

EVALUACIÓN DE UN MÉTODO DE CORRECCIÓN DE LOS EFECTOS TOPOGRÁFICOS SOBRE IMÁGENES LANDSAT ETM+ EN ZONAS MONTAÑOSAS TROPICALES

ABARCA, OSCAR - *Instituto de Ingeniería Agrícola, Facultad de Agronomía-Universidad Central de Venezuela - Venezuela*

ORMEÑO, SANTIAGO - *Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía-Universidad Politécnica de Madrid - España*

1. RESUMEN

En este trabajo se evalúa uno de los principales métodos empleados para la corrección de los efectos de la topografía sobre las diferencias del grado de iluminación en imágenes del sensor Landsat ETM+. Para ello se aplicó el método sobre una imagen de un sector montañoso del centro-norte de Venezuela, con la intención de evaluar la necesidad de realizar el proceso de corrección de los efectos topográficos en zonas tropicales. La evaluación se realizó cuantificando la influencia de la corrección en la clasificación de tipos de ocupación de la tierra, mediante el cálculo de la Matriz de Confusión y el Índice de Concordancia Kappa, sobre imágenes con y sin corrección topográfica. Se aplicaron técnicas de clasificación supervisadas y no supervisadas y los resultados se compararon con un mapa de tipos de ocupación derivado de ortofotos del área con fines de referencia. No se obtuvieron diferencias significativas entre las imágenes clasificadas sin corrección y con corrección por efectos topográficos.

Palabras Clave: Corrección topográfica, efectos de iluminación diferencial, imágenes Landsat ETM+.

2. ABSTRACT

In this work one of the principal methods that is used for the correction of the topographic effects on the differences of the illumination degree in Landsat ETM+ sensor imagery is assessed. For it, the method was applied on a mountainous sector image in the North of Venezuela. The evaluation was realized quantifying the influence of the correction in the classification of land occupation types, by means of the calculations of the Error Matrix and Kappa Index of Agreement on images with and without topographic correction. Supervised and unsupervised classification techniques were applied and the results were compared with a map of land occupation types derived of orthophotos regional with purposes of reference. There were not obtained significant differences between the classified imagery without correction and with correction for topographic effects.

Key Words: Topographic correction, differential illumination effects, Landsat ETM + Images.

3. INTRODUCCIÓN

El uso de las imágenes de satélite se ve dificultado en zonas montañosas dada la iluminación variable que reciben estas zonas como consecuencia del efecto topográfico derivado de la interacción entre la elevación y orientación del sol con la magnitud y orientación de la pendiente del terreno.

Schneider y Robbins (2001) definen el efecto topográfico como la diferencia en los valores de radiancia entre super-

ficies inclinadas y superficies horizontales. Las imágenes frecuentemente se toman temprano en la mañana o al final de la tarde cuando los efectos del ángulo del sol en la iluminación de las pendientes pueden ser extremos. En terrenos de alta montaña algunas áreas pueden estar tan sombreadas que la información se pierde por completo. Normalmente en las laderas opuestas a la dirección del sol la reflectancia es menor que el valor promedio o general de la imagen.

Estos efectos se manifiestan en el proceso de clasificación. El sombreado exagera las diferencias en la información de reflectancia que procede de materiales similares, ubicados en laderas de pendiente opuesta, por lo que se crea un numeroso grupo de clases de reflectancia. Estos grupos no solo pueden tener diferentes valores de media y varianza, sino que también pueden tener rangos de reflectancia que no se superponen, lo que hace la interpretación más difícil y costosa (Eastman, 2006).

Se han creado varias técnicas para mitigar este efecto topográfico, sin embargo, muchas tienden a ser apropiadas únicamente para el ambiente en el cual fueron desarrolladas y otras requieren información auxiliar altamente detallada, frecuentemente no disponible.

En este estudio se realizó una revisión de las principales estrategias planteadas en la literatura para la corrección del efecto topográfico sobre imágenes Landsat y se aplicó una de las de uso más común, en un ambiente montañoso tropical, con la finalidad de conocer sus implicaciones en zonas de estas latitudes.

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

Se seleccionó como área de estudio la cuenca hidrográfica del río El Limón, ubicada en la vertiente sur del Parque Nacional Henri Pittier, estado Aragua, Venezuela, en una zona intertropical ubicada entre los 10°15' y 10°20' de Lat. Norte. El análisis se realizó sobre un sector rectangular que incluye la cuenca alta y media del río (desde la cota 2240 msnm hasta la cota 420 msnm). En la Figura 1 se destaca la zona a estudiar. El recuadro correspondiente a esta área se localiza, en su parte alta y media, dentro de los límites del Parque Nacional Henri Pittier y en su parte baja ocupa sectores urbanos de los centros poblados de El Limón, en el estado Aragua, y Aguas Calientes, en el estado Carabobo.

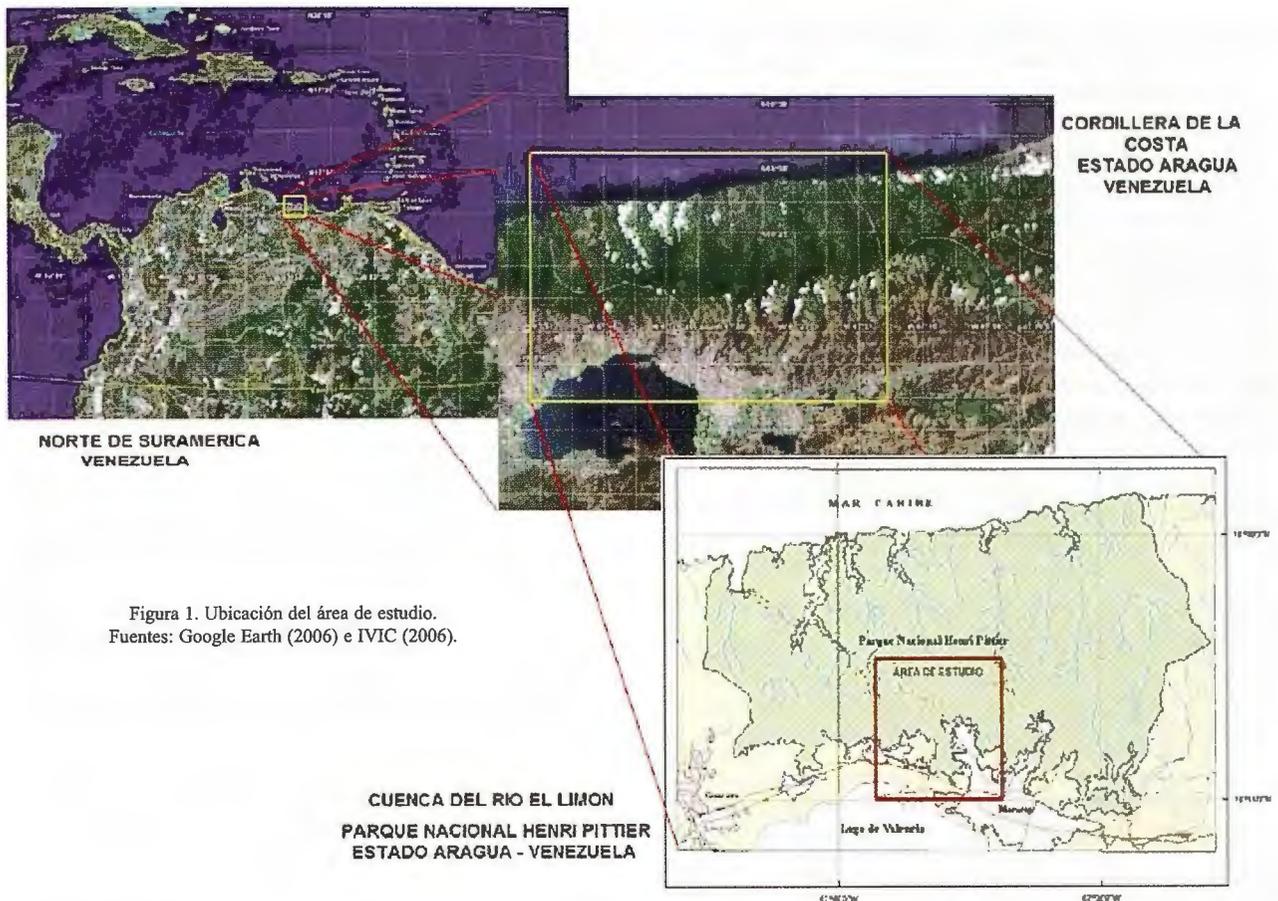


Figura 1. Ubicación del área de estudio.
Fuentes: Google Earth (2006) e IVIC (2006).

3.2. OBJETIVO

Con este trabajo se persigue el siguiente objetivo general: Aplicar un método de corrección de los efectos topográficos sobre imágenes Landsat ETM+ y cuantificar la influencia de la corrección sobre el resultado de diferentes técnicas de clasificación.

3.3. METODOLOGÍA

Para lograr el objetivo planteado se formula la siguiente secuencia metodológica:

- Revisión de las principales estrategias planteadas para la corrección de los efectos topográficos en las imágenes de satélite.
- Selección y obtención de imágenes Landsat ETM+ de la zona de estudio y extracción de una sub-ventana de la zona. El procesamiento se realiza con el software IDRISI.

- Obtención del Modelo Digital de Terreno (MDT) del área de estudio y cálculo de las imágenes de pendientes del terreno y de orientación de laderas (aspectos).
- Obtención de un documento cartográfico referencial de tipos de ocupación del suelo, a partir de fotointerpretación, con fines de evaluación de los productos generados por la clasificación de la imagen Landsat.
- Aplicación de uno de los métodos revisados de corrección de los efectos topográficos sobre las imágenes Landsat seleccionadas.
- Aplicación de metodologías estándares de clasificación supervisada y no supervisada, sobre las imágenes Landsat con corrección y sin corrección topográfica.
- Evaluación comparativa de los resultados obtenidos mediante cálculo de la matriz de confusión y el índice de

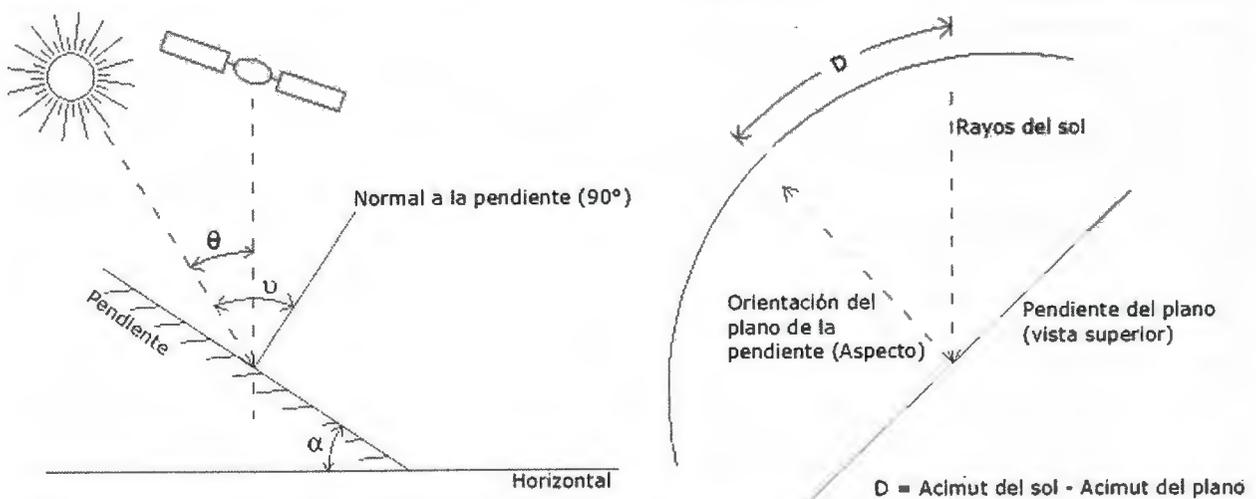


Figura 2. Parámetros verticales y horizontales de la iluminación.
Fuente: Modificado de Schneider y Robbins (2001) y NASA (2006).

concordancia Kappa, así como mediante análisis visual de las imágenes procesadas.

3.4. MATERIALES

Para el desarrollo metodológico se cuenta con los siguientes documentos cartográficos:

a) Ortofotos digitales correspondientes a las hojas 6647-II-SO, 6647-II-SE, 6646-I-NO, 6646-INE del mapa topográfico nacional de Venezuela a escala 1:25.000. Estas ortofotos fueron elaboradas con fotografías aéreas a escala 1:60.000, tomadas en marzo de 1997.

b) Mapa topográfico digital del área de estudio, obtenido por digitalización de las curvas de nivel de los sectores correspondientes de las hojas 6647-II-SO, 6647-II-SE, 6646-I-NO, 6646-INE, del mapa topográfico nacional de Venezuela a escala 1:25.000, de 1979, con curvas de nivel separadas a intervalos de 20 m.

c) Imagen Landsat ETM+ del 14 de marzo de 2001, en todas sus bandas.

4. ANTECEDENTES METODOLÓGICOS

Schneider y Robbins (2001) indican que los problemas causados por el efecto topográfico se producen porque los sensores se mantienen operando cuando los niveles de elevación del sol son bajos. Proy et al. (1989) recomiendan utilizar imágenes tomadas con un elevado ángulo de elevación solar, posiblemente mayor de 45°. Sin embargo, dada la poca disponibilidad de datos, generalmente, esta opción no es factible, por lo que se hace necesaria la corrección.

Entre los métodos de corrección más comunes se tienen:

4.1. COCIENTE DE BANDAS

En este método una banda es dividida por otra. Por ejemplo la banda infrarroja (IR) es dividida por la roja (R):

$$\boxed{\text{Banda IR} / \text{Banda R}} \quad (1)$$

o mediante un cociente normalizado, de mayor robustez (NDVI):

$$\boxed{\text{NDVI} = (\text{Banda IR} - \text{Banda R}) / (\text{Banda IR} + \text{Banda R})} \quad (2)$$

este último se usa para limitar el rango de valores y evitar la división por cero.

4.2. MODELADO DE LOS EFECTOS DE ILUMINACIÓN DIRECTA USANDO UN MDT

De acuerdo al supuesto Lambertiano, la porción de la radiancia reflejada de la superficie de un plano está en función de la pendiente y orientación del plano y en relación a la pendiente y al acimut de la radiación solar de un determinado momento. Esta relación es descrita en trigonometría esférica (Smith et al., 1980) por la siguiente ecuación:

$$\boxed{\cos v = \cos \theta \cdot \cos \alpha + \text{sen} \theta \cdot \text{sen} \alpha \cdot \cos(Az_{sol} - Az_{sup})} \quad (3)$$

donde:

θ es el Angulo cenital solar (Figura 2),

α es la pendiente del plano,

Az_{sol} es el acimut del sol,

Az_{sup} es el acimut de la superficie o plano pendiente, (aspecto u orientación),

$\cos v$ es la proporción de reflectancia real que sale de una pendiente.

La ecuación se puede resolver a través de algebra de mapas con un SIG, usando un MDT para derivar la pendiente y orientación del plano. Teóricamente se pueden crear imágenes de radiancia corregidas dividiendo las bandas de la imagen por $\cos v$. (Schneider y Robbins, 2001).

Esta técnica tiene sus limitaciones, Justice et al. (1981), encontraron una sobre-corrección en los datos que causó más amplia variación que los datos sin corrección, para muchas clases de uso de la tierra. Smith et al. (1980), demostraron que el supuesto Lambertiano subyacente al proceso de corrección fue válido sólo para un rango limitado de valores de elevación y orientación solar.

Esta técnica tampoco toma en cuenta la variación de los datos causada por la iluminación indirecta y difusa resultante de la topografía. Es, así mismo, imprescindible el uso de un MDT de alta calidad y geo-referenciado con precisión o de lo contrario se obtendrán resultados muy pobres (Schneider y Robbins, 2001).

A partir del cálculo del ángulo de incidencia (v) se han desarrollado diferentes métodos para compensar la diferencia de radiación incidente entre vertientes.

4.3. MÉTODO PROPUESTO POR TEILLET ET AL. (1982)

$$\boxed{\rho_h = \rho_i \left(\frac{\cos \theta}{\cos v} \right)} \quad (4)$$

donde:

ρ_h es la reflectividad de un píxel en terreno horizontal,

ρ_i reflectividad de un píxel en pendiente (imagen),

v es el ángulo de incidencia del flujo de radiación.

Este método considera a los tipos de cobertura como Lambertianas. Se ha demostrado que el método sobre-corrige la imagen, sobre todo en las zonas de muy baja iluminación (Chuvieco, 2002).

4.4. MÉTODO PROPUESTO POR CIVCO (1989)

$$\boxed{\rho_h = \rho_i + \rho_i \frac{(\cos v_m - \cos v)}{\cos v_m}} \quad (5)$$

donde:

v_m es el valor promedio de iluminación en la imagen.

Chuvieco et al. (2003), demostraron la utilidad de la corrección de los efectos topográficos con el método de Civco en la discriminación de cubiertas de baja reflectividad, como las láminas de agua y zonas sombreadas, para la cartografía de áreas quemadas con imágenes Landsat ETM+.

4.5. MÉTODO PROPUESTO POR MINNAERT (1941)

$$\boxed{\rho_h = \rho_i \left(\frac{\cos^k \theta}{\cos^k v} \right)} \quad (6)$$

donde:

k es la constante de Minnaert que varía entre 0 y 1. Cuando $k = 1$, la superficie se comporta como un reflector Lambertiano ideal. El parámetro k puede determinarse empíricamente, linealizando la ecuación anterior mediante logaritmos y estimando la pendiente de una regresión lineal (Ormeño, 2006).

4.6. MÉTODO DEL COEFICIENTE C, PROPUESTO POR TEILLET ET AL. (1982)

$$\rho_k = \rho_i \left(\frac{\cos \theta + C_k}{\cos \nu + C_k} \right) \quad (7)$$

donde:

$$C_k = \frac{b_k}{m_k}$$

b_k es la constante de la recta de regresión entre la imagen de reflectividad de la banda k y la imagen de iluminación,

m_k es la pendiente de la recta de regresión.

Este método, a pesar de que sigue considerando a los cuerpos con carácter Lambertiano, al menos considera el carácter Lambertiano en cada banda, para lo cual emplea la constante empírica C_k , que se relaciona con la rugosidad promedio de cada banda (Chuvieco, 2002).

El efecto producido por C_k es similar al de la constante de Minnaert, incrementa el denominador y suaviza la sobre-corrección en las zonas débilmente iluminadas (Ormeño, 2006).

Arribas (2002) encontró que el método del Coeficiente C fue el que mejor corrigió el efecto topográfico en imágenes Landsat TM, en comparación con los métodos de Civco y Minnaert.

5. DESARROLLO METODOLÓGICO

5.1. SELECCIÓN DE IMÁGENES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en la Serranía del Litoral del la Cordillera de la Costa, en la región centro-norte de Venezuela. Figura 1.

La imagen Landsat ETM+ del área de estudio se obtuvo del Servicio Mundial de Cobertura de la Tierra (Global Land Cover Facility) de la Universidad de Maryland (University of Maryland, 2006), mediante su aplicación Web Earth Science Data Interface (<http://glcapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>). Mediante esta aplicación se consultaron y revisaron las imágenes disponibles de Venezuela, en el área geográfica correspondiente a la zona de estudio. Se seleccionó la imagen que tenía la menor cubierta nubosa, la cual corresponde a la 042-974, del 14 de marzo de 2001, en formato GeoTiff.

5.2. OBTENCIÓN DEL MDT DEL ÁREA DE ESTUDIO

A partir del mapa digital a curvas de nivel disponible, se generó un MDT a la misma resolución de la imagen Landsat seleccionada (28,5 m de tamaño del píxel, 385 columnas y 454 filas) para lo cual se utilizó el software Idrisi. Este mapa ocupa un rectángulo de 10.972,50 m, en el eje Este, por 12.939,00 m, en el eje Norte. Abarca la cuenca hidrográfica del río El Limón y sus alrededores, con una superficie de 14.197,32 ha. El mapa a curvas de nivel se obtuvo por digitalización de cartas topográficas con equidistancia de 20 m. En la Figura 3 se presenta el MDT generado, en planta y en perspectiva con las ortofotos del área.

5.3. CÁLCULO DE LA PENDIENTE Y ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS

A partir del MDT se generó la imagen de Pendientes del Terreno y la de Aspectos u Orientación de Laderas, utilizando las herramientas de análisis de superficie del software Idrisi. En la Figura 4 se presentan estas imágenes. Estos productos se requieren como entrada para la aplicación del método de corrección de los efectos topográficos. Las zonas planas son identificadas en la imagen de Aspectos con un valor de -1. Con ellas se creó una máscara para asignar un valor de uno a la imagen de iluminación en esas zonas (efecto nulo de la topografía sobre la reflectividad).

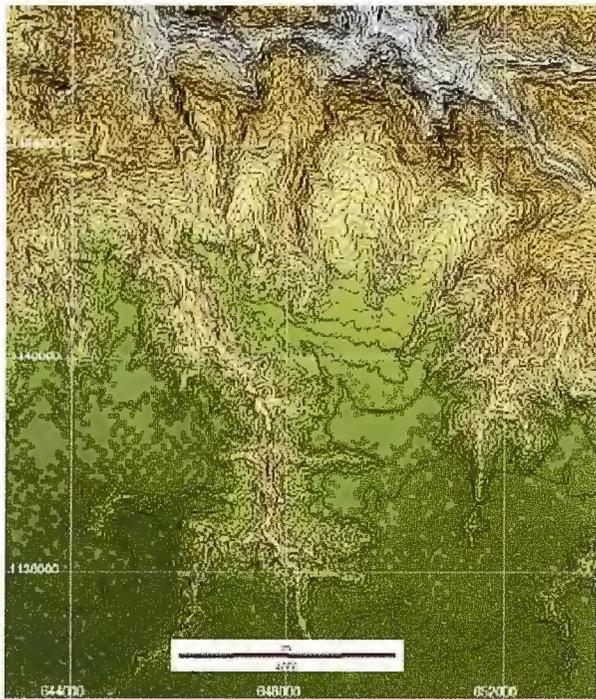
5.4. OBTENCIÓN DE LA IMAGEN DE OCUPACIÓN DE SUELO DE REFERENCIA

La evaluación de la exactitud de la imagen de tipos de ocupación, derivada del procesamiento de la imagen Landsat ETM+, se hizo comparando con una imagen de tipos de ocupación de referencia. Esta imagen de referencia se obtuvo mediante fotointerpretación de las ortofotos disponibles, que datan del año 1997 (Figura 5). El proceso de fotointerpretación se apoyó en la experiencia y trabajos de campos realizados entre los años 2000 y 2004 (Abarca, 2004).

El sector montañoso del área de estudio se localiza en el Parque Nacional Henri Pittier, zona natural protegida por la legislación ambiental venezolana. Allí predomina el Bosque, que puede ser distinguido en la imagen Landsat por su homogeneidad radiométrica, aunque estructuralmente

está conformado por varios tipos de formaciones boscosas, como el Bosque Nublado, el Bosque Semi-decíduo, el Bosque Decíduo y el Bosque Ribereño. Como consecuencia de los incendios de vegetación, la superficie de los bosques ha venido disminuyendo aceleradamente, principalmente en la vertiente sur del Parque, incrementándose la superficie de los Matorrales y de los Herbazales. En la zona plana del área también se localizan algunos lotes boscosos en las riberas de los ríos El Limón, el Güey y sus tributarios. Los Cultivos y Plantaciones tienen una ubicación localizada al centro-este, centro-oeste y sur-oeste de la imagen y predominan los cereales (maíz), hortalizas (cebolla, pimentón), leguminosas (caraotas), pastos y plantaciones de frutales (mango, aguacate, plátanos). En la Figura 6 se presentan algunas fotografías representativas de tipos de ocupación en el área de estudio.

Recondo et al. (2001) recomiendan el uso de un mapa de referencia del mismo año que la imagen a procesar, para evitar los errores por los cambios entre fechas, sin embargo dado que no se disponía de esta información, se utilizó el mapa digitalizado de las aerofotos del año 1997 y se actualizó con algunos tipos de cobertura fácilmente detectables en la imagen Landsat y levantamientos en el área (Abarca, 2004). De esta manera se actualizó en cierta medida el mapa de referencia con relación a la imagen. Los tipos de cobertura incluidos fueron las áreas quemadas por incendios de vegetación, la cubierta nubosa y las sombras proyectadas por las nubes. La cubierta nubosa y su sombreado fueron considerados como un tipo de cobertura dentro del sistema de clasificación, para evaluar el efecto del método de corrección topográfico, aunque esta categoría de uso sólo ocupa cerca del 1,7% de la imagen.



MDT en perspectiva con sobreposición de ortofotomapas

Figura 3. Modelo digital de Terreno (MDT) del área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

MDT en planta con sobreposición de curvas de nivel

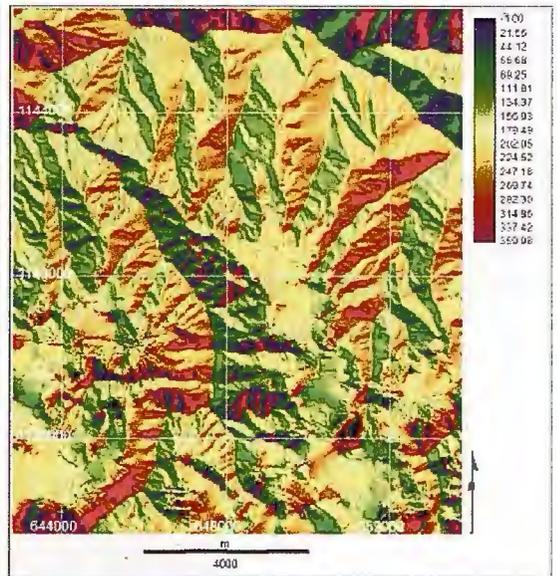
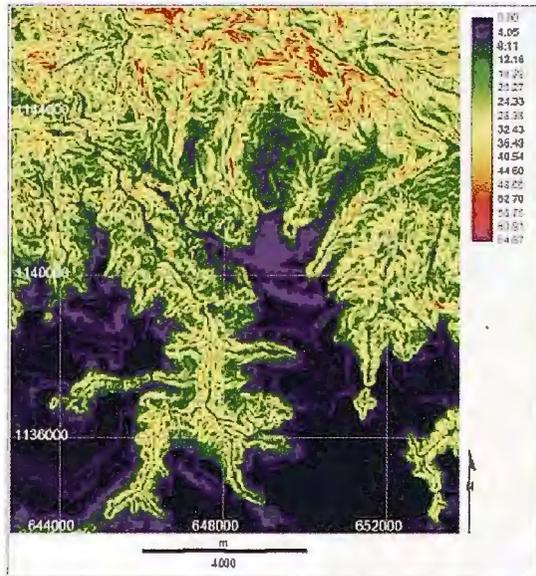


Figura 4. Pendientes del terreno (en grados decimales) y Aspectos u Orientación de laderas (en grados decimales). Fuente: Elaboración propia.

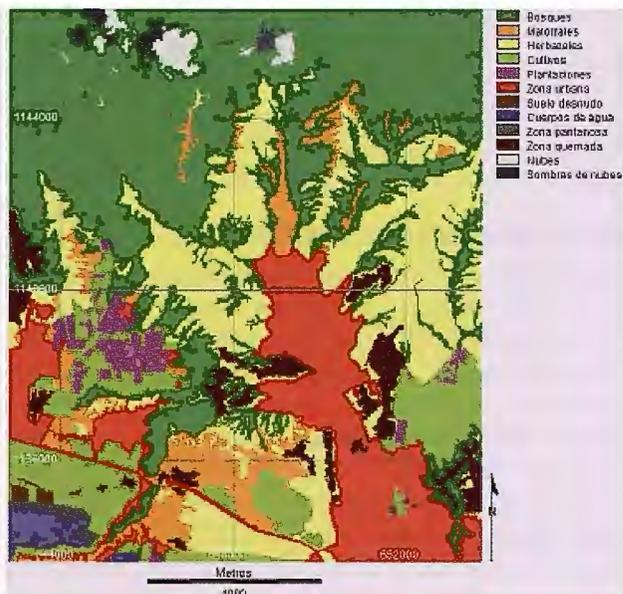
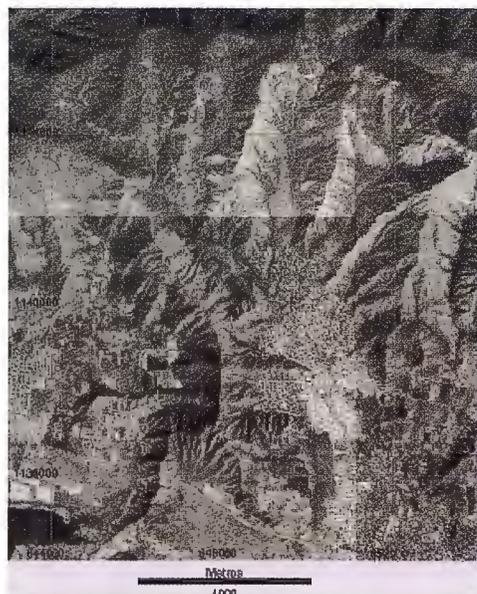


Figura 5. Subventana del mosaico de aerofotos del área de estudio (año 1997) y Tipos de Ocupación de Referencia (año 1997 con actualizaciones del año 2001). Fuente: Elaboración propia.

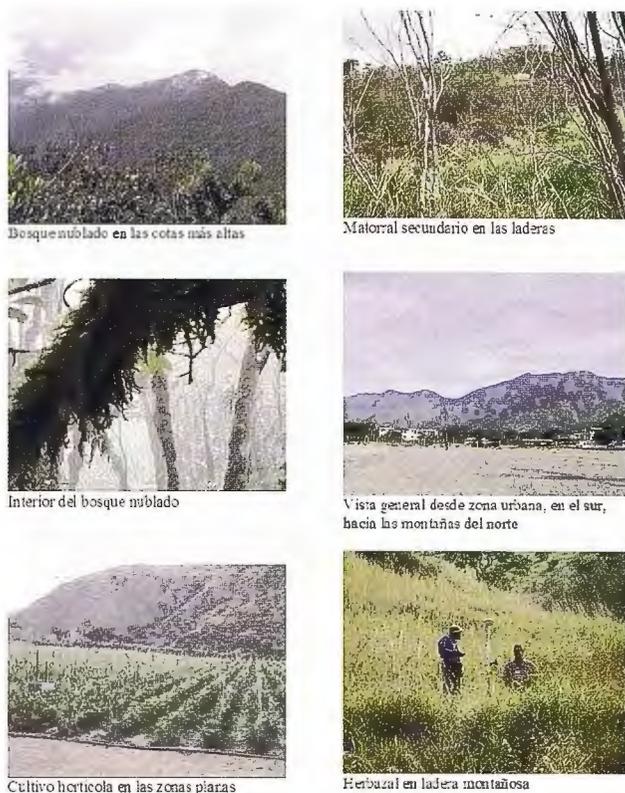


Figura 6. Fotografías de algunos tipos de ocupación del área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5 se presenta la imagen de tipos de ocupación de referencia y en la Tabla 1 se detalla la superficie de cada tipo de ocupación y su proporción relativa a la superficie total del área de estudio. Este último valor se utilizó como probabilidad "a priori" de los tipos de ocupación, valor necesario para el empleo del método Bayesiano de clasificación supervisada.

Tipo de cobertura	Superficie (ha)	Superficie (%)	Proporción
Bosques	5.694,36	40,11	0,4011
Matorrales	907,69	6,39	0,0639
Herbazales	2.800,64	19,73	0,1973
Cultivos	1.358,24	9,57	0,0957
Plantaciones	275,43	1,94	0,0194
Zona urbana	2.082,77	14,67	0,1467
Suelo desnudo	36,47	0,26	0,0026
Cuerpos de agua	151,89	1,07	0,0107
Zona pantanosa	63,76	0,45	0,0045
Zona quemada	582,14	4,10	0,0410
Nubes	142,31	1,00	0,0100
Sombras de nubes	101,61	0,72	0,0072
TOTAL	14.197,32	100,00	1,0000

Tabla 1. Superficie cubierta por los tipos de ocupación de referencia.
Fuente: Elaboración propia

Banda	Lmin (°)	Lmax (°)	Offset (Biases) (°)	Gains (°)	ND (Neblina)	Inf. Banda (µm)	Med. Banda (µm)	Sup. Banda (µm)	Max ND
1	-6,2	191,6	-6,20	0,775686	60	0,45	0,49	0,52	255
2	-6,4	196,5	-6,40	0,795686	37	0,53	0,57	0,61	255
3	-5	152,9	-5,00	0,619216	27	0,63	0,66	0,69	255
4	-5,1	241,1	-5,10	0,965490	20	0,78	0,84	0,90	255
5	-1	31,06	-1,00	0,125725	14	1,55	1,65	1,75	255
7	-0,35	10,8	-0,35	0,043725	9	2,09	2,22	2,35	255

Elevación del sol = 57,45° / Angulo Cenital Solar = 32,55° / Acimut sol = 110,92°

(*) : W.m².sr⁻¹.µm⁻¹

Tabla 2. Metadatos de la imagen Landsat ETM+ del 14/03/2001.

Fuente: University of Maryland (2006).

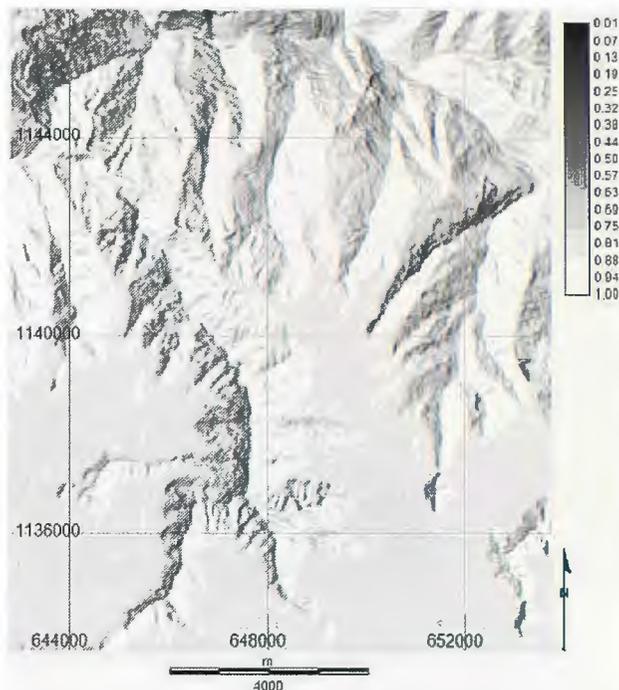


Figura 7. Imagen de iluminación (cos.).
Fuente: Elaboración propia

5.5. CORRECCIÓN DE LOS EFECTOS ATMOSFÉRICOS

En la Tabla 2 se presenta una síntesis del archivo de metadatos de la imagen, con los parámetros requeridos para realizar el procedimiento de cálculo de los valores de radiancia y reflectancia, así como para efectuar el procedimiento de corrección atmosférica según el método de Chávez (1996).

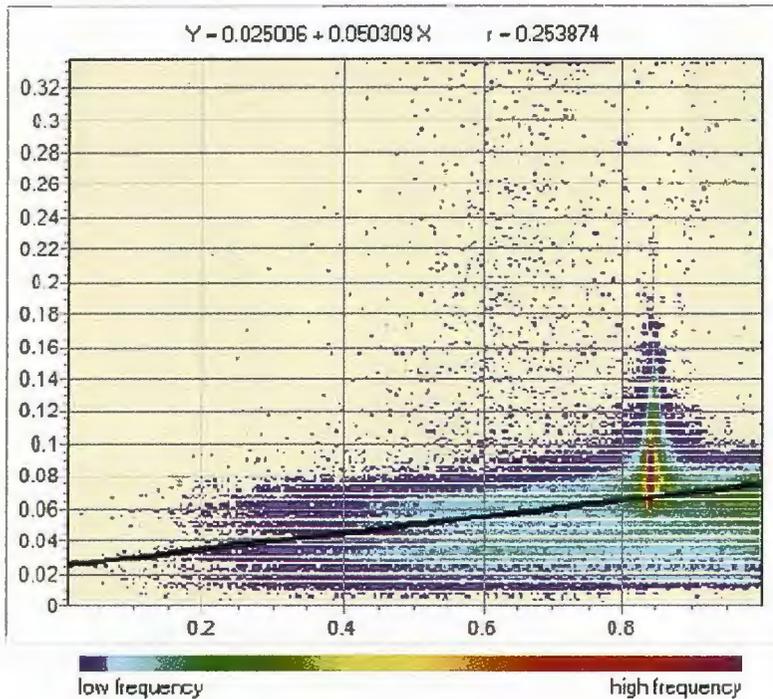
Para obtener el valor del Objeto Oscuro ($ND_{min,\lambda}$) de cada banda, se trazó un polígono sobre la sombra proyectada por una de las nubes (al centro norte de la imagen). Este polígono tiene una superficie de 9,75 ha y contiene 120 píxeles. Se utilizó un comando de análisis estadístico (EXTRACT en Idrisi) para obtener el valor mínimo de todos los píxeles en el polígono, sobre cada banda, y este fue el ND utilizado como valor de radiancia aportada por la dispersión atmosférica ($L_{a,\lambda}$), o neblina.

5.6. CORRECCIÓN DE LOS EFECTOS TOPOGRÁFICOS

Se aplicó el método del Coeficiente C, propuesta por Teillet et al. (1982).

Utilizando las imágenes de pendiente y aspecto, derivadas del MDT, el acimut solar y el ángulo cenital solar (Tabla 2), se calculó la proporción de reflectancia real que sale de la pendiente (imagen de iluminación). Esta imagen se presenta en la Figura 7.

El coeficiente C se derivó hallando la correlación entre la imagen de iluminación, como variable independiente, y cada una de las bandas de la imagen como variables dependientes. En la Figura 8 se presenta una de las graficas de correlación obtenidas y en la Tabla 3 los parámetros de cada ecuación y el correspondiente coeficiente.



Regression Parameters:

X axis: cosv
 Y axis: ellimon_20010314_b1_atmos

Coeff. of Det. = 6.45 %
 Std. Dev. of X = 0.158347
 Std. Dev. of Y = 0.031379
 S.E. of Estimate = 0.030351
 Std. Error of Beta = 0.000458
 t Stat for r or Beta = 109.733998
 t Stat for Beta <> 1 = -2071.473622
 Sample Size (n) = 174790
 Apparent df = 174788

Figura 8. Regresión entre la imagen de iluminación (cos) y la Banda 1 de la imagen sin corrección topográfica. Fuente: Elaboración propia.

Bandas	R	Parámetros del coeficiente C		Coeficiente C
		b	m	
1	0,25	0.025006	0.050309	0.497048
2	0,30	0.025359	0.072739	0.348630
3	0,33	0.014233	0.104643	0.136015
4	0,26	0.134338	0.100691	1.338148
5	0,43	0.037513	0.232648	0.161244
7	0,37	-0.004414	0.193781	-0.022778

Tabla 3. Análisis de regresión para la determinación del coeficiente C. Fuente: Elaboración propia.

Se aplicó el método y se corrigieron cada una de las bandas. En la Figura 9 se observa el efecto de la corrección en tres puntos de la banda 4. En otros puntos de estas imágenes también puede verse el efecto de reducción del sombreado.



Figura 9. Banda 4 de la imagen Landsat ETM+, sin corrección y con corrección topográfica. Puntos ilustrativos del efecto de la corrección. Fuente: Elaboración propia.

5.7. CLASIFICACIÓN DE LA IMAGEN

5.7.1. METODOLOGÍA NO SUPERVISADA

Se aplicó el método de agrupamiento llamado CLUSTER en Idrisi, que corresponde a la técnica de análisis de picos de histograma, sobre las bandas con corrección atmosférica y topográfica y sobre las bandas con sólo corrección atmosférica. También se utilizó el módulo conocido como KMEANS, el cual se basa en una técnica de agrupamiento para dividir una imagen n-dimensional en K cluster (grupos) exclusivos (Eastman, 2006). Los grupos espectrales,

determinados por los algoritmos de clasificación, fueron convertidos a las categorías de cobertura predefinidas, ajustando reiterativamente los parámetros de dichos algoritmos e interpretando los grupos resultantes con las clases de cobertura del mapa de referencia.

5.7.2. METODOLOGÍA SUPERVISADA

Áreas de entrenamiento: Se generó un mapa vectorial de polígonos, correspondiente a las áreas de entrenamiento identificadas sobre la imagen Landsat, en una composición de las bandas 2, 3 y 4 (falso color). Se hizo un proceso iterativo observando los resultados que se iban obteniendo e incorporando nuevas áreas de entrenamiento para mejorar los resultados. En la Figura 10 se presentan las áreas de entrenamiento definitivas seleccionadas sobre la imagen a falso color (en la Figura 6 se muestran fotografías representativas de estos tipos de cobertura).

Firmas espectrales: Se realizó la caracterización estadística de las clases informacionales digitalizadas como áreas de entrenamiento, usando el módulo MAKESIG en Idrisi. Esta caracterización, conocida como firma espectral, se presenta en la Figura 11 para el valor promedio de los píxel en cada clase de entrenamiento y para cada banda de la imagen sin corrección topográfica. De igual manera se procedió para la imagen con corrección topográfica.

Clasificación de la imagen: Se aplicaron varias técnicas de clasificación con fines comparativos. Las técnicas empleadas fueron: el método de la Mínima Distancia a la Media, el método de los Paralelepípedos, el método de Máxima Probabilidad, basado en la Teoría de Probabilidad Bayesiana, y el método de las Redes Neuronales Artificiales.

Para el método de Máxima Probabilidad se emplearon dos modalidades de cálculo. En una se consideró que la probabilidad "a priori" de los tipos de cobertura era igual para cada una de las clases. En la otra opción se le dio a cada clase la probabilidad de ocurrencia derivada de la imagen de cobertura de referencia, especificada en la Tabla 1 (proporción).

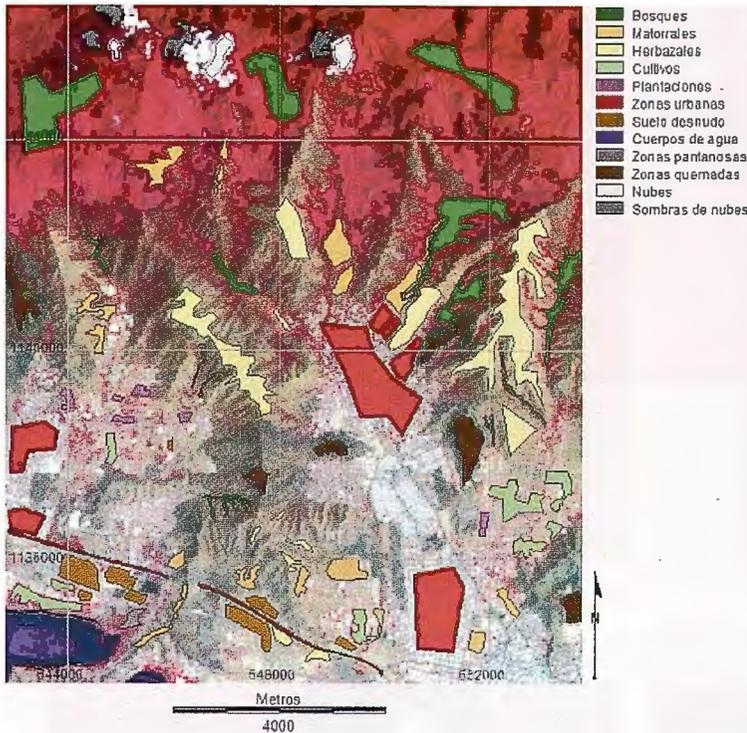


Figura 10. Áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada.
Fuente: Elaboración propia.

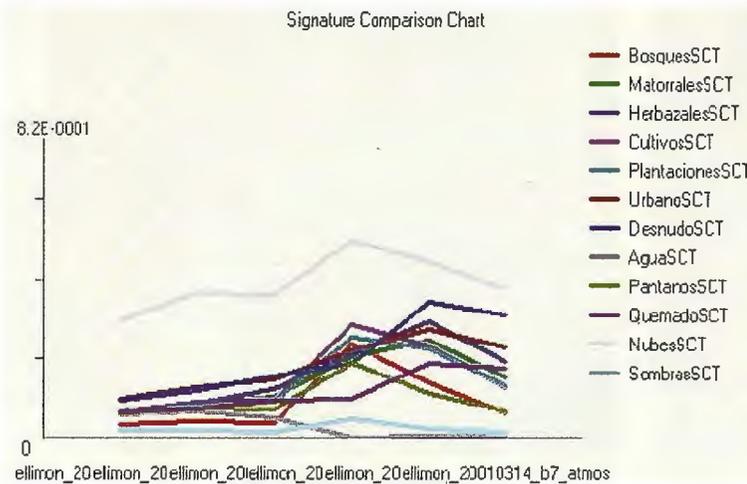


Figura 11. Firmas espectrales por clase informativa y por banda.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12 se presenta el resultado obtenido con una de las técnicas de clasificación supervisada empleadas (para las bandas sin y con corrección topográfica).

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. CORRECCIÓN DE LOS EFECTOS TOPOGRÁFICOS

Comparando las imágenes mostradas en la Figura 9, se puede observar como la imagen corregida pierde la sensación de tridimensionalidad, dado que se han reducido las sombras en las laderas ocultas al sol (orientadas hacia el oeste). Igualmente se puede observar como en esas laderas los tonos grises de algunos tipos de cobertura, como herbazales y bosques, se hacen prácticamente iguales a los tonos equivalentes de las laderas soleadas. Sin embargo al observar la Figura 13, que incluye composiciones de las bandas 2, 3 y 4, para las imágenes sin y con corrección

topográfica, se detecta una sobre-corrección en las laderas opuestas al sol en la imagen corregida.

Para realizar una evaluación cuantitativa se hizo un análisis de regresión entre la imagen de insolación ($\cos \nu$), como variable independiente, y las bandas con corrección topográfica, como variables dependientes. En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos.

En la Tabla 4 se observa como se redujo sustancialmente la correlación después de la corrección de los efectos topográficos, lo que indica que prácticamente se ha eliminado dicho efecto sobre la señal de la imagen.

6.2. CLASIFICACIÓN DE LA IMAGEN

Para evaluar los resultados de la clasificación se hizo un análisis visual comparativo de la imagen clasificada, tanto con el mapa de referencia de tipos de cobertura, como con la imagen Landsat.

Para hacer una evaluación cuantitativa se calculó la matriz de confusión, que se basa en una tabulación cruzada (crosstab) entre la imagen obtenida con la clasificación y el mapa de tipos de ocupación de referencia (que representa teóricamente la realidad del terreno). Para ello se utilizó en Idrisi el módulo ERRMAT, el cual también calcula el intervalo de confianza para las cifras y el Índice de Concordancia Kappa¹.

6.2.1. CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

Con esta clasificación los resultados fueron muy deficientes, lo que se evidencia tanto al hacer el análisis visual como en la evaluación cuantitativa. Esto sucedió con las dos técnicas de clasificación empleadas (CLUSTER y KMEANS) y con las imágenes corregidas y sin corregir.

En la Tabla 5 se observa el valor del índice Kappa para los dos métodos de clasificación. Visualmente se detecta un peor resultado cuando se clasifican las imágenes sin corregir por efectos topográficos. Se observan grupos del mismo tipo de ocupación que son separados por situarse en laderas soleadas o en sombra, aunque esto es sólo evidente en pequeñas áreas de la imagen. Lo mismo se evidencia en el índice Kappa.

6.2.2. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

El clasificador que generó los mejores resultados fue el de Máxima Probabilidad (MAXLIKE), tanto por el análisis visual de los resultados, en comparación con la realidad de la imagen de referencia, los ortofotomapas y el conocimiento que se tiene de la zona, como por la evaluación de la matriz de confusión y el índice de concordancia Kappa (Tabla 5).

¹ El índice Kappa (K) es un estadístico que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar. Un valor de K igual a 1 indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras que un valor cercano a cero sugiere que el acuerdo observado es puramente debido al azar (Chuvieco, 2002).

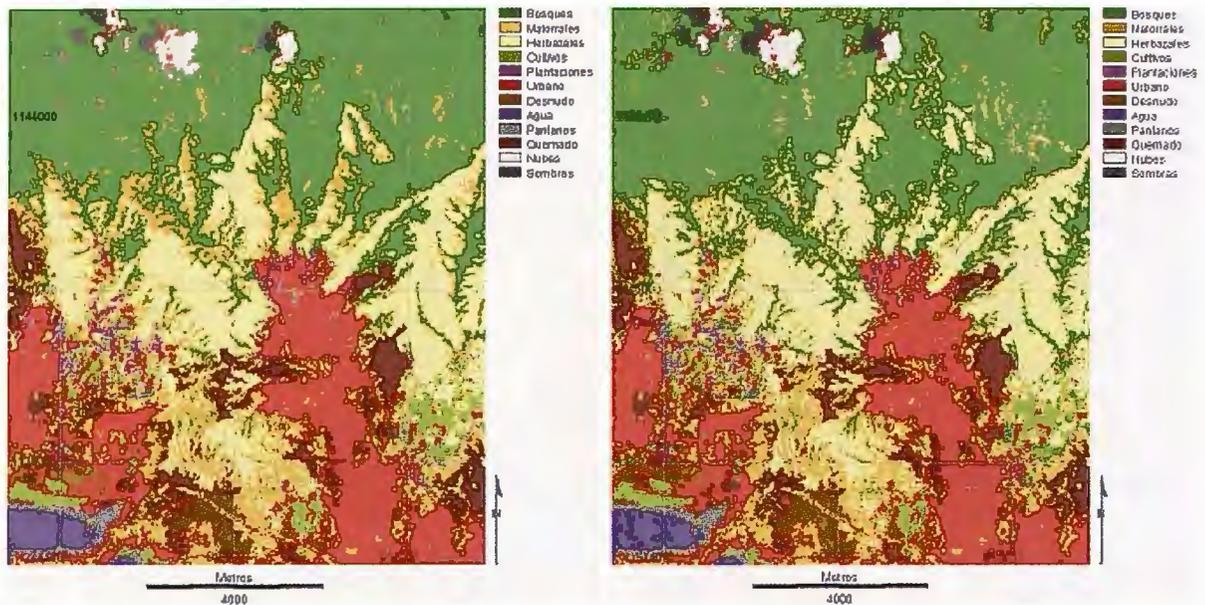


Figura 12. Imágenes clasificadas (Clasificador de Máxima Probabilidad) sin corrección topográfica y con corrección topográfica. Fuente: Elaboración propia.

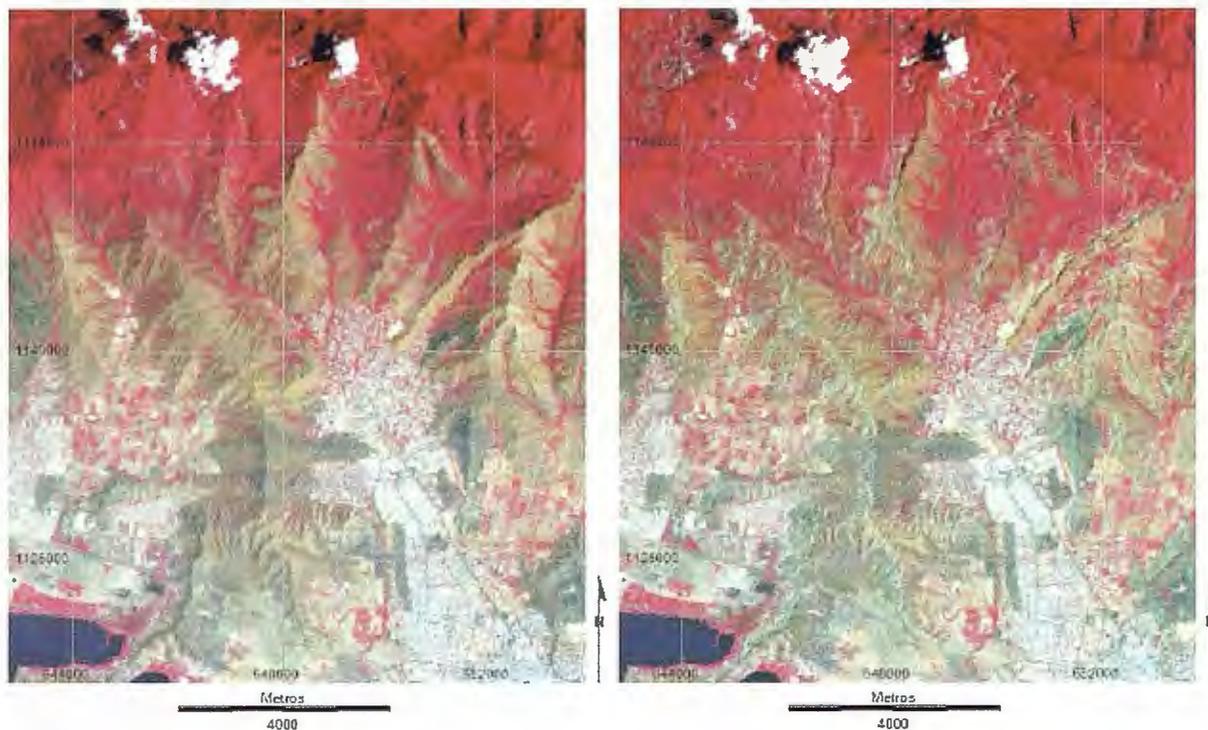


Figura 13. Composición de las bandas 2, 3 y 4 sin corrección de efectos topográficos y con corrección. Fuente: Elaboración propia.

Bandas	Coeficiente de determinación (R)	
	Imagen sin corrección topográfica	Imagen con corrección topográfica
1	0.25	0.0203
2	0.30	0.0201
3	0.33	0.0105
4	0.26	0.0001
5	0.43	-0.0111
7	0.37	0.0242

Tabla 4. Análisis de regresión entre la imagen de iluminación y las bandas de la imagen Landsat. Fuente: Elaboración propia.

Método de clasificación	Índice Kappa global	
	Imágenes corregidas	Imágenes sin corregir
Agrupamiento (CLUSTER)	-0.0484	-0.1356
Agrupamiento (KMEANS)	0.1028	-0.0030
Paralelepípedos (PIPED)	0.1700	0.1946
Mínima Distancia (MINDIST)	0.4023	0.3457
Máxima Probabilidad (MAXLIKE) probabilidad igual	0.5269	0.5286
Máxima Probabilidad (MAXLIKE) - probabilidad variable	0.5615	0.5610
Redes Neuronales (MLP)	0.4778	0.4696

Tabla 5. Valor del índice Kappa para las imágenes clasificadas con distintas técnicas. Fuente: Elaboración propia.

Comparando las cifras de la Tabla 5, se deduce que las imágenes sin corrección topográfica producen los mejores resultados, salvo para el clasificador de redes neuronales, aunque la diferencia del índice Kappa entre todas ellas es casi despreciable. Con relación al clasificador de Máxima Probabilidad, visualmente se aprecia un

resultado más acorde con la realidad en las imágenes sin corrección topográfica, principalmente en la identificación del tipo de cobertura Matorrales y en algunas zonas de transición Bosque/Matorrales, Bosque/Herbazales (Figura 12).

De acuerdo al análisis de la matriz de confusión corres-

pendiente al clasificador de Máxima Probabilidad con la imagen sin corrección topográfica (Tabla 6), los tipos de ocupación: bosques, uso urbano, cuerpos de agua, zonas quemadas, nubes y sombras de nubes, tienen niveles de error inferiores al 30%, mientras que el suelo desnudo, cultivos y plantaciones, tienen niveles de error superiores a 70%.

Cobertura	Categ.	1	2	3	4	5	ErrorC
Bosques	1	52915	1639	3172	123	107	0.0941
Matorrales	2	10501	4973	6936	2903	714	0.8228
Herbazales	3	3845	1844	19076	2196	260	0.3067
Cultivos	4	137	156	612	3336	809	0.4187
Plantaciones	5	251	200	124	536	781	0.6675
Urbano	6	669	874	2093	4781	660	0.3108
Desnudo	7	2	232	1064	1709	56	0.9936
Agua	8	0	0	0	30	0	0.1772
Pantanos	9	78	4	9	410	4	0.6491
Quemado	10	1477	1252	1391	495	0	0.4401
Nubes	11	6	1	0	3	0	0.0108
Sombras	12	224	0	3	0	0	0.2116
Total		70105	11175	34480	16722	3391	
ErrorO		0.2452	0.5550	0.4468	0.7885	0.7697	0.3472

Cobertura	Categ.	6	7	8	9	10	ErrorC
Bosques	1	95	20	2	0	6	0.0941
Matorrales	2	1681	10	7	0	295	0.8228
Herbazales	3	189	2	3	0	98	0.3067
Cultivos	4	515	256	2	26	0	0.4187
Plantaciones	5	417	10	3	10	2	0.6675
Urbano	6	22338	103	12	10	524	0.3108
Desnudo	7	141	21	0	0	71	0.9936
Agua	8	0	0	1750	347	0	0.1772
Pantanos	9	46	23	86	392	13	0.6491
Quemado	10	216	4	5	0	6138	0.4401
Nubes	11	4	0	0	0	0	0.0108
Sombras	12	0	0	0	0	0	0.2116
Total		25642	449	1870	785	7167	
ErrorO		0.1289	0.9532	0.0642	0.5006	0.1408	0.3472

Cobertura	Categ.	11	12	Total	ErrorC	Categ.	KIA
Bosques	1	14	317	58410	0.0941	1	0.6317
Matorrales	2	21	26	28067	0.8228	2	0.3388
Herbazales	3	0	0	27513	0.3067	3	0.4698
Cultivos	4	34	0	6083	0.4187	4	0.1830
Plantaciones	5	15	0	2349	0.6675	5	0.2198
Urbano	6	338	11	32413	0.3108	6	0.8418
Desnudo	7	0	0	3296	0.9936	7	0.0285
Agua	8	0	0	2127	0.1772	8	0.9350
Pantanos	9	42	10	1117	0.6491	9	0.4961
Quemado	10	0	0	10998	0.4401	10	0.8498
Nubes	11	1277	0	1291	0.0108	11	0.7269
Sombras	12	11	887	1125	0.2116	12	0.7071
Total		1752	1251	174789			Overall Kappa
ErrorO		0.2711	0.2910		0.3472		0.5610

Tabla 6. Matriz de Confusión e Índice de Concordancia Kappa para clasificación sin corrección topográfica. Fuente: Elaboración propia.

El principal tipo de cobertura de la zona, correspondiente a bosques, que cubre 40% del área, tiene un 24,52% de error de identificación, las zonas quemadas tienen un error de 14,08%, la zona urbana un error de 12,89%, los cuerpos de agua 6,42%, las nubes 27,11% y las sombras 29,10%. Las nubes y su sombra, al igual que el resto de tipos de cobertura, resultaron clasificados casi con el mismo error en las imágenes con y sin corrección topográfica.

El alto nivel de error en la identificación de los suelos desnudos (95,32%), cultivos (78,85%) y matorrales (55,50%) se puede atribuir a la variabilidad espacial y temporal de este tipo de coberturas, por lo que existen diferencias entre el mapa de ocupación de referencia (del año 1997) y la imagen Landsat (del año 2001). Las plantaciones también tienen un alto nivel de error (76,97%), pero este se debe a la dificultad estadística para su identificación, por la mez-

cla que existe entre el área cubierta por el dosel de las plantas y el área sin ninguna cobertura o cubierta por hierbas. En buena parte del área se presentan, todos los años, incendios de vegetación que afectan en gran medida a las áreas de herbazales y matorrales pero también impactan a las zonas de cultivos y plantaciones y reducen paulatinamente la superficie bajo bosques.

El área identificada como zona pantanosa también tiene un alto nivel de error (50,06%) y un índice Kappa de 49,61%. Esto se explica por la situación particular del crecimiento acelerado de la cota de agua del Lago de Valencia, el cual año tras año ha venido ocupando las tierras de sus márgenes, dedicadas al cultivo y al uso urbano, generando un gran problema de naturaleza socio-ambiental en la región. Este crecimiento ha hecho cambiar la extensión y ubicación de este tipo de ocupación, desde la situación del mapa de referencia (año 1997) hasta una nueva situación en la imagen Landsat (año 2001).

Cobertura	Categ.	1	2	3	4	5	ErrorC
Bosques	1	52933	2219	4003	658	424	0.1302
Matorrales	2	8549	4221	4529	2921	666	0.8178
Herbazales	3	5194	2207	20829	2246	237	0.3265
Cultivos	4	614	153	626	3353	767	0.4700
Plantaciones	5	347	153	71	386	626	0.6768
Urbano	6	761	787	1841	4558	610	0.2999
Desnudo	7	12	262	1092	1681	52	0.9936
Agua	8	0	0	0	32	0	0.1782
Pantanos	9	40	12	7	414	5	0.6272
Quemado	10	1356	1150	1426	468	3	0.4267
Nubes	11	84	9	41	5	1	0.1179
Sombras	12	215	2	15	0	0	0.2120
Total		70105	11175	34480	16722	3391	
ErrorO		0.2449	0.6223	0.3959	0.7995	0.8154	0.3438

Cobertura	Categ.	6	7	8	9	10	ErrorC
Bosques	1	309	33	3	0	2	0.1302
Matorrales	2	1825	11	5	0	423	0.8178
Herbazales	3	168	3	3	0	39	0.3265
Cultivos	4	502	256	1	26	0	0.4700
Plantaciones	5	329	8	2	8	2	0.6768
Urbano	6	22080	91	15	10	427	0.2999
Desnudo	7	135	21	0	0	44	0.9936
Agua	8	0	0	1748	347	0	0.1782
Pantanos	9	47	22	87	394	4	0.6272
Quemado	10	207	4	6	0	6225	0.4267
Nubes	11	39	0	0	0	1	0.1179
Sombras	12	1	0	0	0	0	0.2120
Total		25642	449	1870	785	7167	
ErrorO		0.1389	0.9532	0.0652	0.4981	0.1314	0.3438

Cobertura	Categ.	11	12	Total	ErrorC	Categ.	KIA
Bosques	1	10	266	60860	0.1302	1	0.6244
Matorrales	2	2	10	23162	0.8178	2	0.2827
Herbazales	3	0	0	30926	0.3265	3	0.519
Cultivos	4	28	0	6326	0.47	4	0.1705
Plantaciones	5	5	0	1937	0.6768	5	0.1755
Urbano	6	330	30	31540	0.2999	6	0.8305
Desnudo	7	0	0	3299	0.9936	7	0.0284
Agua	8	0	0	2127	0.1782	8	0.934
Pantanos	9	15	10	1057	0.6272	9	0.4989
Quemado	10	0	13	10858	0.4267	10	0.8599
Nubes	11	1347	0	1527	0.1179	11	0.7668
Sombras	12	15	922	1170	0.212	12	0.7552
Total		1752	1251	174789			Overall Kappa
ErrorO		0.2312	0.2630		0.3438		0.5615

Tabla 7. Matriz de Confusión e Índice de Concordancia Kappa para clasificación con corrección topográfica. Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados son equivalentes a los deducidos del índice Kappa (Tabla 6). Éste toma valores que varía de un mínimo de 2,85% para suelos desnudos, hasta un máximo de 93,50% para los cuerpos de agua.

En la Tabla 7 se presentan los resultados de la matriz de confusión e índice Kappa, obtenidos para el clasificador de Máxima Probabilidad sobre las imágenes con corrección topográfica.

Estos toman valores bastante parecidos a los de la imagen sin corrección topográfica. La mayor diferencia se presenta en la identificación de los matorrales, con un 62,23% de error, que es congruente con lo observado en las imágenes.

7. CONCLUSIONES

- Desde el punto de vista cuantitativo el método de corrección reduce el efecto topográfico sobre las imágenes, tal como se deduce del análisis de regresión entre la imagen de iluminación y las bandas sin y con corrección topográfica (Tabla 4), sin embargo, visualmente el método utilizado produce una evidente sobre-corrección en las laderas opuestas al sol.
- La corrección de los efectos topográficos con el método seleccionado no mejora el proceso de clasificación de las imágenes, tanto con el empleo de métodos supervisados, como con métodos no supervisados. Este resultado ocurre tanto para las categorías de cobertura que tienen un alto nivel de error de determinación (suelo desnudo, cultivos, plantaciones), como para los tipos de cobertura con bajo índice de error y alto índice de concordancia Kappa (bosques, zonas quemadas, cuerpos de agua, nubes y sombras).
- La zona de estudio tiene una ubicación latitudinal cercana al Ecuador, por lo que el sol presenta a lo largo de todo el año un ángulo de elevación relativamente alto durante la hora de toma de las imágenes, siendo en consecuencia menor el efecto de sombreado que en latitudes altas. Por tal razón la corrección de efectos topográficos parece innecesaria en esta zona, principal aspecto que se pretende evaluar al seleccionar un área de estudio en latitudes tropicales, pero se deben estudiar áreas de relieve más accidentado y otros métodos de corrección, en la misma faja intertropical, para poder sustentar conclusiones en este sentido.
- Los métodos de clasificación supervisados resultaron ser los más efectivos y en particular el algoritmo de Máxima Probabilidad (clasificador Bayesiano) utilizando probabilidades "a priori" diferentes para cada tipo de cobertura.
- La imagen de ocupación del suelo utilizada como referencia tiene una diferencia de cuatro años con relación a la imagen Landsat, por lo que se hizo una actualización (a la fecha de la imagen de satélite) para algunos tipos de ocupación, como las áreas quemadas y los herbazales. En ese lapso de tiempo se han producido cambios derivados básicamente de los incendios de vegetación. La superficie ocupada por el Lago de Valencia y las zonas pantanosas aledañas se han incrementado en pequeña proporción y las áreas urbanas se han mantenido relativamente estables. Estos cambios, a pesar de la actualización, pudieron afectar los valores de la matriz de confusión y contribuir negativamente con el bajo índice global Kappa. Sin embargo, para algunos tipos de cobertura se obtuvo un índice Kappa elevado y allí, consistentemente, al igual que para las coberturas de bajo índice, no hubo diferencia significativa entre las imágenes clasificadas con y sin corrección topográfica.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarca, O. (2004): *Optimización del aprovechamiento de los recursos hidráulicos superficiales que abastecen a la red de acueductos locales de la población de El Limón, Municipio Mario B. Iragorry, Estado Aragua*. Maracay-Venezuela: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela. 80 pp.
- Arribas, D. (2002): "Análisis y cartografía de las propiedades de los combustibles mediante teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG)". *Ecosistemas*. Año XI, No 3/2002. Septiembre-Diciembre [en línea]. [Citado 10 enero de 2007]. Disponible en WWW: < <http://www.revistaecosistemas.net/pdfs/269.pdf>>.
- Chávez, P. (1996): "Image-based atmospheric corrections - Revisited and improved". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), pp. 1025-1036.
- Civco, D. (1989): "Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55, pp. 1303-1309.
- Chuvieco, E. (2002): *Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona-España: Ariel Ciencia. 586 pp.
- Chuvieco, E.; Heredia, A.; Martínez, S.; Piñeros, W. y Quintero, E. (2003): "Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes Landsat ETM+". *Geofocus* (Artículos), N° 3, 2003, pp. 216-234 [en línea]. [Citado 12 enero 2007]. Disponible en WWW: < <http://geogocus.rediris.es/principal.html>>.
- Eastman, R. (2006): *Idrisi Andes. Guide to GIS and Image Processing*. Worcester, Ma: Clark Labs, Clark University. 327 pp.
- Google Earth (2006): [En línea]. [Consulta: 04 al 11 de mayo de 2006].
- Justice, C.; Wharton, S. y Holben, B. (1981): "Application of digital terrain data to quantify and reduce the topographic effect on Landsat data". *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 2, July-Sept. 1981, pp. 213-230.
- Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC) (2006): *ANAPRO Digital*. Centro de Ecología - Unidad de Información Geográfica [en línea]. Actualizado en 2006. [Consulta: 04 al 11 de mayo de 2006]. Disponible en WWW: <http://ecosig.ivic.ve/mapa_pn.htm>.
- Minnaert, M. (1941): "The reciprocity principle in lunar photometry". *Astrophysics Journal*, Vol. 93, pp. 403-410.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2006): *Landsat 7 Science Data Users Handbook* [en línea]. Actualizado en 2005. [Consulta: 04 al 11 de mayo de 2006]. Disponible en WWW: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter1/chapter1.html>.
- Ormeño, S. (2006): *Teledetección Fundamental*. 3Ed. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía. 344 pp.
- Proy, C.; Tanre, D. y Deschamp, P. (1989): "Evaluation of topographic effects in remotely sensed data". *Remote Sensing the Environment*, 30, pp. 21-32.
- Smith, J.; Lin, T. y Ranson, K. (1980): "The Lambertian assumption and Landsat Data". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46, pp. 1183-1189.
- Teillet, P.; Guindon, B. y Goodeonugh, D. (1982): "On the slope-aspect correction of multispectral scanner data". *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 8, pp. 84-106.
- Recondo, C.; Méndez, A.; García, P.; González, R. y Sáez, E. (2001): "Un método sencillo para la corrección topográfica de imágenes de satélite. Aplicación a imágenes Landsat-TM de los Consejos de Mieres y San Martín del Rey Aurelio (Asturias) para obtener mapas de vegetación". *Mapping Interactivo*, Enero/Febrero 2001, N° 67 [en línea]. [Citado 12 enero 2007]. Disponible en WWW: <http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=103>.
- Schneider, K. y Robbins, P. (Ed) (2001): *GIS and Mountain Environments*. Worcester, Ma: Clark Labs, Clark University. UNITAR. Volume 5. 125 pp.
- University of Maryland (2006): *Earth Science Data Interface (ESDI) at the Global Land Cover Facility* [en línea]. Actualizado en 2004. [Consulta: 04 al 11 de mayo de 2006]. Disponible en WWW: <<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>>.