confiable para elaborar cartografía de recursos naturales para propósitos prácticos u operativos (Bolstad y Lillesand 1992).

Para mejorar la precisión cartográfica de la vegetación se ha recurrido a combinar la información satelital con los conocimientos ecológicos sobre la relación que existe entre la vegetación y el hábitat, como por ejemplo el que un determinado tipo de bosque sólo se encuentra en un determinado rango altitudinal. La relación especie o vegetación-hábitat, se utilizan de manera que puedan funcionar

como un criterio para diferenciar espacialmente las categorías de vegetación que muestran similitud espectral.

En la literatura se detectaron dos métodos principales para combinar las dos fuentes de información: la determinista y la probabilística. El primer método consiste en asignar a una localización determinada una clase específica, independientemente de la asignada por la clasificación satelital, si se cumplen determinadas condiciones definidas por el investigador. Este método es válido cuando se tiene completa certeza de que en tal conjunto de condiciones se puede encontrar solo y sólo una clase determinada; este método fue usado por Jean-Francois (1995), quienes lograron mejorar la cartografía de un 4 a un 25% para diferenciar selvas caducifolias. Otra posibilidad en el método determinista es utilizar la información auxiliar para estratificar el área de trabajo de tal forma que cada estrato se clasifique independientemente, posteriormente cada estrato clasificado se une a los demás para generar la cartografía final. González y Lozano

(1995) utilizaron este sistema y mejoraron la clasificación en un 22.5%.

El método probabilístico consiste en usar la información auxiliar como una variable, o capa, más de información incorporando a la función discriminante las variables extras, esta alternativa tiene la desventaja de que se deben tener tantas áreas de entrenamiento como el rango de posibilidades de las variables auxiliares. Es decir si se tienen las variables topoforma y exposición se deben tener áreas de entrenamiento en el conjunto de condiciones que forman la combinación de estas dos variables para cada clase que se desee cartografiar.

Otra alternativa dentro del método probabilístico, que fue el seguido en este trabajo, consiste en combinar las diferentes fuentes de información mediante las probabilidades de que una localización pertenezca a una determinada clase dada la información satelital y dada la información auxiliar, mediante el teorema de Bayes. Con este método Skidmore (1989) logró mejorar la clasificación en un 9.5%, mientras que Bolstad y Lillesand (1992) en 16%.

El presente trabajo tuvo por objeto realizar la cartografía de cinco asociaciones arbóreas definidas por Márquez y González (1995) en una microcuenca del estado de Durango, mediante dos métodos. El primero utilizando únicamente información del satélite Landsat TM, y el segundo utilizando información del satélite en combinación con información topográfica (topoforma y exposición) mediante modelos de relación asociación-topografía, a nivel desimidetalle.

Area de estudio.

La microcuenca del Tecolote se ubica entre los 24° 25' y 24° 30' N y los 105° 44' y 105° 47' W, en áreas de los ejidos Vencedores y Saporis, municipio de San Dimas, Durango (Figura 1). Cubre una superficie de 3 656 ha con altitud media de 2 440 m y variación altitudinal de 2 200 a 2 720m. En la microcuenca se encuentran áreas con escarpes fuertes producidos por afloramientos rocosos de tipo riolítico, laderas de cerros con pendientes suaves, moderadas y fuertes, mesas relativamente planas así como llanos o bajíos donde se practica una agricultura de temporal y ganadería extensiva.

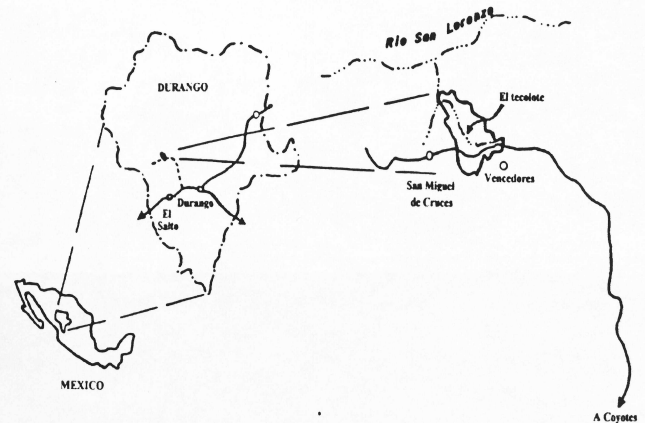
El clima predominante es C(w2)(b')(e): semifrío, subhúmedo con lluvias en verano y temperatura media anual de 10.9° C. La temperatura del mes más frío oscila entre los -3° y los 18°C. La precipitación media anual es de 1140 mm y un porcentaje de precipitación del mes más seco menor a 40mm. Se presentan nevadas ocasionales.

Los suelos son variables en profundidad, en textura y en contenido de materia orgánica, lo cual depende principalmente de la topografía. En las mesetas se encuentran suelos profundos, con alto contenido de materia orgánica y de color café oscuro; en las laderas son lixiviados y superficiales, con alta pedregosidad de color rosa; en pie de montes y bajío los suelos son aluviales de textura arenosa fácilmente erosionables por la escorren-

tía superficial. Según el sistema de la FAO se clasifican como Cambisoles eútricos, regosoles eútricos y litosoles.

Figura 1. Localización de la microcuenca de "El tecolote".

La vegetación se compone de bosques de pino-



encino, encino-pino, y en menor grado pinares y encinares puros. Márquez y González (1995) reportaron la existencia de cinco asociaciones arbóreas dentro de la microcuenca: a). Bosques con Codominancia de *Quercus sideroxylla*, *Pinus durangensis* y *P. leiophylla* (grupo side). Se desarrollan en laderas y mesetas sobre suelos profundos y bien desarrollados, presentan estructuras verticales de un piso con dominancia fisonómica de *P. durangensi*. b). Codominancia de *Pinus teocote*, *P. durangensis* y *Quercus spp* (grupo teoc). Se presentan en las mismas topoformas que el grupo anterior pero en sitios pedregosos con sequía ambiental. c). Dominancia de *Pinus cooperi* (grupo coop). Se les encontró en bajíos y en laderas suaves contiguas a los bajíos. *Pinus cooperi* forma masas puras y coetáneas y en los pies de monte se asocia con *P. leiophylla* y *P. durangensis*. d). Dominancia de *Pinus lumholtzii* y *Pinus durangensis* (grupo lumh). Se presenta en laderas suaves, medias o fuertes en áreas con alta pedregosidad, suelo somero y afloramiento de la roca madre. e). Areas con diversas especies dominantes (grupo V). Se presentan en laderas fuertes, y en menor proporción en pendientes medias y suaves, en estos sitios las perturbaciones (tala, pastoreo e incendios) tienen un mayor efecto sobre la composición y estructura de la vegetación. Entre las especies dominantes están *Quercus coccolobifolia*, *Q. laeta* y *Arbutus madrensis*, y en sitios sin elementos arbóreos, *A. occidentalis* y *Arctostaphylos pungens*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se obtuvieron dos cartografías del área de estudio, la primera, denominada testigo, fue elaborada haciendo uso exclusivo de la información del satélite Landsat TM mediante el método discriminante de la mínima distancia cuadrada generalizada. La segunda cartografía, denominada combinada, fue elaborada combinando las probabilidades a posteriori de clasificación correcta derivados del procedimiento anterior, con las probabilidades de que

dada la topoforma y exposición de una localización dada se pueda encontrar una determinada asociación mediante el teorema de Bayes. La localización X_{ij} fue definida como la i -ésima fila ($i=1, \dots, 368$) y j -ésima columna ($j=1, \dots, 334$) de un pixel, en una base de datos raster de un sistema de información geográfica; la asociación t_i ($i=1, \dots, 5$) corresponde a las cinco asociaciones determinadas por Márquez y González (1995) (ver la sección anterior); mientras que la topoforma y exposición (Z_i , $i=1, \dots, 15$) corresponde a la combinación de cinco topoformas (mesa, cañada, bajo, ladera suave, ladera media y ladera fuerte) con cinco exposiciones (norte, este, sur, oeste y zenit).

Procesamiento de las fuentes de información. Se usó la imagen LANDSAT TM no. 3143 del 21 de marzo de 1990 en formato LTM de 5965 líneas por 6967 píxeles (columnas) de la Sierra Madre Occidental de Durango libre de nubosidad. La imagen fue recortada por las coordenadas geográficas UTM siguientes: X de 419000 a 429020 e Y= de 2697969 a 2709000. La georeferencia de esta imagen se realizó mediante el sistema IDRISIW utilizando 16 puntos de control. El error cuadrático medio fue de 0.338, equivalente a 9.9 m de precisión.

El mapa de topoformas se elaboró manualmente a partir de la carta topográfica G13C77 de San Miguel de Cruces del INEGI escala 1:50000. Las categorías empleadas fueron: 1) mesetas (0-9% de pendiente), 2) laderas suaves (10-29%), 3) laderas medias (30-49%), 4) laderas fuertes (más de 50%), 5) bajos y 6). El error obtenido durante la digitalización fue de 9.4 m. De este mapa digital también se derivó el mapa de los límites de la microcuenca.

Para la elaboración del mapa de exposiciones se utilizó un modelo digital de elevación del INEGI escala 1:250 000 de la zona 106° - 105° W y 24° - 25° N, correspondiente a el área centro de la Sierra Madre Occidental del estado de Durango. Para normalizar el tamaño del pixel a 90 x 90 m. se utilizó un muestreo del área mediante las opciones bilineal con función cuadrática del sistema IDRISIW. El modelo resultante de la operación anterior fue muestreado nuevamente para producir una imagen de 30 x 30 m, el cual es el tamaño del pixel de las imágenes Landsat TM.

Áreas de entrenamiento. La selección de las áreas de entrenamiento (representativas de cada clase o asociación) se llevó a cabo sobre una imagen compuesta de las bandas 2, 3 y 4 TM, con información de: a) 115 sitios de muestreo en campo, b). fotografías aéreas, y c). análisis visuales de mapas realizados mediante una clasificación no supervisada (para delimitar áreas de homogeneidad espectral). En total se delimitaron tres áreas para el grupo side, dos para teoc y coop, tres para lumh, cuatro para el grupo V, y 10 para las áreas no forestales. Se realizaron análisis estadísticos multivariados y univariados para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de reflectancia de cada grupo estudiado. No se realizó ningún tratamiento especial para eliminar el efecto topográfico, excepto que las áreas de entrenamiento se eligieron en diferentes condiciones de exposición, lo cual de acuerdo a Chuvieco (1990) y Colby

(1991) es una forma de poder incluir este factor dentro de la clasificación.

Clasificación de la imagen multispectral TM. Para determinar el método óptimo de discriminación de la imagen, se realizaron pruebas estadísticas para determinar si las clases consideradas tienen una distribución normal multivariada de las variables TM1 a TM7 y para determinar la existencia homogeneidad de varianza en las matrices de varianza-covarianza de cada grupo estudiado (Morrison, 1976).

Mediante los resultados anteriores se determinó que la discriminación óptima de la imagen se logra mediante el criterio de la mínima distancia cuadrada generalizada utilizando las matrices de varianza covarianza de cada clase. Se obtuvieron dos salidas, la primera corresponde a la clase de mayor verosimilitud para una localización X_{ij} , y fue denominada clasificación testigo (Figura 2). La segunda salida correspondió a la probabilidad de que una observación X_{ij} pertenezca a la clase t_i , calculada mediante la ecuación:

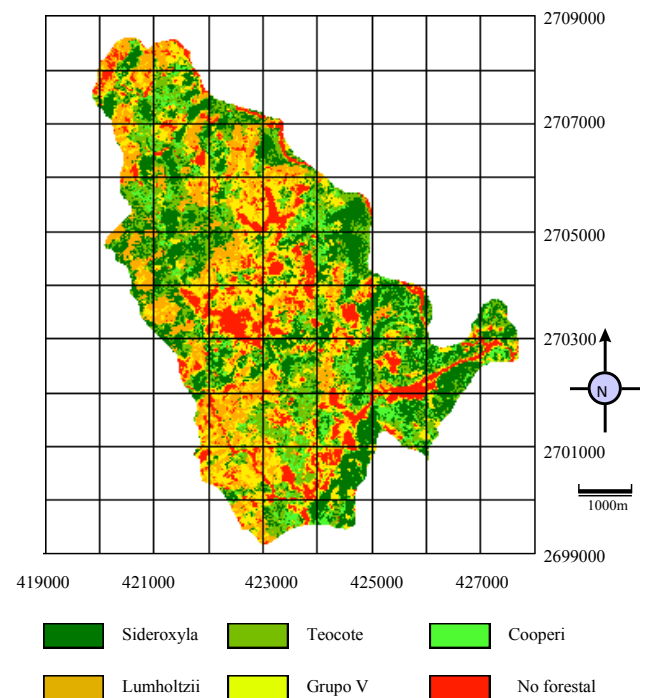


Figura 2. Mapa temático testigo de las asociaciones arbóreas de la microcuenca de "El tecolote".

$$p(t_i | \underline{x}) = [\exp(-0.5 D_t^2(\underline{x}))] / [\sum_t -0.5 D_t^2(\underline{x})] \dots \dots \dots (1)$$

donde \underline{x} es el vector de dimensión 7 (número de bandas TM) de cada observación X_{ij} , y D^2 es la distancia cuadrada generalizada de \underline{x} al grupo t (SAS, 1988). Esta salida fue utilizada para combinarla posteriormente con la información topográfica.

Modelos de relación asociación-topografía. Los modelos de relación especie-habitat o asociación-habitat han sido usados para predecir con base al habitat, las especies o asociaciones que es factible encontrar en un lugar determinado (Austin *et. al.* 1984; Stoms y Estes, 1994).

En el presente trabajo se tomaron los datos de los sitios de muestreo realizados por Márquez y González (1995), más 67 sitios inventariados para determinar dicha relación. Esta información se usó como la probabilidad $p(t_i|z_j)$ de encontrar una asociación arbórea (t_i) en una condición topográfica dada (z_j), mediante la proporción de sitios encontrados en cada condición. Mediante este procedimiento se obtuvo un vector de probabilidades (\underline{z}) para cada condición topográfica (Cuadro 3).

Producción del mapa combinado. Para cruzar las probabilidades a posteriori de que una determinada localización $X_{i,j}$ perteneciera a una clase t_i dada la información satelital $P(t_a|\underline{x})$, y la probabilidad de pertenecer a una clase t_i dada su topografía y exposición $P(t_a|\underline{z})$ se usó el teorema de Bayes:

$$p(t_a|\underline{x}, \underline{z}) = (p(t_a|\underline{x}) * p(t_a|\underline{z})) / p(T) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{donde: } P(T) = \sum_{n=1}^5 (p(ta) * p(ta))$$

Mediante esta ecuación y con un programa SAS elaborado para tal propósito, se asignó a la localización $X_{i,j}$ la clase de máxima verosimilitud calculada mediante la ecuación 2. Las localizaciones que mediante información satelital fueron asignadas a la clase no forestal permanecieron en esta clase, dado que ésta no está relacionada con las variables topografía y exposición.

Se asumió que las fuentes de información $P(t_a|\underline{x})$ y $P(t_a|\underline{z})$ son estadísticamente independientes, ya que ninguna de éstas estuvo obviamente correlacionada. Por ejemplo, el valor de la reflectancia de la banda 3 del satélite de un pixel no está relacionado con la pendiente.

Validación. Para determinar la precisión de las clasificaciones se delimitaron 23 áreas pertenecientes a las seis clases de cubierta forestal (cinco asociaciones más la clase no forestal) las cuales fueron delimitadas en el sistema de información geográfica. Con esta información se construyeron matrices de errores, las cuales fueron analizadas mediante el índice de fiabilidad global: $F_s = \sum X_{ii} / X_{..}$ y comparadas mediante las pruebas estadísticas de Kappa (Chuvieco, 1990).

RESULTADOS

CUADRO Promedio y desviación estandar por variable y clase forestal

	Sideroxyla		Teocote		Cooperi		Lumholtzii		Grupo v		No forest	
	\bar{x}	s.d.	\bar{x}	s.d.	\bar{x}	s.d.	\bar{x}	s.d.	\bar{x}	s.d.	\bar{x}	s.d.
TM1	56.66	2.60	61.27	2.90	60.8	3.05	72.74	5.64	70.30	6.19	89.78	11.61
TM2	23.80	1.62	25.47	1.66	25.01	1.75	32.55	3.22	30.73	3.57	42.61	6.54
TM3	25.54	3.17	28.58	2.83	27.69	2.95	42.13	5.97	38.51	6.71	59.38	11.38

Análisis espectral. Las medias y desviaciones estándar de las variables TM1 a TM7 (Cuadro 1) muestran que la clase no forestal es la que mayor error tiene en todas las variables, como consecuencia de que se incluyeron caminos, áreas erosionadas, y pastizales en esta misma clase, no obstante se diferencia ampliamente de los demás grupos.

En el análisis de varianza multivariado realizado para determinar si los vectores de medias de las variables TM1 a TM7 de cada clase son iguales ($H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_7$ contra la H_a : al menos un μ_i es diferente de los demás para al menos un y), se rechazó con nivel $\alpha = .01$, por lo que se concluye que al menos un vector de medias es diferente de los demás.

En el análisis de varianza univariado para probar si las medias de cada una de las variables TM1 a TM7 son iguales dentro de cada clase considerada, ($H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$ contra H_a : al menos un μ_i es diferente de los demás), se rechazó con un nivel $\alpha = .01$ por lo que al menos una de las medias es diferente, esto implica que es posible diferenciar algunos grupos de otros con información satelital.

Los análisis de los intervalos de confianza para cada clase y cada banda indican las medias de la clase teoc y coop son iguales para las bandas 1, 5 y 7; que los grupos side y coop tienen la misma media en la banda 4 y 7; así como que en las siete bandas del satélite las medias para los grupos side, teoc y coop están muy cercanas, con diferencias mínimas con relación a la separación existente entre estos, con los grupos lumh, grupo V y no forestal.

La similitud en reflectancia promedio de los grupos side, teoc y coop, indica que si se hace uso únicamente de este medio para asignar clases a un pixel dado se pueden esperar matrices de errores con valores altos. Desde el punto de vista biológico esta cercanía espectral implica que las asociaciones de coop, teoc y side tienen una absorción promedio de las mismas longitudes de onda de la luz. En este sentido, la clase side tiene mayor espesura y un componente latifoliado importante. El grupo coop generalmente es monoespecífico con densidades altas. Mientras que en el grupo teoc se puede esperar mayor reflectancia del suelo, ya que el *Pinus teocote* tiene copas menos densas que las de *Pinus cooperi*, *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxyla*.

TM4	47.30	6.36	50.64	3.70	47.66	2.52	59.72	5.54	53.35	7.02	65.48	7.01
TM5	56.37	12.46	65.78	9.29	64.84	9.08	107.9	16.07	95.56	19.16	179.6	25.03
TM6	137.8	3.96	140.2	2.37	139.6	2.15	154.1	3.93	150.5	6.66	157.2	5.03
TM7	22.77	6.45	26.56	5.06	26.97	5.18	48.94	9.04	45.37	11.47	81.22	20.22

El grupo se encuentra cercano espectralmente al grupo lumh. Los dos grupos se diferencian fácilmente en tierra por su fisonomía; mientras que el *Pinus lumholtzii* tiene una forma de la copa escurrida y poco densa, el grupo V generalmente son arbustos dispersos de diferentes especies de *Quercus*, así como de *Arctostaphylos pungens*. Estos dos grupos tienen en común su baja densidad, lo que implica una mayor cantidad de luz reflejada por el suelo. Esto explica también su mayor cercanía espectral a la clase no forestal con respecto a los otros grupos.

Relaciones asociación-topografía. El Cuadro 2 muestra las probabilidades de encontrar relación entre una asociación y una condición topográfica. En este cuadro se puede observar que las diferentes asociaciones tienen preferencia por determinados lugares, por ejemplo la clase coop con respecto a los bajíos, o el gpov con respecto a las laderas medias y fuertes. Esto fundamenta el uso de estos datos para coadyuvar a elaborar la cartografía del área. Las pruebas estadísticas de Chi cuadrada se usó para probar la independencia de las asociaciones (columnas) contra las condiciones topográficas (topoforma y exposición, por separado), encontrándose que se rechazó la hipótesis nula con nivel $\alpha=0.005$ (H_0 : los dos factores son independientes vs. H_a : los dos factores son independientes) con nivel $\alpha=0.05$; por lo que existe preferencia de las asociaciones por hábitats específicos. La prueba anterior fundamenta el uso de la matriz de probabilidades del Cuadro 2, para ayudar a discriminar la imagen del satélite Landsat TM.

CUADRO 2. Probabilidades $p(t|z)$ de ocurrencia de la clase t dada una determinada condición topográfica (z).

z \ t	Side	Teoc	Coop	Lumh	gpov
Mesa	0.50	0.36	0.00	0.14	0.00
Bajío	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
Cañada	0.58	0.28	0.00	0.14	0.00
LSN	0.78	0.00	0.11	0.11	0.00
LSE	0.40	0.20	0.20	0.10	0.00
LSS	0.10	0.30	0.30	0.30	0.00
LSO	0.28	0.28	0.28	0.16	0.00

LMN	0.50	0.17	0.00	0.17	0.16
LME	0.25	0.25	0.00	0.25	0.25
LMS	0.17	0.17	0.00	0.49	0.17
LMO	0.29	0.14	0.00	0.43	0.14
LFN	0.44	0.22	0.00	0.11	0.23
LFE	0.33	0.00	0.00	0.50	0.17
LFS	0.13	0.29	0.00	0.29	0.29
LFO	0.14	0.14	0.00	0.43	0.29

* LS: ladera suave, LM: ladera media, LF ladera fuerte, N: norte, E: este, S: sur, O: oeste.

Análisis de la cartografía testigo y combinada. La Figura 2 muestra la cartografía testigo elaborada con la información satelital, ésta tuvo una precisión global de 65.60 ± 2.70 %, con una precisión promedio por clase de 66.72%. Este resultado se considera pobre, dado que el mínimo aceptable por el U.S. Geological Survey es de 85% para trabajos aplicados (Anderson *et al.* 1976, citado por González y Lozano 1995), En el Cuadro 3 podemos observar que las clases que mostraron mayores errores de omisión (asignar una clase a un pixel que de antemano se sabe que pertenece otra) fueron side y coop (36%), teoc y coop (30%) y coop y teoc (25%), lo anterior debido a cercanía espectral de los tres grupos. Los errores de omisión de los grupos lumh, gpov y nofo fueron de menor importancia en esta clasificación.

CUADRO 3. Matriz de errores del mapa temático testigo contra las áreas de validación (filas).

Expo.	Side	Teoc	Coop	Lumh	Gpov	Nofo	Total	Eo
Side	131	16	92	9	4	0	252	48.0
Teoc	17	101	97	1	4	0	317	54.1
Coop	8	27	71	0	0	0	106	33.0
Lumh	0	9	0	167	43	0	219	23.7
Gpov	1	18	12	30	151	0	232	28.8
Nofo	0	0	3	17	2	161	183	12.0
Total	157	171	275	244	204	161	1212	

E.com	16.6	40.9	74.2	25.4	26.0	0.0
-------	------	------	------	------	------	-----

La Figura 3 muestra el mapa de la clasificación combinada, la cual presentó $82,43 \pm 1.80$ % de precisión global y una precisión promedio por clase de 82.18%. El límite del intervalo alto de esta clasificación (84.23%) es muy cercano al mínimo aceptable por el U.S. Geological Survey, por lo que el efecto de incluir la información topográfica para elaborar la cartografía de las asociaciones es significativo. En el Cuadro 4 podemos observar que los errores de omisión en las clases side, teoc y coop bajaron notablemente, pero principalmente en la clase coop, que es por otro lado la clase que mayor definición y tiene por ambientes específicos a los bajíos. Los errores de omisión de las clases lumh, gpov y nobo, también mostraron una disminución aunque de menor cuantía que el de los tres grupos anteriores.

La prueba de la igualdad de matrices de error de Kappa muestra que las matrices de errores de los dos mapas son significativamente diferentes ($P > Z = 0.00$), por lo que se puede afirmar que el uso de los modelos de relación asociación-topografía permitieron una mejoría de 16.2% en la precisión global.

Por otro lado, al filtrar el mapa combinado por la moda, la cual generaliza la imagen, se logró una precisión de 91.91 ± 1.29 %. Esta cartografía puede considerarse como un buen resultado en virtud de que, si se define el tamaño del área mínima cartografiable de 90×90 m, entonces las células que pertenecen a clases diferentes a las de su contexto se reclasifican como pertenecientes a la clase de mayor frecuencia. Este procedimiento permite tener un mejor análisis visual, y facilita la toma de decisiones.

Categorías de la clasificación. En el presente trabajo las categorías temáticas empleadas para la clasificación de la información satelitaria son de un nivel semidetallado, ya que todas las asociaciones pertenecen al tipo de vegetación de Pino-encino, por lo que es factible esperar mayor similitud en las respuestas espectrales de las diferentes categorías. Por lo anterior, se requiere de información adicional para poder discriminar las asociaciones presentes. Es interesante notar que por su composición específica las asociaciones se distinguen a un nivel del 70%, es decir que en este nivel de similitud los grupos side, teoc, coop y lumh pertenecen a una misma clase, no obstante cada asociación se encuentra con mayor frecuencia en determinadas condiciones. Es probable que con una base de datos geográficos más amplia se pueda mejorar la precisión de la cartografía, ya que para discriminar entre los grupos side y teoc, los parámetros de pedregosidad y profundidad del suelo tienen un papel importante (Márquez y González, 1995).

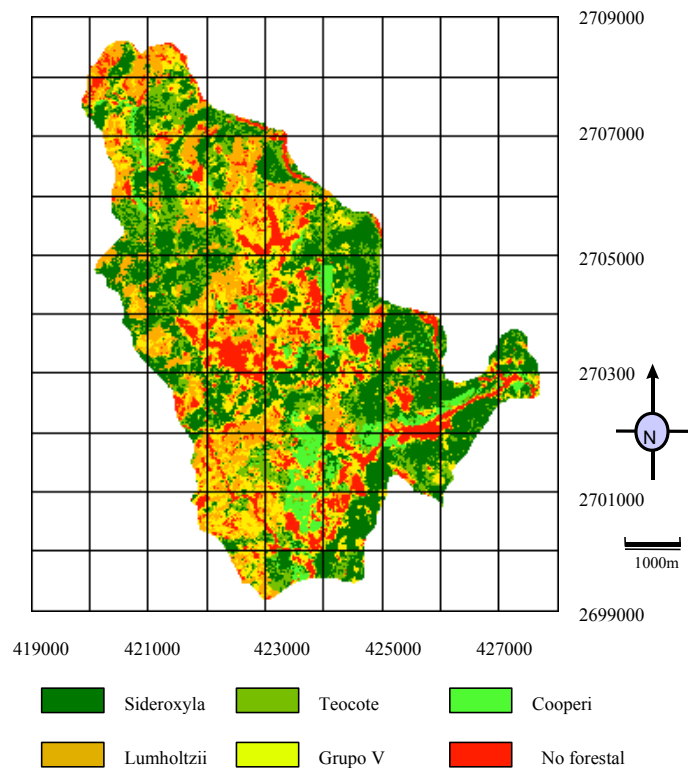


Figura 3. Mapa temático combinado de las asociaciones arbóreas de la microcuenca de "El Tecolote"

CUADRO 4. Matriz de errores del mapa temático combinado contra áreas de validación (filas).

Expo.	Sider	teoc	coop	lumh	gpov	nobo	total	Eo
Side	145	30	29	7	4	0	215	32.6
Teoc	12	115	26	1	3	0	157	26.8
Coop	0	1	209	0	0	0	210	0.5
Lumh	0	10	1	203	29	0	243	16.5
gpov	0	15	7	16	166	0	204	18.6
nobo	0	0	3	17	2	161	183	12.0
total	157	171	275	244	204	161	1212	
Ec	7.6	32.7	24.0	16.8	18.6	0.0		

Por otro lado, para aplicar la metodología propuesta en el presente estudio a áreas de mayor tamaño, se puede tener el problema del número de categorías a utilizar, que seguramente aumentará conforme se incluya una mayor variación altitudinal y ambiental. Esto implica tener modelos de relaciones asociaciones-hábitats no sólo para las variables topografía y exposición, sino también para la altitud, el suelo, la precipitación, etc. Por esto una

línea de desarrollo importante en la cartografía de la vegetación por sensores remotos, es la generación de bases de datos geográficos de mayor detalle, así como de modelos de relaciones ecológicas más amplios.

CONCLUSIONES

La metodología implementada en el presente estudio logró aumentar en 16.2% la precisión de la cartografía de las asociaciones arbóreas en comparación con la clasificación realizada únicamente con datos del satélite Landsat TM.

La cartografía testigo tuvo una precisión de 65.6%, la cual se considera no apta para propósitos prácticos.

La cartografía combinada tuvo una precisión de 82.42%, la cual aumentó a 91.91% al generalizarse por medio de la moda.

El mejoramiento por el uso de información auxiliar fue debido a las clases correspondientes a *Pinus cooperi* y *Pinus lumholtzii* las cuales tienen una definición clara por ambientes específicos.

Es posible mejorar la precisión de la cartografía si se introducen otros parámetros ambientales, como es la profundidad y el porcentaje de pedregosidad del suelo, que determinan a otras asociaciones como la asociación del grupo Teoc.

LITERATURA CITADA

- AUSTIN, M.P.; CUNNINGHAM, R.B.; FLEMING, P.M. 1984. New approaches to direct gradient analysis using environmental scalars and statistical curve fitting procedures. *Vegetatio* 55:11-27.
- BOLSTAD, V.P.; LILLESAND, T.M. 1992. Improved classification of forest vegetation in Northern Wisconsin through a rule based combination of soils, terrain, and Landsat, Thematic Mapper data. *Forest Science*. 38(1):5-20.
- CHUVIECO, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. Rialp. Madrid, España. 453 p.
- COLBY, J. 1991. Topographic normalization in rugged terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 57(5):531-538.
- GONZÁLEZ MURGÍA, R.; LOZANO GARCÍA, D.F. 1995. Modelos ecológicos de distribución de la cobertura vegetal. Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota. Puerto Vallarta, Mex. p. 628-639.
- J.-F. M.; I. RAMÍREZ; J. LÓPEZ. 1995. Mejoramiento de clasificaciones espectrales por medio de un sistema de información geográfica: Comparación de dos casos de estudio. Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota. Puerto Vallarta, Mex. p. 74-80.
- MÁRQUEZ LINARES, M. A.; GONZÁLEZ ELIZONDO, S. 1995. Análisis geomorfológico y de la vegetación de la submicrocuenca del Tecolote, San Dimas Durango. Inédito, Informe Técnico. CIIDIR IPN U. Dgo. 22p. (por publicarse en *Agrociencia*, serie recursos naturales).
- MORRISON F., D. 1976. *Multivariate statistical methods*. McGraw-Hill. N.Y. 415p.
- SAS Institute Inc. 1988. *SAS/STAT. User's guide*. Release 6.03 Edition, Cary, NC. 1028 p.
- SKIDMORE, A.K 1989. An expert system classifies Eucalypti forest types using Thematic Mapper data and digital terrain model. *Photogrammetric Engineering. Remote Sensing*. 55(10):1449-1469.
- STOMS, D.M.; ESTES, J. E. 1994. A remote sensing research agenda for mapping and monitoring biodiversity. *Remote Sensing of Environment* 14(10): 1839-1860.