

Análisis de textura en imágenes de satélite

en el ámbito de la biodiversidad y la estructura en un
bosque de los Andes Colombianos

Recibido para evaluación: 21 de Febrero de 2008

Aceptación: 25 de Noviembre de 2008

Recibido versión final: 10 de Diciembre de 2008

Jesús Adolfo Anaya Acevedo¹
Rosa Alexandra Duque Londoño²
Germán Mauricio Valencia Hernández³

RESUMEN

Este trabajo evalúa la relación entre la textura calculada a partir de una imagen de satélite Ikonos con la diversidad y la estructura a lo largo de un corredor con 43 parcelas en los bosques andinos de Colombia. Para ello, utiliza índices de diversidad calculados en 43 parcelas y mapas detallados de Usos del Suelo que separan los bosques desde un punto de vista estructural. A partir de la imagen se obtuvieron valores de textura utilizando matrices de co-ocurrencia de niveles de gris, GLCM (por sus siglas en Inglés *Gray Level Co-occurrence matrix*) y GLDV (*Grey Level Difference Vector*). Tradicionalmente la textura se ha interpretado desde el punto de vista cualitativo entre liso y rugoso, sin embargo nuestra aproximación con el uso de matrices permite una medición cuantitativa.

Los valores de textura se relacionan con información de campo con dos niveles de detalle distintos: primero con estudios de biodiversidad (índice de Shannon y riqueza) en zonas de bosque a partir de levantamiento de parcelas en campo; y segundo con el mapa de Uso del Suelo (bosque natural, bosque plantado, bosque secundario, cultivos y pastos), zonas consideradas como representativas de la estructura de la vegetación. Los resultados se basan en las relaciones entre estructura y diversidad, textura y diversidad y textura y estructura. La textura en Ikonos muestra un alto potencial para separar bosques en diferentes estados sucesionales; sin embargo, la relación entre datos obtenidos por teledetección y diversidad sigue siendo débil. Se alude frecuentemente a imágenes Landsat de la misma zona a modo de referencia o comparación.

PALABRAS CLAVE: Biodiversidad, Estructura del Bosque, Textura, Ikonos.

ABSTRACT

The relationship between texture calculated from an Ikonos image with diversity and structure was evaluated along a corridor with 43 field plots in the Colombian Andes. Diversity indexes were calculated at the 43 plots and Land Use maps were used as an approach to vegetation structure. Texture was obtained from an Ikonos image using Gray Level Co-occurrence Matrix GLCM and Gray Level Difference Vector GLDV. Traditionally, texture has been interpreted from a qualitatively point of view from smooth to rough, however our approach using a matrix allows for a quantitative measurement.

Texture was related to field information at two different detail levels: first with diversity measurements (Shannon Index and Richness) established at forest plots and second, with classes of a land use map (primary forest, secondary forests, forest plantation, crops and pastures) considered to be representative of vegetation structure. Results are based on relations between structure-diversity, texture-diversity and texture-structure. Ikonos texture presents a large potential to classify forests at different successional stages; however, the relation between diversity and data gathered with remote sensing is still weak. Landsat images are mentioned throughout the text as a reference or comparison with Ikonos images.

KEYWORDS: Biodiversity, Forest Structure, Texture, Ikonos.

1. Mg., Dr. (C), Profesor Universidad de Medellín.

2. Mg., Profesora Universidad de Medellín.

3. I. A., Profesor Universidad de Medellín.

janaya@udem.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

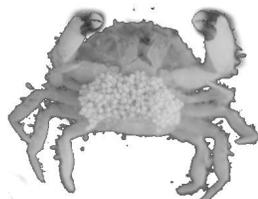
Los bosques tropicales son altamente heterogéneos y su caracterización a través del uso de sensores remotos es un gran reto, no solo por la gran cantidad de especies que pueden existir en pocos metros cuadrados sino a la imposibilidad de acceder a los estratos bajos del dosel. Adicionalmente Kalacska et al., (2007) advierte que independientemente de los sensores utilizados, la mayor dificultad para identificar especies en bosques tropicales es su compleja dinámica fenológica. A pesar de las limitaciones propias de esta tecnología, la tendencia en productos obtenidos por plataformas satelitales es hacia el aumento en las resoluciones espacial, espectral y radiométrica, mejorando la separabilidad entre distintos tipos de bosque (Boyd y Danson, 2005) y la discriminación entre especies forestales demostrada a través de espectro - radiometría (Van Aardt y Wynne, 2001, Foody y Cutler, 2003).

Distintos tipos de resolución ofrecen ventajas y desventajas en los dominios espaciales y espectrales (Thenkabail et al., 2003). Una de las ventajas de utilizar imágenes de resolución espacial media, como Landsat, ha sido la posibilidad de estimar indirectamente la estructura de los bosques, dado que los valores de los píxeles integran el dosel, el sotobosque, el suelo y las sombras, permitiendo generalizar la reflectividad dentro de un mismo tipo de cobertura (Asner et al., 1998). Por otro lado la utilización de imágenes de mayor resolución espacial, tipo Ikonos, ofrecen píxeles de mayor pureza y por tanto con mayor capacidad de discernir entre especies o individuos (Wang et al., 2004). Wulder et al. (2004) cita varios estudios donde se han separado diferentes especies de coníferas (Franklin et al., 2000, Key et al., 2001) y se logra la estimación individual de especies arbóreas (Cohen et al., 1995, 2001, Gougeon, 1995).

Existen numerosos métodos de clasificación basados en el dominio espectral para asignar el valor de un píxel a un tipo de vegetación determinado. Sin embargo en imágenes Ikonos el dominio espacial adquiere gran importancia por su alta resolución y los análisis de textura se hacen relevantes en los procesos de clasificación. La Figura 1 muestra claramente el efecto del tamaño del píxel en una zona boscosa. Por ejemplo, la copa de un mismo árbol puede presentar distintos valores de píxel en el espacio espectral con píxel de 4 m (corona iluminada, corona a la sombra, diferencias morfológicas, etc) mientras que un píxel de 28.5 m sólo representaría la continuidad de muchas copas.

El color y el brillo de los píxeles son utilizados comúnmente como parámetros para la descripción de imágenes de satélite; sin embargo un parámetro menos utilizado pero igualmente importante es la textura (grano) que se calcula en un conjunto de píxeles conectados y contiene información espacial sobre las variaciones tonales en cada banda. Dado que la textura se basa en las diferencias entre valores de píxeles adyacentes es mejor utilizar este tipo de análisis sin haber realizado ningún filtrado previo a las bandas, tales como los promedios por convolución (PCI, 2003), mientras que la banda más adecuada para realizar análisis de texturas en vegetación es el infrarrojo cercano alrededor de $0.83 \mu\text{m}$ (Asner, et al., 2003). Haralick et al. (1973) definieron 14 características inherentes al análisis de la textura, entre ellas la entropía, la variancia, la correlación y el contraste. Cada una de estas características varía de acuerdo al tipo de imagen en función del dominio espectral, la resolución espacial y las características del objeto en estudio (dimensión, forma y distribución espacial) (Kayitakire et al., 2006).

Con este estudio se exploraron las posibilidades de imágenes ópticas para hacer una aproximación al estado de conservación de los bosques y su diversidad utilizando la textura. La ecología actual enfatiza la importancia de tener en cuenta la perspectiva espacial en los procesos y patrones ecológicos. Sin embargo el levantamiento y el análisis de información espacial es costoso (Perry y Enright, 2007), por lo que parece razonable que la teledetección se presente como una herramienta de apoyo importante.



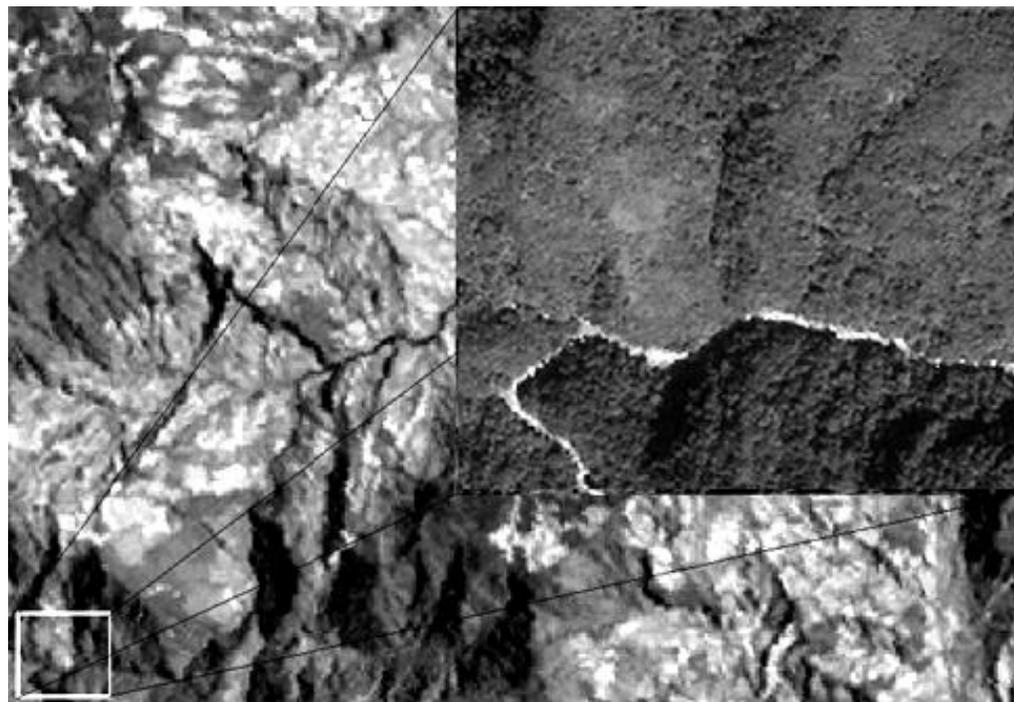


Figura 1. Comparación del máximo nivel de detalle posible en zona boscosa correspondiente a una imagen Landsat (fondo) con píxel de 28.5 m y una imagen Ikonos con píxel de 4 m.

El primer objetivo fue relacionar valores de riqueza obtenidos en campo con datos de teledetección. Para ello se visitaron parcelas previamente establecidas en la zona por el proyecto OIMT PD 54/99 Rev. 2 (F), a través de CORNARE, en convenio con la Universidad Nacional; estas parcelas tenían como fin caracterizar la vegetación de la zona. El segundo objetivo fue encontrar el potencial de la textura para separar coberturas vegetales, haciendo énfasis en bosques en distintos estados sucesionales identificados en mapas de Usos del Suelo. El mapa de Usos del Suelo utilizado está compuesto tanto de usos (p.e. plantaciones o cultivos) como de coberturas (bosque primario o rastrojo alto).

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudio

Este estudio fue llevado a cabo dentro de una franja ubicada entre las áreas estratégicas definidas como «Áreas de Plantaciones y Bosques Secundarios» FMHC1 y «Áreas de cañones con Bosques Secundarios Pluviales» MMHM3 (Figura 2), entre las veredas Normandía del municipio de El Retiro y La Cristalina del municipio de El Carmen de Viboral, jurisdicción de CORNARE, con coordenadas geográficas mínimas -75.62 oeste y 5.87 norte y máximas -75.16 oeste y 6.18 norte con referencia al elipsoide WGS84. Debido a la influencia antrópica, los bosques se encuentran altamente fragmentados en una matriz compuesta por pastizales, cultivos e infraestructura, incluyendo zonas donde el valor del suelo es particularmente alto. Desde el punto de vista geomorfológico se encuentra en la cordillera central de los Andes con alturas entre 900 y 2700 msnm, se extiende desde el occidente hacia el oriente por una zona de cimas seguidas de filas y vigas intercaladas con colinas y lomas hacia el centro; en el oriente se encuentra una zona de cañones caracterizado por vertientes largas y pendientes fuertes. Las precipitaciones en El Retiro tienen una media cercana a los 2000 mm mientras que hacia el Carmen de Viboral superan los 4000 mm con alta nubosidad a lo largo del año.

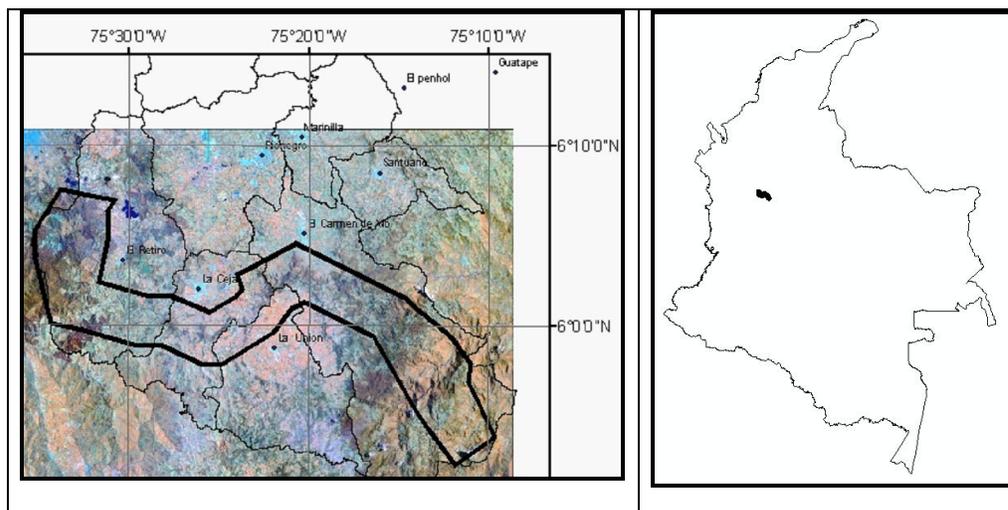


Figura 2. Área de Estudio. División política y corredor Occidente-Oriente en la cordillera Central de los Andes Colombianos.

2.2. Imágenes de satélite

Para este estudio, se adquirió una imagen Landsat ETM+ de archivo y se solicitó la toma de una imagen Ikonos para todo el corredor. La imagen Ikonos tiene su mayor fortaleza en estudios de diversidad en el tamaño del píxel, mientras que su mayor debilidad es su baja resolución espectral (Tabla 1). La imagen Landsat fue utilizada para evaluar el efecto del tamaño del píxel en los análisis. Para el procesamiento se conservó el sistema de coordenadas y proyección original de las imágenes UTM 18N y elipsoide WGS84.

Tabla 1. Características de las imágenes.

	Ikonos	Landsat ETM+
Resolución espectral (μm)	0.45 - 0.52	0.45 - 0.52
	0.51 - 0.60	0.52 - 0.60
	0.63 - 0.70	0.63 - 0.69
	0.76 - 0.85	0.76 - 0.90
		1.55-1.75
Resolución Espacial (m)		10.40-12.55
		2.08-2.35
		0.52-0.90
	4	28.5

2.3. Uso del Suelo

Se actualizó el mapa de Usos del Suelo de 1992 con la imagen Ikonos de 2006 siguiendo la metodología Corine Land Cover CLC (Perdiago y Annoni, 1997). Cada polígono de 1992 fue actualizado siguiendo los contornos identificados en la imagen Ikonos y se realizaron visitas de campo en polígonos de difícil identificación. Este método permitió definir el número de polígonos para cada clase de cobertura vegetal y su respectiva área en hectáreas para 2006. El objetivo de este mapa es tratar cada polígono como una característica estructural de los bosques desde el punto de vista de la sucesión, siendo los bosques naturales los menos intervenidos y por tanto los que tienen mayores valores de biomasa, seguidos por los bosques secundarios y los rastrojos altos. La Tabla 2 presenta el detalle al que se separan los bosques; se asume que el estado sucesional corresponde al estado de su conservación. Por otra parte no se incluyen los bosques plantados dentro de los otros estados sucesionales por tratarse de una cobertura boscosa generalmente en monocultivo de coníferas.

CÓDIGO*	No. Polígonos	Área ha	CÓDIGO*	No. Polígonos	Área ha
Bn1i	94	1953	Bn2t	569	7404
Bn1m	32	978	Bp1c	362	3522
Bn2a	625	2198	Bp1l	18	35
Bn2i	813	4713	Bp2c	23	136

Bn1i: Bosques naturales primarios intervenidos
Bn1m: Bosques naturales primarios muy intervenidos
Bn2a: Bosques naturales secundarios sucesión temprana
Bn2i: Bosques naturales secundarios sucesión intermedia

Bn2t: Bosques naturales secundarios sucesión tardía
Bp1c: Bosques plantados maduros coníferas
Bp1l: Bosques plantados maduros latifoliadas
Bp2c: Bosques plantados juveniles coníferas

Tabla 2. Uso de Suelo en Bosques.

Dado que esta clasificación de Usos del Suelo ha sido generada inicialmente con técnicas de interpretación de fotos aéreas y trabajo de campo se considera de alta calidad para ser utilizada como verdad de campo.

2.4. Parcelas permanentes

Las parcelas están ubicadas en la zona de estudio y establecidas dentro del proyecto «Modelo de Financiamiento Alternativo para el Manejo Sostenible de los Bosques de San Nicolás (Cornare –OIMT)» y se cuenta con su caracterización estructural y florística. En total son 235 parcelas de las que se seleccionaron 43 ubicadas en bosque húmedo montano bajo y bosque muy húmedo tropical; las áreas de las parcelas son de 500 y 200 m² para bosques naturales y 250 y 100 m² para bosques secundarios y de 100 y 50 m² para rastrojos (Universidad Nacional de Colombia, 2002). Es de esperar que la reflectividad no sea la misma en el momento del establecimiento de las parcelas que en la fecha de la toma de las imágenes. De hecho el cambio en reflectividad es muy rápido y está fuertemente influenciado a lo largo del año por la humedad o por la fenología, es decir por variaciones temporales. Sin embargo se asume que la variabilidad en reflectividad (en términos de textura) al interior de las parcelas permanece relativamente constante entre 2002 y 2006.

2.5. Cálculos

2.5.1 Parcelas

Se realizaron múltiples salidas de campo para georreferenciar con GPS cada una de las parcelas y corroborar la existencia de los individuos previamente identificados en los formularios de campo. Con los medios disponibles no fue posible realizar una corrección diferencial de los datos. Sin embargo se tomaron puntos GPS en sitios de control fácilmente identificables en las imágenes, lo cual corroboró que la exactitud se encontraba dentro de los rangos esperados y próximos o menores a 15 m. Para cada parcela se determinó el número de especies presentes (riqueza), el índice de Shannon, y la abundancia relativa de las especies, llamada en general regularidad o equitatividad (Qinghong, 1995).

El índice de diversidad de Shannon (H') se calcula como:

$$H' = \sum p_i \ln p_i$$

Siendo p_i la proporción de individuos de la especie i , es decir, $p_i = n_i/N$. Este índice requiere que todas las especies estén representadas en la muestra. Es un índice muy susceptible a la abundancia. Mide la heterogeneidad de la comunidad y el valor máximo será indicador de una situación en la cual todas las especies son igualmente abundantes.

La Equitatividad se calcula como:

$$E = H' / H \text{ max o } H' / \ln S$$

siendo S el número total de especies.

2.5.2 Imágenes de satélite

Para determinar la textura, se utilizó la matriz de co-ocurrencia de niveles de gris GLCM (del Inglés Grey Level Co-occurrence Matrix). La GLCM es un histograma de dos dimensiones de niveles de gris por pares de píxeles (referencia, vecino), los cuales se encuentran a una distancia fijada por una relación espacial. La relación espacial de vecindad para conformar pares de píxeles puede definirse como en cualquier otro proceso que utilice una ventana en un proceso de convolución. Las direcciones en el espacio pueden ser de 0, 45, 90 o 135 grados. El siguiente ejemplo muestra una GLCM definiendo la vecindad espacialmente como (0,1), es decir que el píxel vecino está un píxel debajo del píxel de referencia.

4	6	8	5	4		4	5	6	7	8	9		
5	5	8	7	6		4	0	1	1	0	0	1	
6	7	7	7	9		5	0	0	1	2	0	0	
8	8	4	8	6		6	0	1	1	0	1	1	
9	8	9	5	6		7	1	0	0	1	2	0	
					a) Ventana de la imagen (kernel)		8	0	1	0	1	2	1
						b) Matriz (GLCM)	9	0	0	1	0	0	0

Figura 3. Obtención de una matriz GLCM a partir de una ventana de 5 * 5 píxeles.

La primera fila y la primera columna en la Figura 3(b) contienen los valores de los píxeles y en su interior se encuentra el número de veces que se presenta la relación entre el píxel referencia y el vecino. Adicionalmente a la distribución de las ocurrencias entre píxeles vecinos y de referencia se puede tener una aproximación a la magnitud en diferencia entre Números Digitales con una co-ocurrencia mayor a cero GLDV (Gray Level Difference Vector). Nótese que la diferencia absoluta más alta (5), viene de 9-4 sólo ocurre una vez, mientras que la diferencia absoluta más baja es la más común (1); por otro lado ningún par presenta una diferencia absoluta de 4.

De esta forma cabe esperar que coberturas vegetales cuya reflectividad sea muy homogénea (textura lisa) presente números digitales muy similares o iguales, es decir con valores GLCM altos, mientras que los valores GLDV serán bajos. Por el contrario GLCM bajo y GLDV alto indicaría una textura rugosa. Otro parámetro importante es el tamaño de la ventana para el cálculo dado que ventanas muy grandes podrían incluir píxeles que no fueran representativos de las parcelas y ventanas muy pequeñas excluiría la variabilidad de las mismas. En este caso se seleccionó una ventana de 11 x 11, lo que equivale a 44 metros de lado o un área aproximada de 1950 m². Este tamaño de ventana se seleccionó con el fin de conservar el número de píxeles necesario para representar la variabilidad del dosel a nivel de parcela y con base en estudios previos como el de Frohn y Hao (2006) o el de Kayitakire, et al., (2006) donde se demuestra la pérdida de detalle en la medida en que se aumenta el tamaño de la ventana.

Con las parcelas, el mapa de Usos del Suelo actualizado y las imágenes de satélite georreferenciadas en un mismo sistema, fue posible establecer relaciones entre la información de campo (mapas e inventarios) con la textura de las imágenes. Se calculó el mapa de textura GLDV para toda la región en estudio y se determinaron los estadísticos GLDV para cada cobertura y uso del suelo. En el caso de las parcelas se generó una ventana con 20 píxeles de lado cuyo centroide es la parcela con el fin de determinar la zona para el cálculo de estadísticos de textura. La textura puede ser obtenida de forma independiente para cada banda; sin embargo se seleccionó sólo la banda del infrarrojo cercano (0.70-1.32 μm) por presentar mayor sensibilidad para la discriminación de especies (Clark et al, 2005, Asner, et al., 2003), la mayor dispersión en números digitales y la mayor desviación estándar.

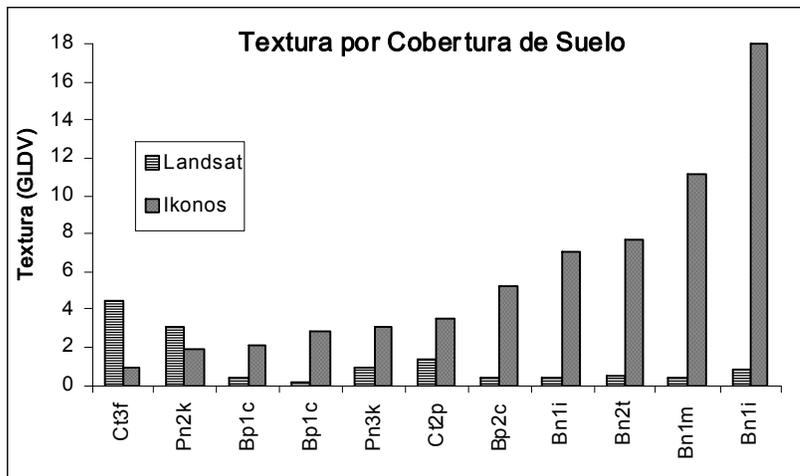
3. RESULTADOS

Inicialmente se hace un análisis entre la estructura de los bosques y su relación con la diversidad sin considerar la textura. En total se calcularon los valores de riqueza e índice de Shannon para 43 parcelas. A partir de estos valores se calcularon los estadísticos básicos con el fin de determinar la biodiversidad en cada una de las tres clases estructurales definidas en el mapa de coberturas y usos del suelo: rastrojo alto RA, bosque secundario BS y bosque natural BN. La Tabla 3 indica que se encuentran pocas diferencias en biodiversidad dentro de los tres tipos de estructura de bosque, es decir, que los bosques tropicales desde estadios sucesionales tempranos presentan altos valores de diversidad. De esta forma se sugiere que ante distintas estructuras del bosque no se puede determinar una tendencia clara en los indicadores de diversidad, por ejemplo, mientras se encuentran Rastrojos con alta diversidad de especies (riqueza 59 e índice de Shannon 3.7), también se encuentran Bosques Naturales como aquellos dominados por *Quercus humoldtii* con baja diversidad (riqueza 19 e índice de Shannon 2.1).

	Riqueza	Shannon	n
BN	19,48 (33)	2.1,3.6 (3.0)	25
BS	19,47 (31)	2.5,3.6 (3.1)	8
RA	16,59 (29)	2.1,3.7 (2.7)	10

Tabla 3. Valores de biodiversidad –riqueza, Shannon– por tipo de bosque. Separados por coma aparecen el mínimo y el máximo y entre paréntesis la media.

Posteriormente se calculó la desviación estándar de la textura GLDV al interior de polígonos para distintas estructuras del bosque, incluyendo otros usos como cultivos y pastos. El tamaño del píxel afecta notablemente el análisis de textura; en la Figura 4 se observa cómo los valores más bajos de la textura de la imagen Ikonos están asociados a las coberturas vegetales altamente modificadas por el hombre como cultivos, pastos y bosques plantados; mientras que los mayores valores de textura están asociados a bosques naturales poco intervenidos. Por otro lado el comportamiento en Landsat es opuesto al de Ikonos y con menor variabilidad, los pastos y cultivos resultan con altos valores de textura probablemente debido a lo fragmentado de este tipo de coberturas y usos del suelo mientras que los bosques aparecen con bajos valores de textura.



Bp Bosque plantado
Bn1 Bosque natural primario
Bn2 Bosque natural secundario
Ct3f Cultivo bajo invernadero

Pn2k Pastos no mejorados arbolados
Pn3k Pastos no mejorados
Ct2p Cultivos transitorios tecnificados en rotación

Figura 4. Variabilidad de la textura para diferentes tipos de coberturas y usos del suelo. Nótese el aumento de valores hacia las clases de Bosque Natural para Ikonos.

Finalmente se relaciona la desviación estándar de la textura GLDV Ikonos con los valores de diversidad obtenidos en cada parcela. La figura 5 muestra la variabilidad en textura entre las 43 parcelas a medida en que aumenta el valor de riqueza, siendo la parcela de la izquierda la de menor valor (16) que aumentan en el eje X hasta el mayor valor (59), los valores de las parcelas 8 y 33 están asociados a parcelas con alto efecto de borde por la existencia de vías y por tanto presentan altos valores de textura. Excluyendo estos valores y ajustando una regresión lineal con la textura como variable independiente, se obtiene un ajuste muy bajo y no significativo. Sin embargo llama la atención que su pendiente sea negativa, lo cual podría indicar una disminución en el número de especies al aumentar la rugosidad, es decir el estado sucesional. A pesar de la alta resolución espacial de Ikonos no existe una tendencia clara que permita inferir una correlación entre la riqueza observada al interior de las parcelas con la textura calculada en la imagen, es por tanto innecesario hacer un análisis similar con píxeles de mayor tamaño como en el caso de Landsat. Los datos de campo sugieren que en estas parcelas la riqueza no presenta un comportamiento claro frente al estado sucesional de los bosques.

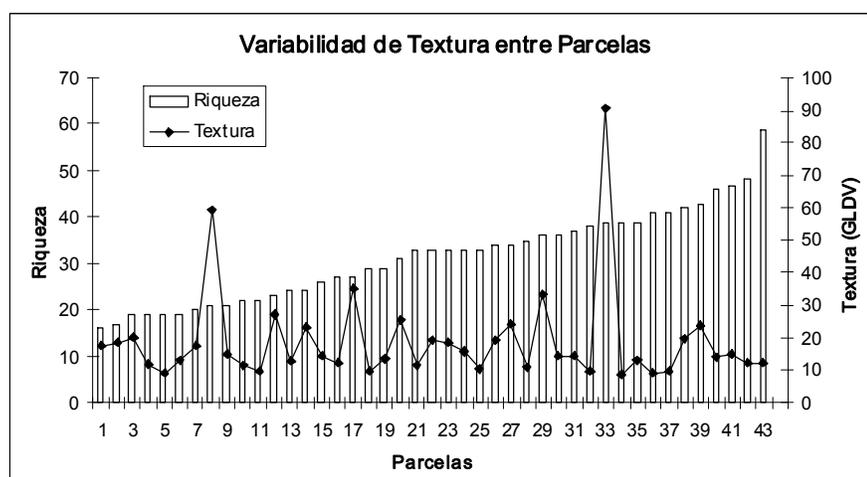


Figura 5. Comportamiento de la textura GLDV Ikonos en parcelas de bosque con medición de riqueza. El gráfico presenta las 43 parcelas organizadas según los valores de Riqueza, siendo la primera a la izquierda la de menor valor y la última de la de mayor valor.

4. CONCLUSIONES

A pesar de la alta resolución de las imágenes Ikonos, no se encontró ninguna relación entre la variabilidad en textura al interior de las parcelas de bosques no intervenidos y su respectivo valor de riqueza o índices de diversidad. Entre los múltiples factores que inciden en estos resultados, se enfatiza la diferencia entre el tamaño de las parcelas (> 500 m²) y la ventana definida para la textura (H»1950 m²); esta última aunque muy pequeña (solo incluye 11 x 11 píxeles) sigue siendo muy superior al área del inventario por parcela en campo. Observaciones de campo y estudios experimentales previos han sugerido que la diversidad encuentra su punto más alto a niveles intermedios de perturbación disminuyendo paulatinamente hasta alcanzar la biomasa potencial (Guo, 2007). Aunque en este trabajo no se logró confirmar una tendencia en este sentido, sí se observaron altos valores de diversidad en estados sucesionales tempranos que pueden llegar incluso a ser más altos que en bosques no intervenidos.

Por otro lado se encontraron diferencias en textura para diferentes estados sucesionales; por lo que se concluye que las diferencias en textura se asocian más a la estructura del bosque que a las especies que lo componen. Se encontraron altos valores de textura en los bosques naturales y bajos valores de textura en los cultivos y pastizales al utilizar las imágenes Ikonos. Es interesante notar que el efecto de textura en la imagen Landsat no es tan marcado y presenta un comportamiento prácticamente opuesto debido al efecto del píxel mixto. La textura no sólo permite

definir el número de veces que se repite cierta combinación entre pares de píxeles, sino que además permite determinar la magnitud de su diferencia. Esto ha resultado de valor para el análisis de texturas rugosas como las coberturas boscosas, donde la diferencia no es perceptible con píxeles de 28.5 metros, pero resulta evidente con píxeles de 4 metros. De esta forma la textura posee un alto potencial de ser incluida en clasificaciones automatizadas de coberturas vegetales, permitiendo incluso separar bosques en distintos estados sucesionales.

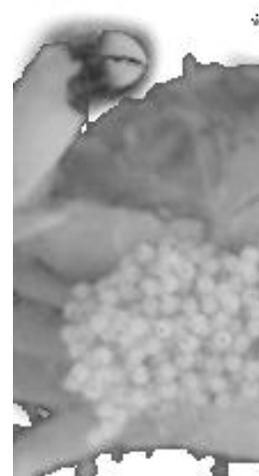
Finalmente es importante resaltar que el nivel de detalle entre las imágenes Ikonos sigue siendo muy inferior al nivel de detalle con el que se trabaja en campo. Adicionalmente el diseño de las parcelas nunca ha considerado que puedan ser relacionadas con datos obtenidos por teledetección. A lo largo de este estudio no se ha encontrado literatura sobre un diseño de parcelas en Colombia acorde al detalle de una imagen de satélite. Se sugiere la continuidad de estudios de textura como una forma automática de caracterizar bosques y demás usos del suelo. En la actualidad se encuentran disponibles imágenes del satélite de recursos terrestres China- Brasil CBERS de 20 m con cobertura de la Amazonía y con alto potencial para apoyar proyectos en conservación, o seguimiento de cambios en el uso del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se realizó dentro del «Modelo de financiación alternativo para el manejo sostenible de los bosques de San Nicolás. II fase. Áreas no Kyoto de restauración». PD 240 / 03 Rev. 1 (f). Con la co-financiación de La Universidad de Medellín, la Corporación Autónoma Regional Rionegro- Nare, CORNARE, y la Organización Internacional de Maderas Tropicales (OIMT).

BIBLIOGRAFIA

- Asner, G.P., 1998, Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of the Environment* 64, pp. 234-253
- Asner, G.P. y Bustamante, M.M.C., et al., 2003, Scale dependence of biophysical structure in deforested areas bordering the Tapajos National Forest, Central Amazon. *Remote Sensing of Environment* 87, pp. 507 - 520.
- Boyd, D.S. y Danson, F.M., 2005. Satellite Remote Sensing of Forest Resources: three decades of research development. *Progress in Physical Geography* 29, pp. 1-26.
- Clark, M.L., Roberts, D.A., et al., 2005. Hypersectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales. *Remote Sensing of Environment* 96, pp. 375-398.
- Cohen, W.B., Spies T.A., et al., 1995. Estimating the age and structure of forest in a multiownership landscape of western Oregon, USA. *International Journal of Remote Sensing* 16, pp. 721-746.
- Cohen, W.B., Maieringer T.K., et al., 2001. Modelling forest cover attributes as continuous variables in a regional context with Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 22, pp. 2279-2310.
- Foody, G.M. y Cutler, M.E.J., 2003. Tree biodiversity in protected and logged Bornean tropical rain forests and its measurement by satellite remote sensing. *Journal of Biogeography* 30, pp. 1053-1066.
- Franklin, S.E., Hall, R.J., et al., 2000. Incorporating texture into classification of forest species composition from airborne multispectral images. *International Journal of Remote Sensing* 21, pp. 61-79
- Frohn, R.C. y Hao Y., 2006. Landscape metric performance in analyzing two decades of deforestation in the Amazon Basin of Rondonia, Brazil. *Remote Sensing of the Environment* 100, pp. 237-251
- Gougeon, F.A., 1995. Comparison of possible multispectral classification schemes for tree crowns individually delineated on high spatial resolution MEIS images. *Canadian Journal of Remote Sensing* 21, pp. 1-9.
- Guo, Q., 2007. The diversity-biomass-productivity relationships in grassland management and restoration. *Basic and Applied Ecology* 8, pp. 199-208
- Haralick, R.M., Shanmugan, K., et al., 1973. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 3, pp. 610-621.



- Kalacska, M., Sanchez-Azofeifa, G.A., et al., 2007. Ecological fingerprinting of ecosystem succession: Estimating secondary dry forest structure and diversity using imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment* 108, pp. 82-89.
- Kayitakire, F., Hamel, C., et al., 2006. Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery. *Remote Sensing of the Environment* 102, pp. 390-401.
- Key, T., Warner T.A., et al., 2001. A comparison of multispectral and Multitemporal information in high spatial resolution imagery for classification of individual trees species in a temperate hardwood forest. *Remote Sensing of Environment* 75, pp. 100-112.
- PCI Geomatics., 2003. Version 9.1. Online help, Ontario, Canada www.pcigeomatics.com
- Perdigao, V. y Annoni, A., 1997. Technical and methodological guide for updating CORINE Land Cover database. Joint Research Centre (JRC) and European Environment Agency (EEA), Italy, EUR 17288 EN.
- Perry, G.L. y Enright, N.J., 2007. Contrasting outcomes of spatially implicit and spatially explicit models of vegetation dynamics in a forest-shrubland mosaic. *Ecological Modelling* (en prensa).
- Qinghong, L., 1995. A model for species diversity monitoring at community level and its applications. *Environ. Monit. Assess* 34, pp. 271-287.
- Thenkabail, P.S., et al, 2003. Detecting floristic structure and pattern across topographic and moisture gradients in a mixed species Central African forest using IKONOS and Landsat-7 ETM+ images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4, pp. 255-270.
- Universidad Nacional de Colombia, 2002. Inventario Forestal, informe técnico final. Modelo de financiación alternativo para el manejo sostenible de los bosques de San Nicolás. Medellín. CORNARE-OIMT. 150 P.
- Van Aart, J.A.N, Wynne, R.H., 2001. Spectral separability among six southern tree species. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67, pp. 1367-1375.
- Wang, L., et al., 2004. Comparison of IKONOS and QuickBird images for mapping mangrove species on the Caribbean coast of Panamá. *Remote Sensing of Environment* 91, pp. 432-440.
- Wulder, M.A., Hall R.J., et al., 2004. High spatial resolution Remotely Sensed Data for Ecosystem Characterization. *BioScience* 54, pp. 511-521