

# TRANSICIONES DE LA COBERTURA Y USO DE LA TIERRA EN EL PERÍODO 1991 – 2005 EN LA CUENCA DEL RÍO COMBEIMA, COLOMBIA.

**Uriel Pérez Gómez**

Grupo de investigación Cuencas Hidrográficas  
LabSIG, Universidad del Tolima  
Barrio Santa Helena, Ibagué, Colombia  
uperez@ut.edu.co

Fecha de Recepción: 8 de Abril de 2008

Fecha de Aceptación: 22 de Abril de 2008

**Joaquín Bosque Sendra**

Departamento de Geografía  
Universidad de Alcalá  
joaquin.bosque@uah.es

## RESUMEN

Usualmente la forma de evaluar los cambios de cobertura y uso de la tierra es utilizando la matriz de transición. Este estudio localiza y analiza los principales cambios de cobertura y uso de la tierra sucedidos en un lapso de 15 años en una cuenca hidrográfica de 27.186 ha, ubicada en los Andes Colombianos. A partir del análisis detallado de la matriz de cambio se conoce sobre las variaciones globales entre categorías, se determinan la pérdida, ganancia, persistencia, cambios totales, cambios netos, intercambios, la vulnerabilidad de las categorías a las transiciones y las transiciones sistemáticas.

## Palabras Clave:

Matriz de transición, análisis espacial, cambios de uso de la tierra, cuenca hidrográfica, región andina, Combeima, Colombia.

## ABSTRACT

Usually, the way to evaluate the land cover and land use changes is by using the transition or change matrix. This research locates and analyzes the main changes in a 27.186 ha watershed during 15 years, situated in Colombia Andes. Global and categories changes are known by a detailed analyze, obtaining: loss, gross gain, persistence, total changes, net change, swap, the

vulnerability of categories to change and systematic transitions.

## Key Words:

Transition matrix, spatial analysis, land use change, watershed management, Andes region, Combeima, Colombia.

---

## INTRODUCCIÓN

La evaluación de los patrones de cambio de la cobertura y uso de la tierra (CCUT) y su distribución espacial son aspectos considerados en el diagnóstico de cuencas hidrográficas, pero su análisis, en el contexto de un proceso en términos temporales y temáticos, usualmente no lo es, a pesar de su importancia. Lo anterior se corrobora al explorar las “cajas de herramientas” (<http://www.ideam.gov.co/cuencas.asp?id=1>) proporcionadas como guía en la orientación del proceso de ordenación de cuencas hidrográficas, en las áreas de jurisdicción de las autoridades ambientales regionales Colombianas (IDEAM, 2004). Con frecuencia este tipo de análisis no se realiza debido a la inexistencia de una base de datos e información histórica consistente y detallada como también a restricciones presupuestales (Brandt y Townsend, 2006), y en ocasiones por el desconocimiento de las técnicas para su desarrollo.

La disponibilidad de software especializado de acceso abierto y dominio público, entre otros, ofrecen opciones para realizar análisis de CCUT. Tradicionalmente la evaluación de los CCUT considera el uso de la matriz de transición producto de la comparación de dos mapas,  $t_1$  y  $t_2$ . Con antelación, su análisis se

ha realizado de una manera muy general, logrando conclusiones apoyadas en: a) los cambios netos ocurridos en las categorías de CUT entre  $t_1$  y  $t_2$ , b) las tasas de cambios obtenidas de dividir el cambio neto entre el número de años del periodo  $t_1$  y  $t_2$ , y c) las grandes transiciones entre categorías en términos de porcentajes del paisaje. Recientemente, Pontius *et al.* (2004) proponen profundizar en el análisis de la matriz con el fin de conocer más sobre los cambios, con las obvias bondades en facilitar la relación entre patrones y procesos.

El propósito de esta investigación es dar respuestas a las siguientes cuestiones relacionadas con los CCUT ocurridos en la cuenca del río Combeima entre 1991 y 2005: ¿cuáles son los cambios netos del paisaje para cada categoría?, ¿cuáles son las ganancias, pérdidas, e intercambio de cada categoría?, ¿cuáles son las categorías que presentan transiciones sistemáticas?. Con el fin de dar respuestas a estos interrogantes se aplican las metodologías de análisis detallado de la matriz de transición (Pontius *et al.*, 2004) y el índice de vulnerabilidad a la transición (Braimoh, 2006).

## FUENTES DE DATOS Y MÉTODOS DE ESTUDIO El área de estudio

La cuenca del río Combeima se encuentra ubicada entre los 04°19'30'' y 04°39'57'' latitud norte y los 75°10'11'' y 75°23'23'' longitud oeste sobre el flanco oriental de la cordillera central de los Andes en Colombia, con una extensión aproximada de 27.186 ha. Presenta variaciones altitudinales que van desde los 700 ms.n.m hasta los 5.200 ms.n.m., una precipitación media anual de 1800 mm de comportamiento bimodal y temperaturas de media anual de 14 °C, aproximadamente.

Sobre los 5.000 ms.n.m. se resaltan las nieves perpetuas y su localización sobre el volcán nevado del Tolima, que debe su formación a la última glaciación ocurrida en el territorio colombiano hace 70.000 años aproximadamente (IDEAM, 1998). Nieves perpetuas importantes por su implicación dentro del rendimiento hídrico de la cuenca y como un sensor de los impactos del cambio climático en estas zonas de alta montaña (IDEAM, 1998; GLOCHAMORE Consortium, 2006).

La parte superior de la cuenca, por encima de los 2.200 ms.n.m., se encuentra dentro del Parque Nacional Natural de los Nevados - PNNN (3.457 ha), junto a su área de amortiguación (3.667 ha) (Ministerio del Medio Ambiente, 2002). Al interior de sus divisorias de aguas se hallan seis caseríos y, parcialmente, la ciudad de Ibagué con una población de 465.859 habitantes en el 2005 (DANE, 2007). La cuenca es un ecosistema estratégico por proveer el 80 % del agua para el acueducto de la ciudad de Ibagué (Vanegas, 2002).

## Datos

En la Fig. 1, se presentan los mapas de CUT para 1991 y 2005 con sus nueve categorías: Tierras edificadas o construidas (Ze), Agrícolas (C), Pastizales (P), Rastrojo (R), Bosque (B), Agua (A), Eriales (E), Vegetación de páramo (Vp) y Nieves perpetúas (Np). La leyenda se ajusta al nivel I del sistema de clasificación de Anderson (1976). Cada mapa contiene 302.072 celdas, en donde cada celda tiene una resolución de 30 \* 30 m, que satisface la representación temática desde una escala 1:25.000 en una base de datos digital en formato de celdas (Valenzuela y Baumgardner, 1990). El mapa de 1991 fue obtenido a partir de fotointerpretación, reconocimiento de campo, transferencia, dibujo y digitalización (CEDAR y CORTOLIMA, 1991). El de 2005 se obtuvo a partir de interpretación visual con digitalización en pantalla sobre una imagen SPOT 5 y reconocimiento de campo (Pérez y Ortiz, 2005). Ambos mapas se realizaron, en su momento, bajo objetivos similares, sistemas de clasificación compatibles y con criterios homogéneos, ya que fueron concebidos para apoyar procesos de ordenación de la misma cuenca hidrográfica. Su confección difiere en términos de los medios tecnológicos y de las técnicas empleadas para generar los límites y las etiquetas de cada uno de los polígonos.

El software utilizado para estructurar las bases de datos geográficas fue *ILWIS 3.4 Open*. (<http://52north.org/>).

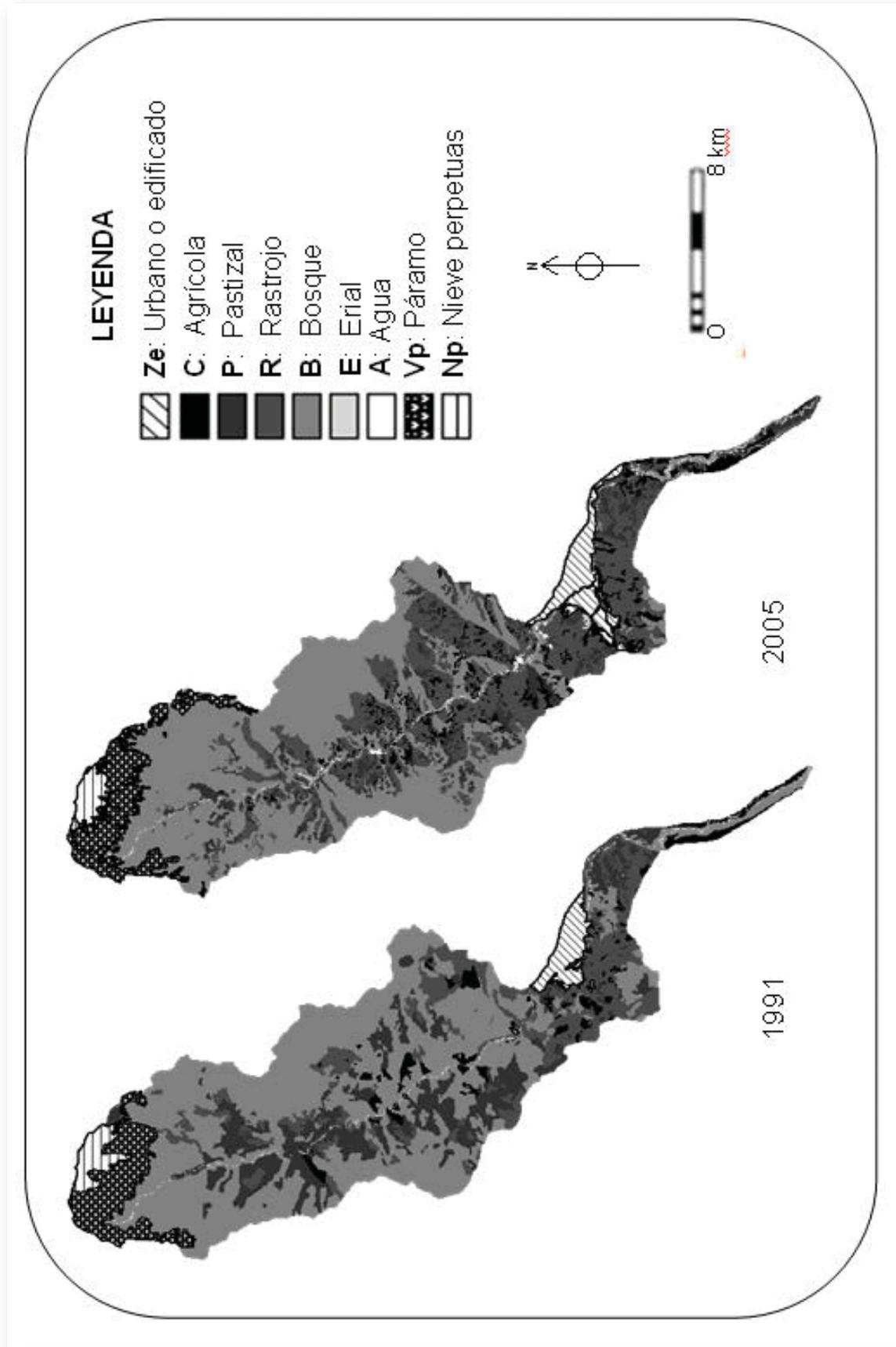


Figura 1.- Ocupación del paisaje para 1991 y 2005

	Categorías para 2005									Total	
	Ze	C	P	R	B	A	E	Vp	Np	1991	Pérdida
<b>Categorías 1991</b>											
<b>Ze</b>	<b>2,33</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>2,38</b>	<b>0,05</b>
	<i>2,33</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>2,38</i>	<i>0,05</i>
	<i>2,33</i>	<i>0,11</i>	<i>0,16</i>	<i>0,55</i>	<i>0,65</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,05</i>	<i>0,01</i>	<i>3,85</i>	<i>1,52</i>
<b>C</b>	<b>0,13</b>	<b>0,86</b>	<b>0,45</b>	<b>1,67</b>	<b>1,09</b>	<b>0,00</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>4,22</b>	<b>3,36</b>
	<i>0,15</i>	<i>0,86</i>	<i>0,33</i>	<i>0,93</i>	<i>1,66</i>	<i>0,02</i>	<i>0,00</i>	<i>0,22</i>	<i>0,05</i>	<i>4,22</i>	<i>3,36</i>
	<i>0,08</i>	<i>0,86</i>	<i>0,29</i>	<i>0,98</i>	<i>1,15</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,09</i>	<i>0,01</i>	<i>3,46</i>	<i>2,60</i>
<b>P</b>	<b>0,40</b>	<b>1,20</b>	<b>3,54</b>	<b>5,86</b>	<b>5,42</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>16,43</b>	<b>12,89</b>
	<i>0,61</i>	<i>0,74</i>	<i>3,54</i>	<i>3,74</i>	<i>6,64</i>	<i>0,06</i>	<i>0,02</i>	<i>0,87</i>	<i>0,21</i>	<i>16,43</i>	<i>12,89</i>
	<i>0,33</i>	<i>0,75</i>	<i>3,54</i>	<i>3,80</i>	<i>4,46</i>	<i>0,00</i>	<i>0,02</i>	<i>0,33</i>	<i>0,05</i>	<i>13,28</i>	<i>9,74</i>
<b>R</b>	<b>1,26</b>	<b>0,78</b>	<b>1,90</b>	<b>6,85</b>	<b>4,76</b>	<b>0,00</b>	<b>0,08</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>15,63</b>	<b>8,78</b>
	<i>0,51</i>	<i>0,62</i>	<i>1,10</i>	<i>6,85</i>	<i>5,58</i>	<i>0,05</i>	<i>0,01</i>	<i>0,73</i>	<i>0,18</i>	<i>15,63</i>	<i>8,78</i>
	<i>0,31</i>	<i>0,71</i>	<i>1,06</i>	<i>6,85</i>	<i>4,25</i>	<i>0,00</i>	<i>0,02</i>	<i>0,32</i>	<i>0,05</i>	<i>13,56</i>	<i>6,71</i>
<b>B</b>	<b>0,17</b>	<b>2,37</b>	<b>3,29</b>	<b>11,93</b>	<b>34,11</b>	<b>0,00</b>	<b>0,02</b>	<b>1,42</b>	<b>0,00</b>	<b>53,30</b>	<b>19,20</b>
	<i>1,55</i>	<i>1,88</i>	<i>3,31</i>	<i>9,50</i>	<i>34,11</i>	<i>0,15</i>	<i>0,04</i>	<i>2,21</i>	<i>0,55</i>	<i>53,31</i>	<i>19,20</i>
	<i>1,07</i>	<i>2,42</i>	<i>3,60</i>	<i>12,31</i>	<i>34,11</i>	<i>0,00</i>	<i>0,06</i>	<i>1,08</i>	<i>0,16</i>	<i>54,82</i>	<i>20,71</i>
<b>A</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,43</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,43</b>	<b>0,00</b>
	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,43</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,43</i>	<i>0,00</i>
	<i>0,01</i>	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,10</i>	<i>0,12</i>	<i>0,43</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>0,71</i>	<i>0,28</i>
<b>E</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
<b>Vp</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,41</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>4,20</b>	<b>0,29</b>	<b>5,90</b>	<b>1,70</b>
	<i>0,08</i>	<i>0,09</i>	<i>0,17</i>	<i>0,48</i>	<i>0,85</i>	<i>0,01</i>	<i>0,00</i>	<i>4,20</i>	<i>0,03</i>	<i>5,90</i>	<i>1,70</i>
	<i>0,12</i>	<i>0,27</i>	<i>0,40</i>	<i>1,36</i>	<i>1,60</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>4,20</i>	<i>0,02</i>	<i>7,98</i>	<i>3,78</i>
<b>Np</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,48</b>	<b>1,22</b>	<b>1,70</b>	<b>0,48</b>
	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i>0,05</i>	<i>0,13</i>	<i>0,23</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,03</i>	<i>1,22</i>	<i>1,70</i>	<i>0,48</i>
	<i>0,03</i>	<i>0,08</i>	<i>0,12</i>	<i>0,39</i>	<i>0,46</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,03</i>	<i>1,22</i>	<i>2,34</i>	<i>1,12</i>
<b>Total 2005</b>	<b>4,29</b>	<b>5,22</b>	<b>9,19</b>	<b>26,34</b>	<b>46,79</b>	<b>0,43</b>	<b>0,11</b>	<b>6,12</b>	<b>1,51</b>	<b>100,00</b>	<b>46,46</b>
	<i>5,25</i>	<i>4,23</i>	<i>8,49</i>	<i>21,64</i>	<i>49,09</i>	<i>0,72</i>	<i>0,08</i>	<i>8,26</i>	<i>2,24</i>	<i>100,00</i>	<i>46,46</i>
	<i>4,29</i>	<i>5,22</i>	<i>9,18</i>	<i>26,34</i>	<i>46,80</i>	<i>0,43</i>	<i>0,11</i>	<i>6,11</i>	<i>1,51</i>	<i>100,00</i>	<i>46,46</i>
<b>Ganancia</b>	<b>1,96</b>	<b>4,36</b>	<b>5,64</b>	<b>19,49</b>	<b>12,69</b>	<b>0,00</b>	<b>0,11</b>	<b>1,91</b>	<b>0,29</b>	<b>46,46</b>	
	<i>2,92</i>	<i>3,37</i>	<i>4,95</i>	<i>14,79</i>	<i>14,98</i>	<i>0,29</i>	<i>0,08</i>	<i>4,06</i>	<i>1,02</i>	<i>46,46</i>	
	<i>1,96</i>	<i>4,36</i>	<i>5,64</i>	<i>19,49</i>	<i>12,69</i>	<i>0,00</i>	<i>0,11</i>	<i>1,91</i>	<i>0,29</i>	<i>46,46</i>	

**Categorías:** **Ze:** Tierras urbanas o edificadas, **C:** Tierras agrícolas, **P:** Tierras de pastizales, **R:** Tierras de rastrojos, **B:** Tierras de bosques, **A:** Agua, **E:** Tierras eriales, **Vp:** Tierras de páramo y **Np:** Nieve perpetua.

Tabla 1.- Matriz de cambio con los valores de transición observados (tipo de letra negrita), pérdidas esperadas (itálicas), y ganancias esperadas (normal) entre categorías. Las unidades son dadas en porcentaje del área total del paisaje.

## Metodología

### La matriz de transición

Para realizar el análisis espacial y temporal de los CCUT se consideraron las categorías de la cobertura y uso de la tierra de 1991 y 2005 y se utilizó la matriz de transición de acuerdo a la propuesta de Pontius *et al.* (2004). La matriz de transición, o matriz de tabulación cruzada, es utilizada por diversos autores dentro del análisis cuantitativo de los CCUT (Alo y Pontius, 2004; Braimoh, 2006; Alo y Pontius, 2007; Versace *et al.*, 2008), y es muy fácil de calcular e interpretar. La matriz de transición asume una estructura de doble entrada (Tabla 1, datos en negrita), en donde las filas despliegan los valores de las categorías de 1991 y las columnas las de 2005. Allí se identificaron las transiciones con la notación  $P_{ij}$ , que significa la proporción del paisaje que experimenta una transición desde la categoría  $i$  a la categoría  $j$ , la persistencia, son los valores localizados sobre la diagonal principal de la matriz, se corresponde con la notación  $P_{ij}$  que significa la proporción del paisaje que muestra permanencia en la categoría  $j$ ; las pérdidas, contiene los valores de la proporción del paisaje que experimenta pérdidas netas de la categoría  $i$  entre 1991 y 2005, su notación es  $L_{ij} = P_{j+} - P_{ij}$ ; y las ganancias, incluye los valores de la proporción del paisaje que experimenta ganancias netas en la categoría  $j$  entre 1991 y 2005, su notación para el cálculo fue  $G_{ij} = P_{+j} - P_{ij}$ .

Adicionalmente se obtiene el cambio total, entendido como la determinación, de manera cuantitativa y espacialmente definida, de las variaciones de la ocupación del paisaje. Para su cálculo se utilizó la siguiente no-

tación:  $CT = G_{ij} + L_{ij}$ . El Cambio neto es la diferencia entre los valores totales de cada categoría de ocupación del paisaje determinada para 1991 y 2005. Una falta de valor en el cambio neto no necesariamente indica que no existan cambios en el paisaje, puede darse un intercambio. Un cambio neto en la cantidad de una categoría indica un cambio definitivo sobre el paisaje. La notación para su cálculo fue la siguiente:  $D_j = | P_{+j} - P_{j+} |$

El concepto de Intercambio involucra simultáneamente ganancia y pérdida de una categoría de ocupación sobre el paisaje. Se da cuando la localización de una categoría de ocupación cambia entre 1991 y 2005, mientras su cantidad permanece constante. Un ejemplo es la deforestación en un sitio, mientras en otro ocurre reforestación. La ecuación para su cómputo fue la siguiente:  $S_j = 2 \times \text{MIN} (P_{j+} - P_{ij}, P_{+j} - P_{ij})$ .

### Persistencia

El índice de persistencia de Braimoh (2006) fue usado para evaluar la persistencia de las diferentes categorías de CUT en relación a la ganancia, pérdidas y cambios netos. Este índice permite evaluar la vulnerabilidad de cada categoría de la CUT a la transición, para su cálculo se utilizaron las siguientes ecuaciones: la relación ganancia – persistencia:

$$g_p = \frac{\text{ganancia}}{\text{persistencia}}$$

la relación pérdida – persistencia:

$$l_p = \frac{\text{pérdida}}{\text{persistencia}}$$

y cambio neto - persistencia :  $n_p = g_p - l_p$   
 De acuerdo al mismo autor cuando  $g_p$  tiene valores que exceden 1, indica que la categoría experimenta una mayor tendencia a la ganancia que a la persistencia. La misma situación con los valores de  $l_p$ , indica una mayor tendencia a la transición que a la persistencia.

**Las transiciones sistemáticas y aleatorias**

Con el fin de precisar las señales dominantes de los CCUT se realiza el análisis de la transición sistemática entre categorías, el cual se calcula a partir de los valores de la matriz de transición (Tabla 2, tipo de letra negrita) y en función de las ganancias y las pérdidas (Pontius et al., 2004). Este proceso es realizado en tres fases: Primera fase. Se determina la transición sistemática en función de las ganancias para lo que se utilizó la siguiente ecuación, siendo  $i \neq j$ :

$$G_{ij} = \frac{(P_{+j} - P_{jj}) * P_{i+}}{1 - P_{j+}}$$

$G_{ij}$  es la transición esperada desde la categoría  $i$  a la categoría  $j$  debido a un proceso de ganancias al azar,  $(P_{+j} - P_{jj})$  es la ganancia neta total de la categoría  $j$  entre 1991 y 2005,  $P_{i+}$  es el tamaño de la categoría  $i$  en 1991, y  $P_{j+}$  es la suma de los tamaños de todas las categorías excepto  $j$  en 1991. Esta ecuación distribuye las ganancias de la categoría  $j$  a todas las demás categorías de acuerdo a su relativa proporción en 1991, asumiendo que la ganancia neta total de cada categoría es fija. Los valores calculados por esta ecuación son localizados en la Tabla 1, con el tipo de letra normal.

Segunda fase. Se calcula la matriz de transición sistemática en función de las pérdidas, por lo que se procede de manera similar al cálculo realizado para la matriz de transición en función de las ganancias. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$L_{ij} = \frac{(P_{i+} - P_{ii}) * P_{+j}}{1 - P_{+i}}$$

CATEGORIAS	1991	2005	Ganancias	Pérdidas	Cambio Total	Intercambio	Valor absoluto del cambio neto
<b>Ze</b>	2,38	4,29	1,96	0,05	2,01	0,10	1,91
<b>C</b>	4,22	5,22	4,36	3,36	7,72	6,72	1,00
<b>P</b>	16,43	9,19	5,64	12,89	18,53	11,29	7,24
<b>R</b>	15,63	26,34	19,49	8,78	28,27	17,57	10,71
<b>B</b>	53,30	46,79	12,69	19,20	31,88	25,37	6,51
<b>A</b>	0,43	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>E</b>	0,00	0,11	0,11	0,00	0,11	0,00	0,11
<b>Vp</b>	5,90	6,12	1,91	1,70	3,61	3,40	0,21
<b>Np</b>	1,70	1,51	0,29	0,48	0,78	0,59	0,19
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>46,46</b>	<b>46,46</b>	<b>46,46</b>	<b>32,51</b>	<b>13,95</b>

Tabla 2.- Valores de cambios para las categorías de ocupación de la tierra expresados en porcentaje del área total del paisaje.

$L_{ij}$  es la transición esperada entre categorías  $i$  a la categoría  $j$  debido a un proceso al azar de las pérdidas,  $P_{i+} - P_{ij}$  es la pérdida neta total de la categoría  $i$  entre 1991 y 2005,  $P_{j+}$  es el tamaño de la categoría  $j$  en el 2005, y  $1 - P_{j+}$  es la suma de los tamaños de todas las categorías excepto  $i$  en el 2005. Esta ecuación distribuye las pérdidas de la categoría  $i$  a todas las demás categorías de acuerdo a su relativa proporción en el 2005, asumiendo que la pérdida neta total de cada categoría es fija. Los valores calculados por esta ecuación son localizados en la Tabla 1, con el tipo de letra itálica.

Tercera fase. Una vez se tienen los valores de las ganancias y las pérdidas calculadas, estos tienen que relacionarse con los valores de las transiciones observadas con el fin de determinar la existencia de transiciones persistentes (sistemáticas o significativas) o aleatorias. Su significado e interpretación en este estudio se realiza en términos estadísticos y no en términos de los factores causales de los cambios (Braumoh, 2006). Una transición es sistemática si la transición observada se desvía de la transición calculada. Por lo que si una categoría no tiene una particular tendencia a ganar desde o perder algo hacia otras categorías, entonces la transición observada empalmaría con los patrones calculados. Mientras que las transiciones aleatorias ocurren cuando una categoría gana desde o pierde área hacia otras categorías en proporción a su disponibilidad en  $t_1$ .

## RESULTADOS

### La matriz de transición y los cambios globales

La matriz de transición (Tabla 1, en tipo de letra negrita) fue calculada para el área de estudio por superposición de los mapas de cobertura y uso de la tierra de dos fechas 1991 y 2005. Sus datos muestran el porcentaje del total del paisaje dentro de cada combinación de categorías.

Inicialmente al analizar, en la Tabla 1 (tipo de letra negrita), los valores de la columna Total 1991 y la fila Total 2005 permiten determinar que Bosque, Rastrojo y Pastizal son las tres coberturas predominantes en el paisaje; la Vegetación de páramo, Agrícola y Edificada constituyen las siguientes categorías de importancia, en su estricto orden. Siendo Nieves perpetuas, Erosión y Agua las de más baja proporción. El anterior comportamiento es común tanto en 1991 como en 2005. Para el 2005 las coberturas predominantes Bosque, Rastrojo y Pastizal cubrían el 46,79 % (12.706 ha), 26,34 % (3.347 ha) y 9,19 % (308 ha) del total del paisaje, respectivamente. Se evidencia una tasa de deforestación (Puyravaud, 2003) de -0,93, en porcentaje del total del paisaje.

La sumatoria, de los valores localizados sobre la diagonal principal de la Tabla 1 (tipo de letra negrita), determina que el 53,54 % (14.555 ha) de la superficie total del paisaje presenta estabilidad de las categorías de ocupación, estas zonas de estabilidad se localizan principalmente sobre la parte alta de la cuenca (Fig. 2). Siendo la categoría Bosque, con un 34,11 % (9.273 ha), la que mayor

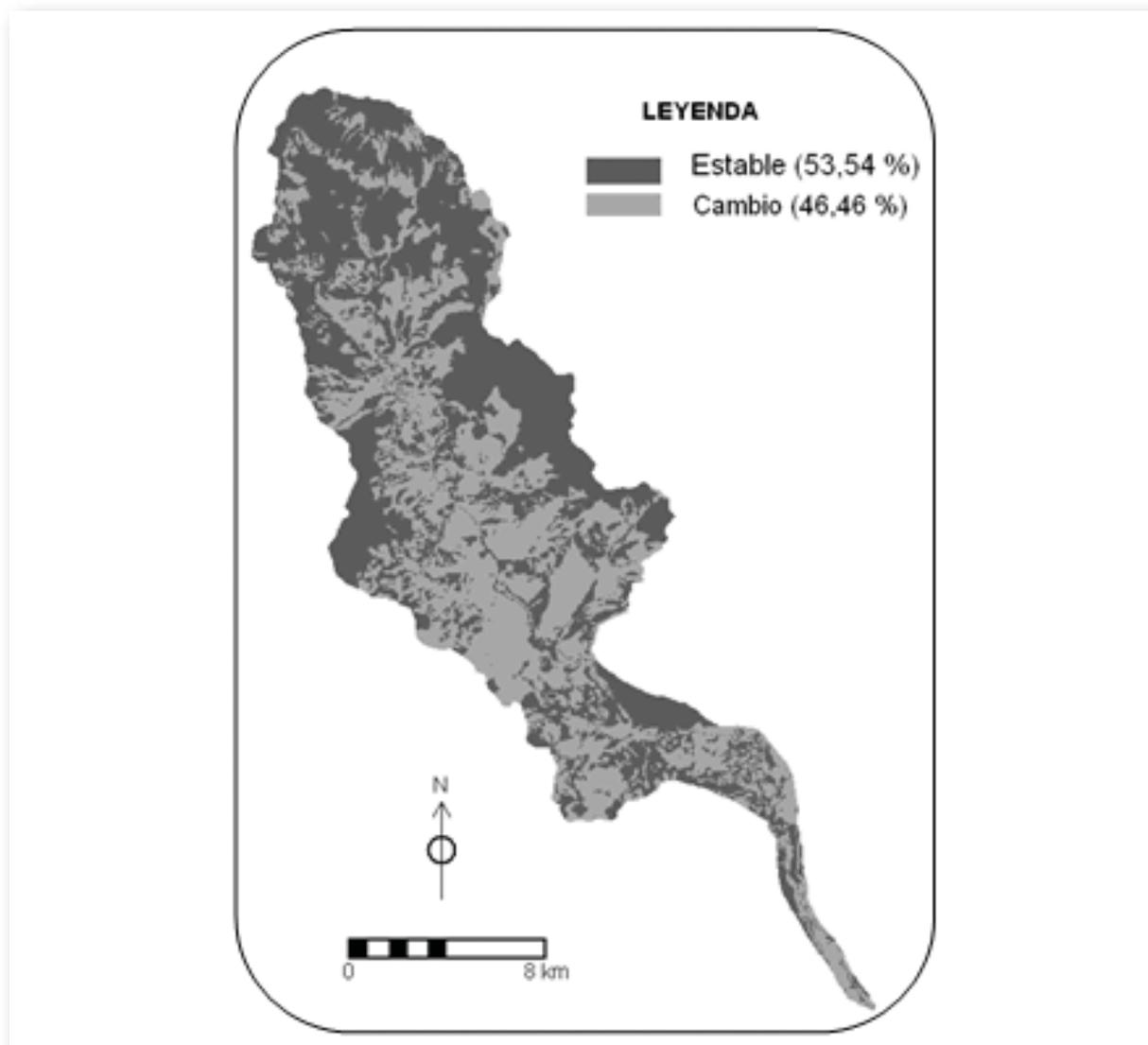


Figura 2.- Comportamiento de la ocupación del paisaje entre 1991 y 2005

persistencia presentó. El hecho de ser el bosque la cobertura que más persistencia presenta y que su uso está básicamente destinado a conservación y protección, es de vital importancia para que la cuenca cumpla con sus funciones ecosistémicas básicas, como la de regulación de la calidad y cantidad del recurso hídrico, entre otras (Calder et al., 2007).

### **Cambios detallados por categorías**

La Tabla 2 sintetiza gran parte de la información proporcionada por la matriz de transición (Tabla 1, tipo de letra negrita) en aspectos como ganancias, pérdidas, cambio total, intercambio y cambio neto expresados en proporción del paisaje total.

Inicialmente, al analizar los valores de la columna pérdidas se observa que las categorías

Bosque y Pastizal experimentan los mayores valores de pérdidas, con el 19,20 % (5.219 ha) y 12,89 % (3.504 ha) del paisaje, respectivamente; seguidos por Rastrojo y Agrícola con 8,78 % (2.386 ha) y 3,36 % (913 ha) del paisaje, respectivamente. El resto de categorías o no presentan pérdidas o sus valores son muy bajos. Para entender esta dinámica, en una primera aproximación, se puede recurrir a la matriz de transición (Tabla 1, tipo de letra negra) donde la proporción de pérdida de Bosque es debida al avance, principalmente, del Rastrojo (11,93 %) y en menor proporción a Pastizal (3,29 %) y Agrícola (2,37 %); para el caso de Pastizal sus pérdidas se dan por el establecimiento, en magnitudes similares, de Rastrojo (5,86 %) y Bosques (5,42 %), principalmente.

En relación a las ganancias, Rastrojo y Bosque son los que presentan las máximas ganancias con 19,49 % (5.299 ha) y 12,69 % (3.450 ha) del paisaje, respectivamente; seguidos de Pastizal, Agrícola y Zonas edificadas con 5,64 % (1.533 ha), 4,36 % (1.185 ha) y 1,96 % (533 ha) del paisaje, respectivamente. El resto de categorías no presentan ganancias o sus valores son insignificantes. Para el caso de Vegetación de páramo presenta valores bajos y similares tanto de pérdida como de ganancia, 1,70 % (462 ha) y 1,91 % (519 ha) del total del paisaje, respectivamente. La ganancia de área en Rastrojo proviene de Bosque (11,93 %) y en menores proporciones de Pastizal (5,86 %) y Agrícola (1,09 %); para el caso de Bosque los aportes provienen de Pastizal (5,42 %) y Rastrojo (4,76 %), principalmente.

En la Fig. 3 se muestra el comportamiento de las pérdidas y las ganancias de Agrícola, Pas-

tizal, Rastrojo y Bosque, ya que son las categorías que presentan mayor proporción de transiciones para 1991 y 2005.

Desde 1991 hasta el 2005, el 46,46% (12.630 ha) del total del paisaje sufrió cambios totales debido principalmente a intercambios sucedidos en un 32,51 % (8.838 ha) de la superficie total. Los grandes aportes en estos cambios totales los proporciona Bosque, Rastrojo y Pastizal con el 31,88 (8.667 ha), 28,27 (7.686 ha) y 18,53 % (5.038 ha) de la superficie total, respectivamente. Su influencia sobre el total de los cambios se acentúa debido a que también poseen las mayores proporciones del paisaje en las dos fechas de estudio.

Entre 1991 y 2005, Bosque y Pastizal presentaron cambios netos en una proporción de 7,24 % (1.968 ha) y 6,51 % (1.770 ha) del total del paisaje, respectivamente; los cuales fueron soportados principalmente por intercambios en proporciones del 25,37 % (6.897 ha) y 11,29 % (3.069 ha) de la superficie total. Para el caso de Bosque se da básicamente por los programas de reforestación y de conservación realizados por CORTOLIMA y el IBAL E.S.P. Oficial, especialmente sobre la parte alta de la cuenca.

## Vulnerabilidad de las clases a la transición

En la Tabla 3, los valores de  $p_p$  y  $g_p$  para las categorías Agrícola, Pastizal y Rastrojo presentan valores mayores que 1, lo que significa que estas categorías tienen una mayor tendencia a perder y a ganar que a persistir. El resto de categorías tienden a estar más estables. Los valores de cero para las categorías

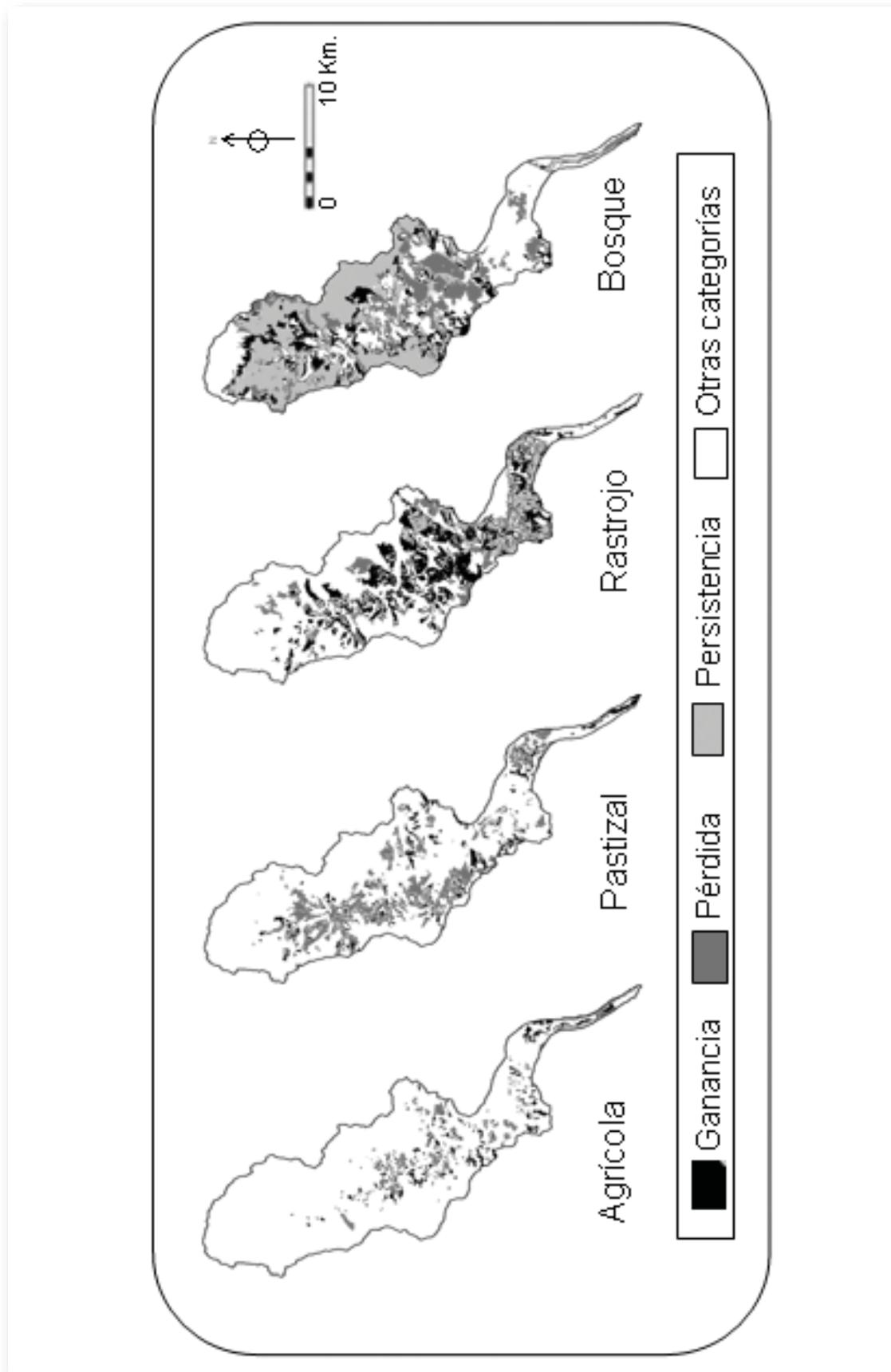


Figura 3.- Cambios en el paisaje bajo las categorías Agrícola, Pastizal, Rastrojo y Bosque entre 1991 y 2005

CATEGORIAS	$g_p$	$l_p$	$n_p$
<b>Ze</b>	0,84	0,02	0,82
<b>C</b>	<b>5,06</b>	<b>3,90</b>	1,16
<b>P</b>	<b>1,59</b>	<b>3,64</b>	<b>-2,04</b>
<b>R</b>	<b>2,85</b>	<b>1,28</b>	1,56
<b>B</b>	0,37	0,56	<b>-0,19</b>
<b>A</b>	0,00	0,00	0,00
<b>E</b>	0,00	0,00	0,00
<b>Vp</b>	0,46	0,40	0,05
<b>Np</b>	0,24	0,40	<b>-0,16</b>

Tabla 3.- Valores de las relaciones ganancia - persistencia, pérdida - persistencia y cambio - persistencia.

Agua y Erosión se explican por su ausencia durante 1991 y por la estabilidad en todo el periodo de estudio, respectivamente.

Para el caso de  $n_p$ , los Pastizales presentan un valor alto y negativo (-2,04 %), seguido muy lejanamente de Bosque (-0,19 %) y Nieves perpetuas (-0,16 %). Las pérdidas netas del área de Pastizales es más del doble de su persistencia, mientras que para Rastrojos y Agrícola las ganancias son ligeramente mayores a sus persistencias.

## Transiciones sistemáticas y aleatorias

Con el fin de corroborar que las transiciones ocurridas en el paisaje, por las categorías Bosque, Rastrojo y Pastizal, son los procesos de transición más significativos, se recurre a la determinación de las transiciones sistemáticas entre categorías. En la Tabla 1 se presenta una matriz con los valores de transición observados en tipo de letra negra, las pérdidas esperadas en itálicas, y las ganancias esperadas en normal. Una interpretación de

los valores reportados en la tabla 1 es presentada en las Tablas 4 y 5 que muestran los valores de las transiciones sistemáticas y aleatorias significativas calculadas bajo situaciones al azar y en términos de pérdidas y ganancias, respectivamente.

Al analizar la Tabla 4, en las dos primeras filas, se observa un patrón sistemático de la categoría Edificada, en el cual Edificada reemplaza a Rastrojo pero no a Bosque. Específicamente cuando Edificada gana, reemplaza a Rastrojo a una tasa aproximada de tres veces la tasa que sería esperada si Edificada ganara al azar. Además, si Edificada fuera a ganar al azar, entonces uno pudiese esperar que el 0,9 % del paisaje experimente conversión desde la categoría Bosque a Edificada. En la tercera y cuarta fila, con valores muy bajos, se puede identificar un comportamiento persistente de Agrícola, cuando avanza no reemplaza ni a Páramo ni a Edificada. En la quinta y sexta fila, Pastizal indica un comportamiento sistemático, cuando gana reemplaza a Rastrojo y no a Páramo. Mientras que en la séptima y octava

	Transición	Observados menos los esperados	Diferencia dividida por esperado	Interpretación de la transición sistemática
1	Rastrojo 1991 y Edificada en 2005	0,95	3,01	Cuando Edificada gana, reemplaza a Rastrojo
2	Bosque en 1991 y Edificada en 2005	-0,90	-0,84	Cuando Edificada gana, no reemplaza a Bosque
3	Páramo en 1991 y Agrícola en 2005	-1,00	-0,27	Cuando Agrícola gana, no reemplaza a Páramo
4	Edificada en 1991 y Agrícola en 2005	-0,11	-1,00	Cuando Agrícola gana, no reemplaza a Edificada
5	Rastrojo 1991 y Pastizal en 2005	0,84	0,80	Cuando Pastizal gana, reemplaza a Rastrojo
6	Páramo en 1991 y Pastizal en 2005	-0,40	-1,00	Cuando Pastizal gana, no reemplaza a Páramo
7	Pastizal en 1991 y Rastrojo en 2005	2,06	0,54	Cuando Rastrojo gana, reemplaza a Pastizal
8	Páramo en 1991 y Rastrojo en 2005	-1,36	-1,00	Cuando Rastrojo gana, no reemplaza a Páramo
9	Cultivo en 1991 y Erial en 2005	0,01	2,24	Cuando Erial gana, reemplaza a Agrícola
10	Rastrojo en 1991 y Erial en 2005	0,06	3,26	Cuando Erial gana, reemplaza a Rastrojo
11	Pastizal en 1991 y Páramo en 2005	-0,33	-1,00	Cuando Páramo gana, no reemplaza Pastizal
12	Nieves perpetuas en 1991 y Páramo en 2005	0,45	12,98	Cuando Páramo gana, reemplaza a Nieves perpetuas
13	Páramo en 1991 y Nieves perpetuas en 2005	0,28	15,65	Cuando Nieves perpetuas gana, reemplaza a Páramo
14	Pastizal en 1991 y no Pastizal en 2005	3,15	0,32	Cuando no Pastizal gana, reemplaza a Pastizal
15	Páramo en 1991 y no Páramo en 2005	-2,08	-0,55	Cuando no Páramo gana, no reemplaza Páramo

Tabla 4.- Transiciones sistemáticas entre categorías calculadas con base en las ganancias.

Observados menos los esperados: de la tabla 2 se resta al valor de transición observado (tipo de letra negrita) el de ganancia esperada (normal).

	Transición	Observados menos los esperados	Diferencia dividida por esperado	Interpretación de la transición sistemática
1	Pastizal en 1991 y Rastrojo en 2005	2,12	0,57	Cuando Pastizal pierde, Rastrojo lo reemplaza
2	Pastizal en 1991 y Bosque en 2005	-1,22	-0,18	Cuando Pastizal pierde, no lo reemplaza Bosque
3	Rastrojo en 1991 y Edificada en 2005	0,75	1,46	Cuando Rastrojo pierde, Edificada lo reemplaza
4	Rastrojo en 1991 y Erial en 2005	0,06	4,58	Cuando Rastrojo pierde, Erial lo reemplaza
5	Bosque en 1991 y Rastrojo en 2005	2,43	0,26	Cuando Bosque pierde, Rastrojo lo reemplaza
6	Bosque en 1991 y Edificada en 2005	-1,38	-0,89	Cuando Bosque pierde, Edificada no gana
7	Páramo en 1991 y Nieves perpetuas en 2005	0,27	9,73	Cuando Páramo pierde, Nieves perpetuas lo reemplaza
8	Nieves perpetuas en 1991 y Páramo en 2005	0,45	15,09	Cuando Nieves perpetuas pierde, Páramo lo reemplaza
9	No Rastrojo en 1991 y Rastrojo en 2005	4,7	0,32	Cuando no Rastrojo pierde, Rastrojo lo reemplaza
10	No Bosque en 1991 y Bosque en 2005	-2,29	-0,15	Cuando no Bosque pierde, Bosque no gana
11	No Páramo en 1991 y Páramo en 2005	-2,14	-0,53	Cuando no Páramo pierde, no lo reemplaza Páramo

Tabla 5.- Transiciones sistemáticas entre categorías calculadas con base en las pérdidas

fila cuando Rastrojo avanza reemplaza a Pastizal pero no a Páramo. En la novena y décima columna, Erial gana sistemáticamente de Agrícola y Rastrojo. Finalmente en las últimas cinco filas cuando Páramo gana no reemplaza Pastizal, pero si Nieves perpetuas. Páramo tiende a persistir, mientras Pastizal tiende a perder.

La Tabla 5 muestra los resultados destacados de la Tabla 1, en relación a las transiciones sistemáticas en función de las pérdidas calculadas. En las dos primeras filas se identifica un

comportamiento persistente en Pastizal, cuando pierde lo reemplaza rastrojo, pero no Bosque. En la filas tres y cuatro, Rastrojo presenta un patrón sistemático, cuando Rastrojo pierde, es reemplazado tanto por Edificada como por Erial. En las filas cinco y seis, al perder Bosque es reemplazado por Rastrojo, pero no por Edificada. En las filas siguientes, siete y ocho, se observa que cuando Nieves perpetúa pierde este es reemplazado por Páramo y viceversa; este proceso se da entre estas dos categorías por ser adyacentes y por la propia dinámica de la zona de Nieves perpetuas,

que se contrae en época de verano y se expande en época de invierno, aunque es también real la pérdida del área específica cubierta de nieve debido a los impactos del cambio climático y a que se está al final de una era interglaciar (IDEAM, 1998). En la misma publicación se plantea la posibilidad de la desaparición del nevado del Tolima para el 2010, lo cual podría ser acelerado si ocurre una activación del volcán.

---

## CONCLUSIONES

La integración del análisis detallado de la matriz de transición (Pontius *et al.*, 2004) y el índice de persistencia (Braimoh, 2006) permitieron identificar y analizar, espacial y temporalmente, las transiciones sistemáticas y aleatoria ocurridas dentro de un periodo de tiempo específico y en cada una de las categorías temáticas consideradas en la cuenca del río Combeima. Estos resultados son proporcionados de una manera que ya pueden ser integrados en procesos de planificación ambiental de cuencas hidrográficas, aportando a “las cajas de herramientas” existentes para tal fin, como en el caso de Colombia.

El conocimiento detallado de los CCUT que ocurren en la cuenca permite dimensionar el impacto que causaría la alteración de una de sus categorías temáticas en su inmediato entorno. Proporcionando nuevos elementos para entender procesos tales como la deforestación o la reforestación, por ejemplo.

---

## RECONOCIMIENTOS

Uriel Pérez agradece a la Universidad del Tolima, al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas” - COLCIENCIAS y *Academic and Professional Programs for the Americas* - LASPAU por el soporte económico durante el periodo de ejecución del proyecto.

Joaquín Bosque Sendra dedica este trabajo a la memoria de la profesora Díaz Muñoz que tanto ha contribuido al estudio de los temas de la ocupación del suelo.

---

## BIBLIOGRAFÍA

Alo, C.A. y R.G. Pontius Jr (2004): “Detecting the influence of protection on landscape transformation in Southwestern Ghana”, Conference proceedings of the joint meeting of The Fifteenth Annual Conference of The International Environmetrics Society and The Sixth Annual Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. Portland ME.

Alo, C.A. y R.G. Pontius Jr (2007): “Identifying systematic land cover transitions using remote sensing and GIS: The fate of forests inside and outside protected areas of Southwestern Ghana”. In press in *Environment and Planning B*, October 2006.

Bernal, M.H. (2003): *Determinación de las especies de Herpetos, Aves y Chiropteros de la cuenca superior del río Combeima*. Alcaldía municipal de Ibagué – PNUD – UT. Ibagué. 50 p

- Braimoh, A.K. (2006): Random and systematic land-cover transitions in northern Ghana. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 113(1-4): 254-263.
- Brandt, J.S. y P.A. Townsend (2006): Land use – land cover conversion, regeneration and degradation in the high elevation Bolivian Andes. *Landscape Ecology*, 21(4): 607-623.
- Calder, I.; T. Hofer; S. Vermont y P. Warren (2007): Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua. *Unasylva*, 58(229): 3-10.
- CEDAR y CORTOLIMA (1991): *Plan de manejo para la cuenca del río Combeima*. Ibagué, Universidad del Tolima. 275 p.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA) (1996): *Inventario de fauna silvestre de las cuencas de los ríos Combeima, Toche y Tohecito: Investigación biológica de peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos*. Ibagué, UT. 46 pp.
- CORTOLIMA y Gestión, Estudios y Obras Ambientales (GEOAM Ltda.) (1997): *Caracterización edáfica y de vegetación según leyenda fisiográfica de la cuenca del río Combeima*. Ibagué, CORTOLIMA, 92 p.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). (2007): *Resultados del Censo general del 2005*. <http://www.dane.gov.co/files/censo2005/regiones/tolima/ibague.pdf>. [Consultado el 20 de febrero de 2007]
- Esquivel, H. E. y V.A. Nieto (2003): *Diversidad florística de la cuenca alta del río Combeima*. *Alcaldía municipal de Ibagué*. Ibagué, PNUD – UT, 190 p.
- GLOCHAMORE consortium (2006): *Global change and mountain region research strategy, the Mountain Research Initiative (MRI)*. ETH-Office, Zürich, Switzerland. 48 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (1998): *Los glaciares colombianos, expresión del cambio climático global*. Bogotá D.C. IDEAM, 19 p. <http://www.ideam.gov.co/publica/index4.htm> [Consultado el 12 de diciembre de 2007]
- IDEAM, (2004): *Guía técnico científica para la ordenación y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia (decreto 1729 de 2002)*. IDEAM y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia, Bogotá D.C., 100 p. <http://www.ideam.gov.co/cuencas.asp?id=1> [Consultado el 12 de diciembre de 2007]
- Losada-Prado, S.; A.M. González-Prieto; A.M. Carvajal-Lozano y Y. Guillermo (2005): Especies endémicas y amenazadas registradas en la cuenca del río Coello (Tolima) durante estudios rápidos en 2003. *Ornitología Colombiana*, 3: 76-80.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002): *Plan de manejo: Parque Nacional Natural los Nevados y su zona amortiguadora*. Ministerio del medio ambiente. Pereira, Colombia, Unidad coordinadora, Fondo de inversiones ambientales, 35 p.
- Pérez, U. y N. Ortiz (2005): *Geomática aplicada a la planificación del uso de la tierra*.

IBAL E.S.P. Oficial – Universidad del Tolima. Informe de investigación. Ibagué. 187 p. + CD-ROM

Pontius Jr, R.G.; E. Shusas y M. McEachern (2004): Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101: 251-268.

Puyravaud, J.-P., (2003): Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3): 593-596.

Valenzuela, C y M. Baumgardner (1990): Selection of appropriate cell sizes for thematic maps. *ITC Journal*, 1990 (3): 219-224.

Vanegas, G.M. (2002): *Proyecto Regional. Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: realidad y potencial*. Convenio IDRC – OPS/HEP/CEPIS. 2000 - 2002. Estudio complementario, caso Ibagué, Colombia, IDRC – OPS/HEP/CEPIS.

Versace, V.L.; D. Ierodiaconou; F. Stagnitti y A.J. Hamilton (2008): Appraisal of random and systematic land cover transitions for regional water balance and revegetation strategies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123(4): 328-336.

Villa F. A.; G. Reinoso; M. Bernal y S. Losada-Prado (2003): *Informe final del proyecto biodiversidad faunística de la cuenca del río Coello: Biodiversidad faunística regional fase I*. Tomo III. Ibagué, Colombia, Cortolima, Universidad del Tolima, 480 p.