



**Universidad de Valladolid
Campus de Palencia**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

**Máster Oficial de Investigación en Conservación y Uso
Sostenible de Sistemas Forestales**

**ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE LOS CAMBIOS DE USO DEL
SUELO MEDIANTE TELEDETECCIÓN EN UNA MICROCUENCA
ALTO ANDINA DE ECUADOR**

Alumno: Diego Armando Damián Carrión
Tutor: José Antonio Delgado de la Mata

Septiembre 2017

ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE LOS CAMBIOS DE USO DEL SUELO MEDIANTE TELEDETECCIÓN EN UNA MICROCUENCA ALTO ANDINA DE ECUADOR

Resumen

El objetivo de este trabajo fue cuantificar los cambios de uso del suelo que han ocurrido durante los años 1991-2011 en la parte alta de la microcuenca del río Jubal (MCJ) de la parroquia Achupallas, provincia de Chimborazo - Ecuador. El análisis multitemporal se realizó usando imágenes del satélite Landsat ETM+, de mediana resolución. Con la utilización de técnicas de percepción remota, SIG y cartografía digital se generaron mapas temáticos de usos de suelo. Se distinguieron seis usos del suelo: Páramo, Bosque, Cultivos, Pastizales, Humedales y Cuerpos de Agua. Se validaron los mapas temáticos, obteniéndose precisión general de (84% - 90%) y coeficientes de Kappa de 0,81 – 0,87 para las clasificaciones de 1991 y 2001 respectivamente. El análisis de la matriz de transición en las dos décadas de análisis (1991-2011) reveló que las actividades agrícolas (Cultivos) han influido en mayor medida; favoreciendo la disminución de cobertura vegetal en la MCJ, transformando un 14% del Bosque a Cultivo y un 39% de Pastizal a Cultivo. Los Humedales disminuyeron su cobertura total de 15,6 a 6,5% debido a su transformación en Cultivo y Pastos. Los resultados de este trabajo son de utilidad para futuros planes de ordenamiento territorial y en la planeación de estrategias para la conservación de los recursos naturales de la microcuenca del río Jubal perteneciente al Parque Nacional Sangay.

Palabras clave: cobertura vegetal, ecosistemas alto andinos, Jubal, uso del suelo, teledetección.

Abstract

The objective of this work was to quantify the changes in land use that occurred during the years 1991-2011 in the upper part of the Jubal river basin of the Achupallas parish, province of Chimborazo, Ecuador. The multitemporal analysis was performed using images of the Landsat ETM + satellite, medium resolution (30m x 30m). Using the techniques of remote sensing, GIS and digital mapping, thematic maps of land use were generated. Six uses of the soil were distinguished: Páramo, Forest, Crops, Grasslands, Wetlands and Water bodies. Thematic maps were validated, obtaining general accuracy of (84% - 90%) and Kappa coefficients of 0.81 – 0.87 for the 1991 and 2001 classifications respectively. The analysis of the transition matrix in the two decades of analysis (1991-2011) revealed that agricultural activities (Crops) have influenced to a greater extent; Favoring the decrease of vegetal cover in the MCJ, transforming a 14%

of the Forest to Cultivation and a 39% of Pastizal to Cultivation. Wetlands decreased their total coverage from 15.6 to 6.5% due to their transformation into Crops and Grasslands. The results of this work are useful for future territorial planning plans and in the planning of strategies for the conservation of the natural resources of the Jubal River microbasin belonging to Sangay National Park.

Keywords: plant cover, high andean ecosystems, Jubal, soil use, remote sensing.

Introducción

Durante décadas, los estudios de deforestación tropical se han llevado a cabo con énfasis en los bosques tropicales de tierras bajas. Evidenciando en que la mayoría de los estudios de deforestación en América del Sur se han centrado en la cuenca del Amazonas. Sin embargo, las zonas de montaña representan un porcentaje importante de América del Sur, esta área raramente se ha considerado en los estudios de deforestación. A nivel mundial, las zonas de montaña se consideran una fuente esencial de servicios de los ecosistemas, influyendo en el ciclo hidrológico, lo que proporciona agua a las poblaciones que viven en zonas de montaña, así como en los asentamientos de tierras bajas (Armenteras *et al.*, 2011). La cordillera de los Andes atraviesa Sudamérica en casi toda su extensión, pudiendo llegar hasta 6000 m sobre el nivel del mar, lo cual lo vuelve fisiográfica y climáticamente complejo, pero al mismo tiempo algunos autores lo consideran como una zona de vida con alta diversidad biológica, abarcan 133 ecosistemas diferentes (Rodríguez *et al.*, 2013). Sin embargo, también es una región con un alto grado de amenaza debido al cambio del uso de la tierra, la erosión del suelo, deslizamientos de tierra entre otros; pero la más importante son las presiones antropogénicas sobre los ecosistemas de páramo y bosques nublados, considerados como sumideros de agua dulce natural, que han sido propensos a la colonización de crear un espacio para la agricultura y el pastoreo. A pesar que la agricultura tradicional de montaña está siendo abandonado en muchas regiones montañosas, continúa su expansión en otras áreas. Este es el caso principalmente en las regiones marginales de países en vías de desarrollo donde la agricultura de subsistencia sigue siendo un factor importante de la economía local (Armas & Vanacker, 2013). Los Andes ecuatorianos, el uso de cobertura del suelo está cambiando a un ritmo acelerado y cada día aumenta; este cambio se debe en gran parte a los cambios socioeconómicos y demográficos radicales de los últimos años (Vanacker *et al.*, 2003).

En las últimas décadas el cambio de uso de suelo y de cobertura es un tema central de la investigación científica, las investigaciones de la dinámica del uso de la tierra

adquieren un nuevo significado y contenido dentro del contexto de analizar los factores regionales que sirven como motores de los cambios ambientales constituyéndose en un factor que influye en el cambio global. Los ecosistemas terrestres han sufrido grandes transformaciones, la mayoría, debido a la conversión de la cobertura del terreno y a la degradación e intensificación del uso del suelo (Baicha, 2016). Las acciones producto de las actividades antrópicas sobre el medio ambiente provocarán efectos colaterales sobre los ecosistemas terrestres, incrementando la vulnerabilidad frente a los efectos adversos del cambio climático. Estos paisajes pueden ser sometidos a múltiples fases de transición resultando en un mosaico de restos nativos de hábitat, la agricultura y los entornos urbanos. Sin embargo, la pérdida de biodiversidad es el problema más evidente y directo que se genera por la transformación de las principales coberturas naturales al homogenizar los tipos de vegetación. Los impactos generados en el paisaje están asociados a los diferentes niveles de intervención ocasionados por la expansión y modernización agrícola, constituyendo un tema de importancia nacional, regional y global (Kintz *et al.*, 2016).

Las técnicas de teledetección se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial que en conjunto con los sistemas de información geográfica (SIG) constituye uno de las mayores aportes dentro del campo de la geografía y la cartografía. Dentro de las múltiples aplicaciones nos brindan la posibilidad de realizar un análisis multitemporal (Sidhu *et al.*, 2016) cuyo objetivo principal es encontrar la forma de combinar e integrar en el análisis varias imágenes satelitales a una misma área pero de diferentes fechas, en las cuales se encontrarán distintos estados fenológicos en la vegetación, cambios de uso de suelo, cambios en la superficie de los cuerpos agua, entre otros. Para realizar una comparación de cambios de uso de suelo de diferentes épocas mediante teledetección es necesario eliminar previamente cualquier cambio en los niveles digitales de la escena que no sea debido a cambios reales en la cubierta, esto conlleva asegurar que estemos situados en la misma zona para ambas fechas y que la variable que estemos comparando se refiera a la misma escala de medida (Rahman & Saha, 2009). Es necesario eliminar las distorsiones provocadas por la interferencia de la atmósfera en la radiación reflejada por la superficie mediante correcciones radiométricas y geométricas las cuales son indispensables en este tipo de estudio. Existen dos métodos de clasificación temática: supervisada y no supervisada. En la supervisada se dispone de información de verdad terreno (parcelas de los diferentes usos de suelo presentes en el área de estudio). A través de estas áreas de verdad terreno se estimaran las características espectrales de cada clase, para posteriormente tratar de extender la clasificación a todos los píxeles de la imagen. La

clasificación no supervisada busca una segmentación ciega basada en las propiedades estadísticas de la imagen.

Para toda clasificación resultante es imprescindible una validación de los resultados mediante información externa de las clases presentes en el área clasificada y obtener índices de fiabilidad objetivos del proceso de clasificación (Osuma-Osuma *et al.*, 2015). Por lo antes mencionado, es necesario evaluar la cobertura vegetal en los ecosistemas de montaña ecuatorianos de manera eficiente y rápida para comprender mejor los factores subyacentes que influyen en la cobertura vegetal, y que sirva como base para futuros trabajos en ecosistemas montañosos. El presente trabajo de investigación tiene por objetivo analizar la dinámica del cambio de uso del suelo (CUS) en la parte alta de la microcuenca del río Jubal (3120-4360 msnm) en Ecuador, con el propósito de inferir y esclarecer algunos de los procesos antropogénicos más notorios sobre este territorio en el período 1991-2011. Una manera confiable de lograr el objetivo planteado es la utilización de la geomática como una ciencia práctica y precisa donde los datos obtenidos son validados mediante matrices de confusión, índice Kappa y la precisión general Overall Accuracy (OA) (Ayala-Izurieta *et al.*, 2017). Esto le da al usuario del mapa el grado de fiabilidad de que una ubicación seleccionada al azar en el mapa esté debidamente clasificada.

Materiales y métodos

Área de estudio

La parte alta de la microcuenca del río Jubal (MCJ) se encuentra ubicada en la zona Suroeste del Parque Nacional Sangay, parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo, Ecuador (Figura 1). Con una superficie de 4953 ha, está asentada en una área montañosa y escarpada donde los depósitos piroclásticos resultantes de numerosas erupciones volcánicas han generado suelos de orden andosoles con una morfología y propiedades que varían de acuerdo a la pedogénesis, edad, composición química de los materiales y condiciones meteorológicas. En la MCJ predominan pendientes inclinadas (12%-25%) y con presencia de algunas zonas muy escarpadas (50%-90%). Los datos obtenidos de los anuarios de la estación meteorológica (INAMHI: M5138); registran una temperatura media anual de 8,2 °C con un máximo diurno de 17 °C y un mínimo nocturno de 0 °C, humedad relativa 85,6 % y una precipitación anual de 981 mm. El conjunto fluvial de la MCJ está formado por afluentes que alimentan al cauce principal el cual desemboca en la cuenca del río Santiago aportando su recurso hídrico a la Central Hidroeléctrica Paute y aguas abajo confluye en los afluentes el río Amazonas. En la MCJ se encuentran dos ecosistemas (Figura 2). Uno identificado como

Bosque siempre verde montano alto, en el cual encontramos árboles de gran altura, aproximadamente 20 m, cubiertos por una gran abundancia de plantas epífitas de las familias Orchidaceae, Bromliaceae y Araceae, siendo las más representativas: *Escallonia mytilloidea*, *Escallonia rolloti*, *Weinmannia mariquitae*, *Gaiadendron punctatum* y *Oreopanax semanianus*. El segundo corresponde a un Páramo herbáceo las especies más comunes son: *Cortaderia nítida*, *Calamagrostis intermedia*, *Disterigma empetrifolium*, *Hypericum laricifolium* *Geranium cerastoides* (MAE, 2012).

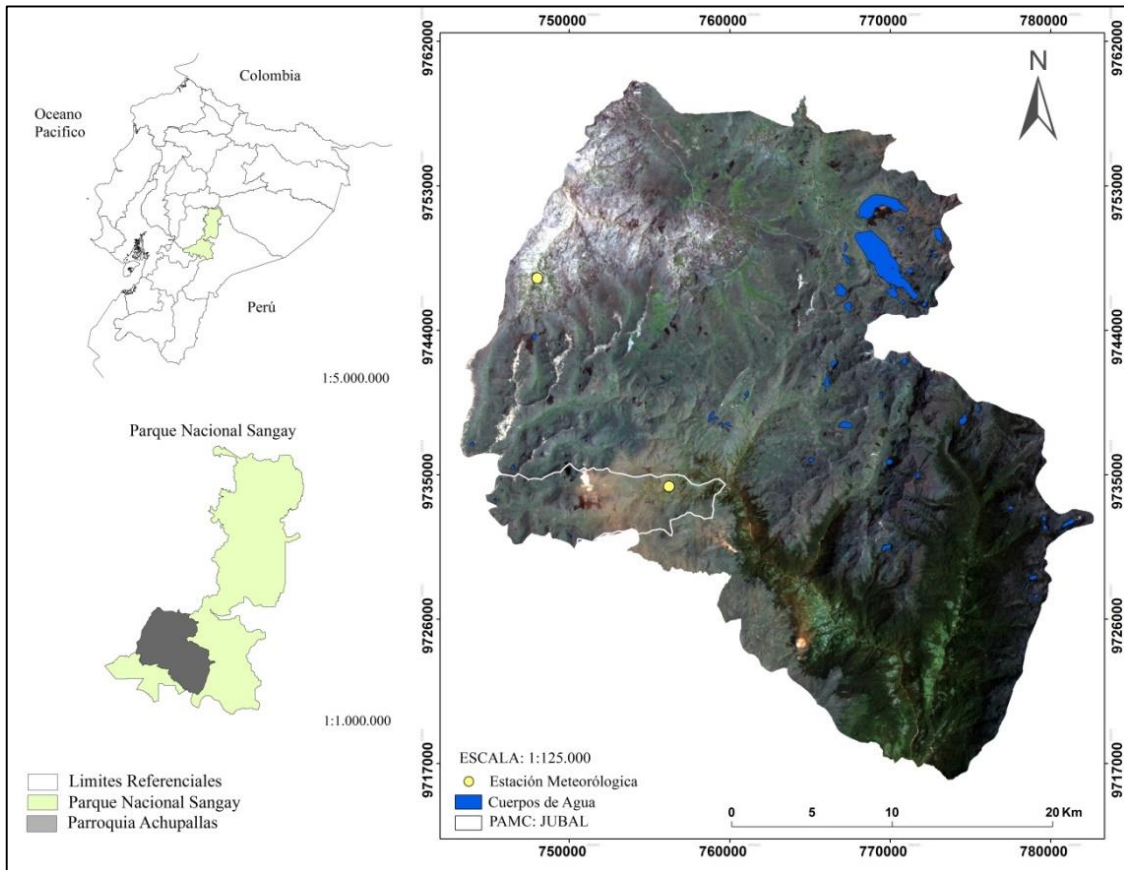


Figura 1. Mapa de ubicación de la parte alta de la microcuenca del río Jubal

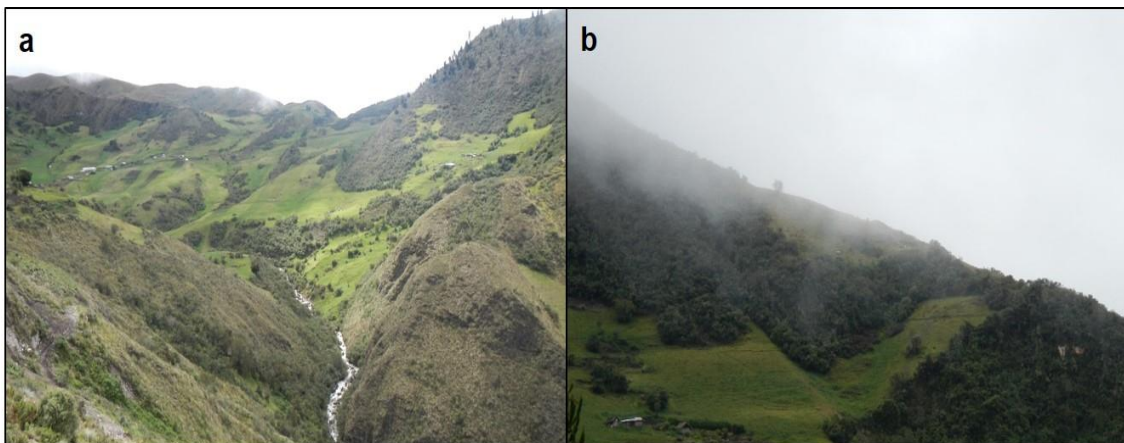


Figura 2. Parte alta de la microcuenca del río Jubal (a: ecosistema de páramo y b: ecosistema de bosque nublado)

Preprocesamiento de las imágenes

Las coberturas del suelo en los años 1991 y 2011 se estimaron usando dos imágenes: para el año 1991 se usó Landsat 5 y para el año 2011 Landsat 7, con una resolución espacial (30m x 30m) fueron descargadas de la base de datos de la United State Geological Survey (USGS, 2015), configurando los parámetros que proporcionan la ubicación de la escena *path* 10 y *row* 62 que contiene al area de estudio. Las imágenes fueron procesadas mediante técnicas de percepción remota, uso de SIG y cartográfica digital de INFOPLAN, SENPLADES, IGM a escala normalizada, las cuales corresponden a la escena de inicios de verano local, en el mes de marzo. A todas ellas se les realizó el siguiente tratamiento; debido a que las imágenes descargadas son de tipo L1T, esto quiere decir que poseen una corrección geométrica basada en puntos de control y modelos digitales del terreno; se decidió obtenerlas en un formato preprocesado a reflectancia de superficie a partir de una colección de imágenes históricas derivadas tanto del sensor Landsat TM como ETM+; estos productos, generados por la NASA, son conocidos como LEDAPS (Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System). Se usa el formato GeoTiff con proyección Universal Transversal Mercator (UTM) y en Datum WGS-84. Los mismos que son necesario verificar los archivos de las imágenes descargadas, teniendo en cuenta las buenas condiciones de visibilidad de la parroquia y que disponga del conjunto de archivos completo, ya que éstos contienen la información de los metadatos de la imagen. Utilizando las herramientas de *Open Foris Toolkit* (FAO, 2014) que contiene los comandos para el procesamiento de datos geo-espaciales y trabajando en el sistema operativo Ubuntu dentro de la distribución GNU/Linux; se extrajeron los metadatos y se realizó la calibración radiométrica y la máscara de nubes que contiene dicha información incluyendo las sombras de nubes generada por *LEDAPS* (Tabla 1); las imágenes son corregidas atmosféricamente con el comando *off-mask.bash* para tener al final imágenes en mejores condiciones que son sometidas al proceso de composición de bandas con el comando scrip *stack.bash* realizando una fusión de bandas espectrales para cada imagen (Masek *et al.*, 2006).

Tabla 1. Corrección atmosférica

Comandos
<i>Indpm:</i> Extrae los metadatos de un producto Landsat estandar
<i>Indcal:</i> Calibra Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+
<i>Indcsm:</i> Genera mascara de nubes
<i>Indsr:</i> Realiza la corrección atmosférica

Fuente: (Feng *et al.*, 2012; Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, 2012)

La georreferenciación de la imagen se realizó con la ayuda de cartas topográficas georreferenciadas de la parroquia de Achupallas PSAD-56 suministradas por el Instituto Geográfico Militar 1968. Esta actividad involucró la identificación de puntos de referencia o “control” geográfico donde se usaron 40 puntos de control, con una tolerancia de 16m correspondiente a la escala 1:50.000 (Figura 3).

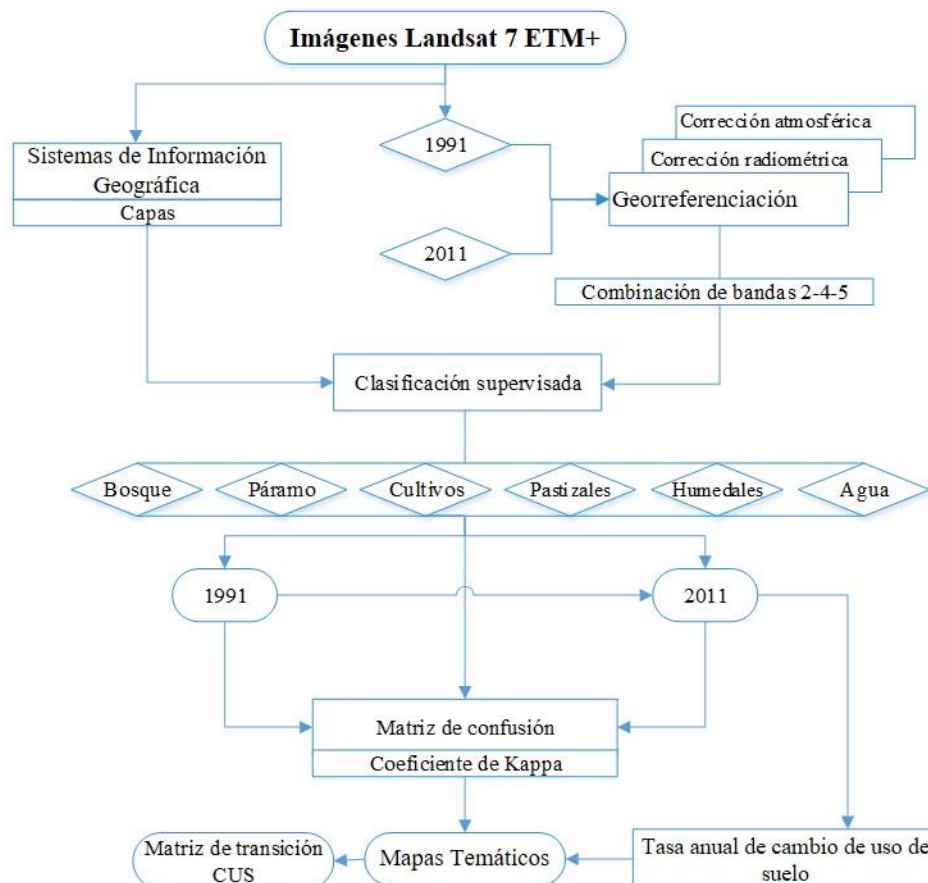


Figura 3. Flujo de trabajo y actividades en el proceso de clasificación supervisada de imágenes Landsat ETM+ de los años 1991 – 2011

Clasificación supervisada

En la clasificación supervisada se empleó el algoritmo de máxima verosimilitud, con el fin de distinguir el Bosque de las otras categorías de coberturas. El procedimiento de clasificación supervisada consistió, primero, en la construcción de “verdad terreno” (sites test) y luego, en la construcción de las categorías de coberturas (Figura 4) como: Pa (Páramo), Bs (Bosque), Cu (Cultivos), Pz (Pastizales), Hm (Humedales), Ca (Cuerpos de Agua), para generar mapas de uso de suelo dentro de una superficie de 4953 ha correspondiente a los años 1991 y 2011.

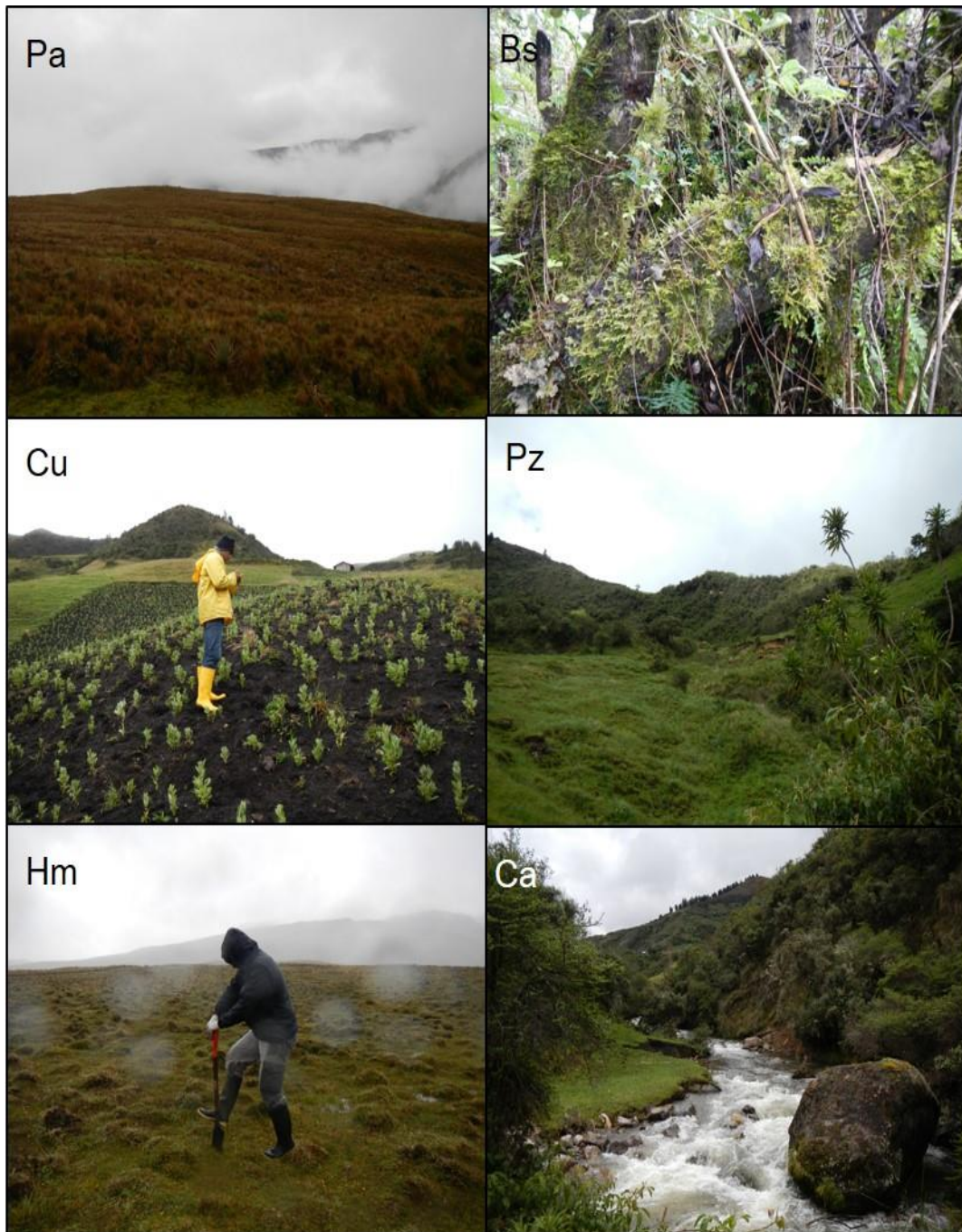


Figura 4. Usos de suelo Pa (Páramo), Bs (Bosque), Cu (Cultivos), Pz (Pastizales), Hm (Humedales), Ca (Cuerpos de Agua)

Tasas de cambio anual de la cobertura (TAC)

Para determinar la tasa de cambio anual en la cobertura usaremos la ecuación propuesta por (Puyravaud, 2003) representada en la ecuación (1), para determinar la TAC, quien asumió que la tasa de cambio con el tiempo es proporcional al área ocupada. Así, entre dos instantes de tiempo, tenemos que:

$$TAC = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

En esta ecuación, A_1 y A_2 representan las áreas de la cobertura en el tiempo 1 y 2, respectivamente, y t_1 y t_2 representan el año de evaluación inicial final, respectivamente.

Validación de resultados

La incertidumbre en la clasificación supervisada se calculó mediante la comparación de los resultados obtenidos y un muestreo aleatorio estratificado, para lo cual se seleccionaron 210 píxeles para la validación con un 95% de confianza. La validación fue realizada mediante una matriz de confusión, con la que se evaluó la incertidumbre de la clasificación, situando en las filas las clases o categorías obtenidas en el mapa y en las columnas las mismas clases con datos reales del terreno o campo. Otra prueba estadística complementaria que se empleó fue el coeficiente de Kappa (K), el cual es una medida de concordancia entre los valores observados y los valores estimados (Perea *et al.*, 2009), para su cálculo se utilizaron los valores de la diagonal de cada una de las matrices de confusión generadas representada en la ecuación (2).

$$K = \frac{N \sum X_{ii} - \sum X_{i+X_{+i}}}{N^2 - \sum (x_i x_{+i})} \quad (2)$$

Dónde: X_{ii} = número de observaciones de línea i y la columna i . $X_{i+X_{+i}}$ = totales marginales de la línea i y columna i , respectivamente. N = número total de observaciones.

En la Figura 3 se ilustra el flujo de trabajo y actividades realizadas en el proceso de clasificación supervisada de las imágenes Landsat ETM+ de los años 1991- 2011.

Análisis de transiciones características

En el análisis de las transiciones en el cambio de uso seguimos a (Pontius *et al.*, 2004), el análisis se inicia con la tabulación cruzada de la información correspondiente a los dos mapas. Esta tabulación toma forma en una matriz de proporciones donde las filas corresponden con la información de 1991 y las columnas con la información del 2011. La suma de todos los valores en la fila i conduce al total representado como P_{i+} y la suma de los valores en la columna j conduce al total representado como P_{+j} . Los valores fuera de la diagonal se representan como P_{ij} y denotan la proporción de suelo que experimenta una transición de la categoría i a la categoría j . Los números en la diagonal de la matriz (P_{jj}) denotan la proporción de suelo que persiste en la categoría j . La última fila de la matriz representa las ganancias ($G_j = P_{+j} - P_{jj}$), mientras que las pérdidas ($L_j = P_{i+} - P_{ij}$), se representan en una columna.

En el análisis de las transiciones, consideramos cuatro números: el primero, representa el valor de P_{ij} ; el segundo representa la ganancia que se puede esperar en cada categoría si ésta ocurriera de manera aleatoria, y se calcula con la expresión representada en la ecuación (3), asumiendo que la ganancia en cada categoría y la proporción correspondiente permanecen constantes; el tercer número resulta de sustraer el primer número del segundo ($P_{ij} - G_{ij}$), y el cuarto número resulta de dividir el tercer entre el segundo número ($(P_{ij} - G_{ij}) / G_{ij}$).

De manera similar, en el análisis de las transiciones en términos de las pérdidas como se ve en la ecuación (4), consideramos cuatro números como en el caso anterior pero asumiendo que la pérdida en cada categoría y la proporción correspondiente permanecen constantes; la cual resulta de la diferencia entre ($P_{ij} - L_{ij}$), y dividir ($(P_{ij} - L_{ij}) / L_{ij}$).

$$G_{ij} = (P_{+j} - P_{jj}) \left(\frac{P_{i+}}{\sum_{i=1, i \neq j}^J P_{i+}} \right) \quad (3)$$

$$L_{ij} = (P_{i+} - P_{ii}) \left(\frac{P_{+j}}{\sum_{i=1, i \neq j}^J P_{+j}} \right) \quad (4)$$

Finalmente, para interpretar las transiciones en términos de ganancias, consideramos el signo de ($P_{ij} - G_{ij}$) y el signo de ($(P_{ij} - G_{ij}) / G_{ij}$). Si ambos son positivos entonces se dice que la categoría en la columna gana y que ésta reemplaza la categoría en la fila. Si ambos signos son negativos, se dice que la categoría en la columna gana y que ésta *no* reemplaza la categoría en la fila. De manera similar, en términos de las pérdidas, consideramos el signo de ($P_{ij} - L_{ij}$) y el signo de ($(P_{ij} - L_{ij}) / L_{ij}$). Si ambos son positivos entonces se dice que la categoría en la fila pierde y que la categoría en la columna reemplaza la categoría en la fila. Si ambos signos son negativos, se dice que la categoría en la fila pierde y que la categoría en la columna *no* reemplaza la categoría en la fila.

Resultados

A partir de la corrección radiométrica, geométrica y atmosférica de las imágenes del satélite de los años 1991 y 2011 se identificaron las categorías de coberturas de Pa; Bs; Cu; Pz; Hm; Ca, para generar mapas de uso de suelo dentro de una superficie de 4953 ha. En la Tabla 2 se observa que en el período evaluado (1991-2011), el Pa de 3741,0 ha se redujo a 3566,6 ha con una tasa anual de cambio (TAC) de -0,2 ha/año; el Bs de 78,9 ha se redujo a 41,2 ha con una TAC de -3,2 ha/año, resultando en una pérdida de vegetación forestal de 37,7 ha; de igual forma los Hm han sufrido una disminución de

774,6 ha a 321,5 ha, con una TAC de -4,3 ha/año; y los Ca disminuyeron su superficie de ocupación de 22,8 ha a 21,0 ha con una TAC de -0,4 ha/año. Mientras que la superficie dedicada a Cu aumento 6,8 ha/año equivalente a 135,7 ha y la de Pz aumento 4,5 ha/año con un valor de 90,6 ha en el período evaluado (Figura 5 y 6).

Tabla 2. Evolución de la cobertura y uso del suelo en superficie y porcentaje entre 1991 y 2011.

Categoría	1991		2011		Cambios de la superficie en ha
	ha	%	ha	%	
Pa	3741,00	75,50	3566,60	72,00	-174,40
Bs	78,90	1,60	41,20	0,83	- 37,70
Hm	774,60	15,60	321,50	6,49	-453,10
Cu	145,60	2,90	541,40	10,93	+395,80
Pz	190,10	3,80	461,40	9,32	+271,30
Ca	22,80	0,50	20,90	0,42	-0,08
Total	4953,00	100,00	4953,00	100,00	

Pa (Páramo), Bs (Bosque), Cu (Cultivos), Pz (Pastizales), Hm (Humedales), Ca (Cuerpos de Agua)

En la Tabla 3 y 4 se muestra la matriz de confusión que sirvió para evaluar la incertidumbre en el proceso de clasificación supervisada. En general la clasificación en el año 1991 y 2011 se realizó con una precisión del 84% y 90% respectivamente. Estos resultados concuerdan con los encontrados por (Perea *et al.*, 2009; Osuna-Osuna *et al.*, 2015), quienes obtuvieron una precisión de 93%, y sugiere que estos valores de precisión se deben a que el algoritmo de máxima verosimilitud se basa únicamente en la información espectral de cada píxel y no tiene capacidad para identificar formas. El valor del índice de Kappa fue 0,81 y 0,87 para las clasificaciones de 1991 y 2011 respectivamente. El obtener un índice Kappa mayor a 0,8 significa que existe una buena correspondencia entre los usos de suelo asignados (Zhu *et al.*, 2010).

Tabla 3. Matriz de confusión para evaluar la incertidumbre de la clasificación de las clases temáticas del año 1991.

	Clases	Píxeles clasificados						Error Omisión
		Pa	Bs	Cu	Pz	Hu	Ca	
Datos referencia	Pa	32	0	5	2	0	1	0,20
	Bs	0	29	5	2	0	1	0,22
	Cu	1	4	29	0	3	2	0,25
	Pz	2	0	0	28	1	0	0,09
	Hm	2	0	0	0	31	2	0,11
	Ca	0	0	0	0	0	28	0,00
Error Comisión		0,14	0,12	0,25	0,12	0,11	0,18	
Exac. General (%) (OA) = 84				Kappa = 0,81				

Tabla 4. Matriz de confusión para evaluar la incertidumbre de la clasificación de las clases temáticas del año 2011.

	Clases	Píxeles clasificados						
		Pa	Bs	Cu	Pz	Hu	Ca	Error Omisión
Datos referencia	Pa	29	0	1	1	0	1	0,09
	Bs	0	24	4	0	0	1	0,17
	Cu	1	0	36	2	3	2	0,18
	Pz	0	0	0	36	1	1	0,05
	Hm	2	0	0	1	33	0	0,08
	Ca	0	1	0	0	0	30	0,03
Error Comisión		0,09	0,04	0,12	0,10	0,10	0,14	
Exac. General (%) (OA) = 90				Kappa = 0,87				

Los resultados muestran que el Pa es el ecosistema dominante al cubrir un área equivalente aproximadamente el 75,5% de la superficie estudiada (Figura 5). Por lo que un cambio de un punto porcentual en la cobertura de Páramo representa mayor área neta afectada si comparamos con el cambio de un punto porcentual de una unidad de cobertura que cubra un 5% del área total. El análisis de cambios de cobertura y uso del suelo, para el período 1991, revela que la cobertura vegetal que mayor área ocupa es la de Pa (3741 ha), distribuido en toda la cadena montañosa que entrecruza la parte alta de la microcuenca. Siguen en importancia los Hm alto andinos con 774,6 ha. Los Hm, de acuerdo a la Convención Ramsar, son ecosistemas vulnerables que juegan un papel fundamental en la dinámica hidrológica, cultural, ecológica y socioeconómica de la región andina (Valencia Rojas & Figueroa Casas, 2015), el Pz ocupa 190,1 ha, está distribuido de forma dispersa en toda el área de estudio; el Cu ocupa 145,6 ha y se ha convertido en una de las principales actividades culturales de subsistencia y en el sector están localizados en la parte Este de la microcuenca; las clases que menor cobertura exhiben son Bs con 78,9 ha y Ca 22,8 ha. El análisis de uso del suelo para el año 2011 refleja que en la parte alta de la MCJ el Pa se mantiene aún como un área de mayor superficie (3566,6 ha) durante el período evaluado de 20 años; seguido de las categorías de mosaicos de Cu (541,4 ha); Pz (461,4 ha) y Hm (321,5 ha); por lo contrario, las clases que menor cobertura ocupan fueron Bs (41,2 ha) y Ca (21 ha) como se muestra en la Figura 5 y en la Tabla 2. Los resultados reflejan un ecosistema fragmentado donde los principales efectos es la pérdida de la biodiversidad debida al incremento de la frontera agropecuaria y la deforestación. Dentro del ecosistema alto andino los sistemas más amenazados son el Pa, Bs y Hm, ya que por sus características propias, brindan múltiples servicios como: suministro de alimentos y agua; regulación

de las inundaciones, sequías y servicios culturales como los beneficios recreacionales y otros beneficios intangibles.

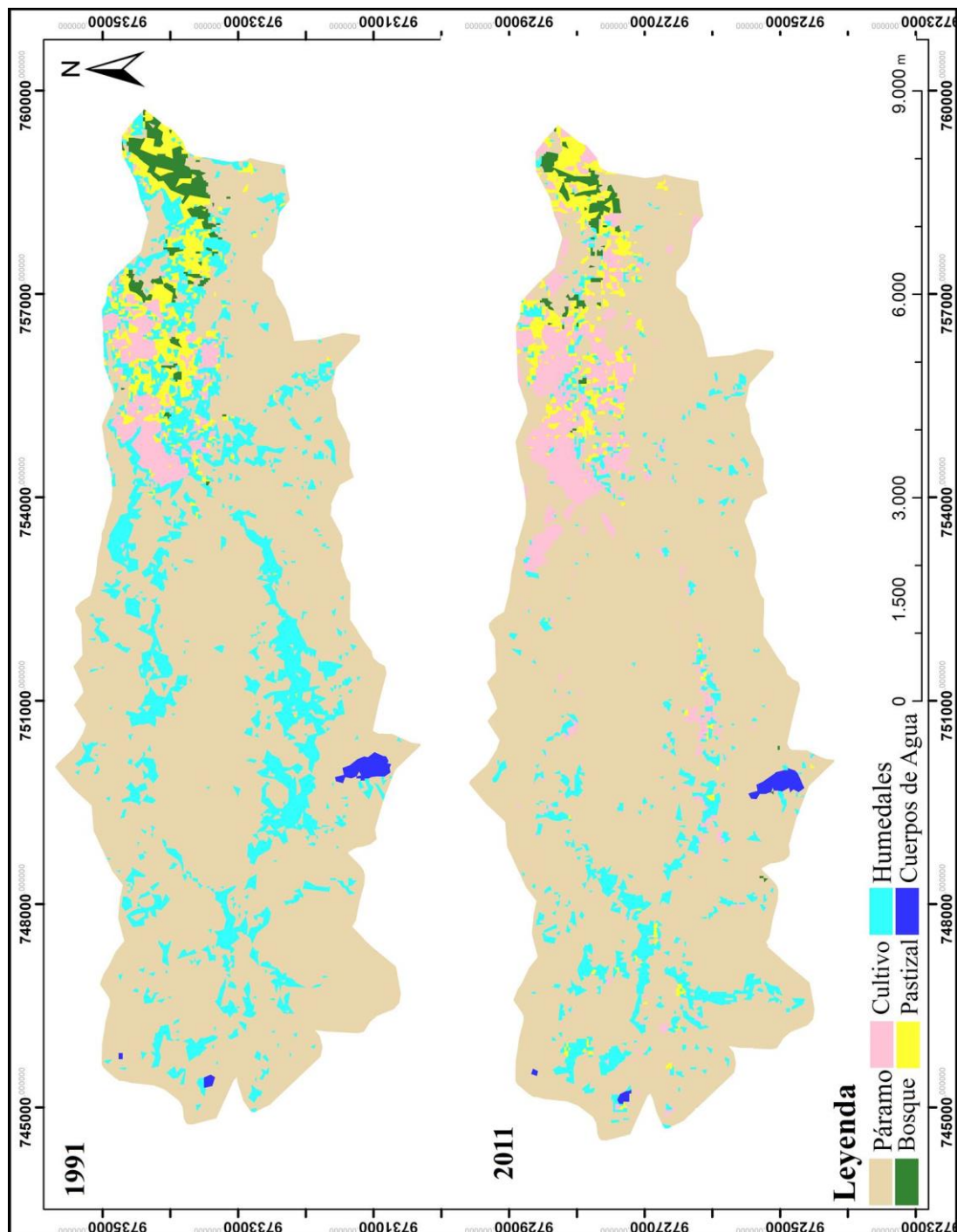


Figura 5. Mapa de la cobertura del suelo en los años 1991 y 2011 en la parte alta de la microcuenca Jubal

Por ende la matriz de confusión y el índice kappa nos asegura que las clasificaciones de los mapas pueden ser aceptadas como una buena aproximación a las condiciones reales, permitiendo de esta forma generar una figura que resume las tendencias en los cambios de uso del suelo ocurridos en el área de estudio (Figura 6).

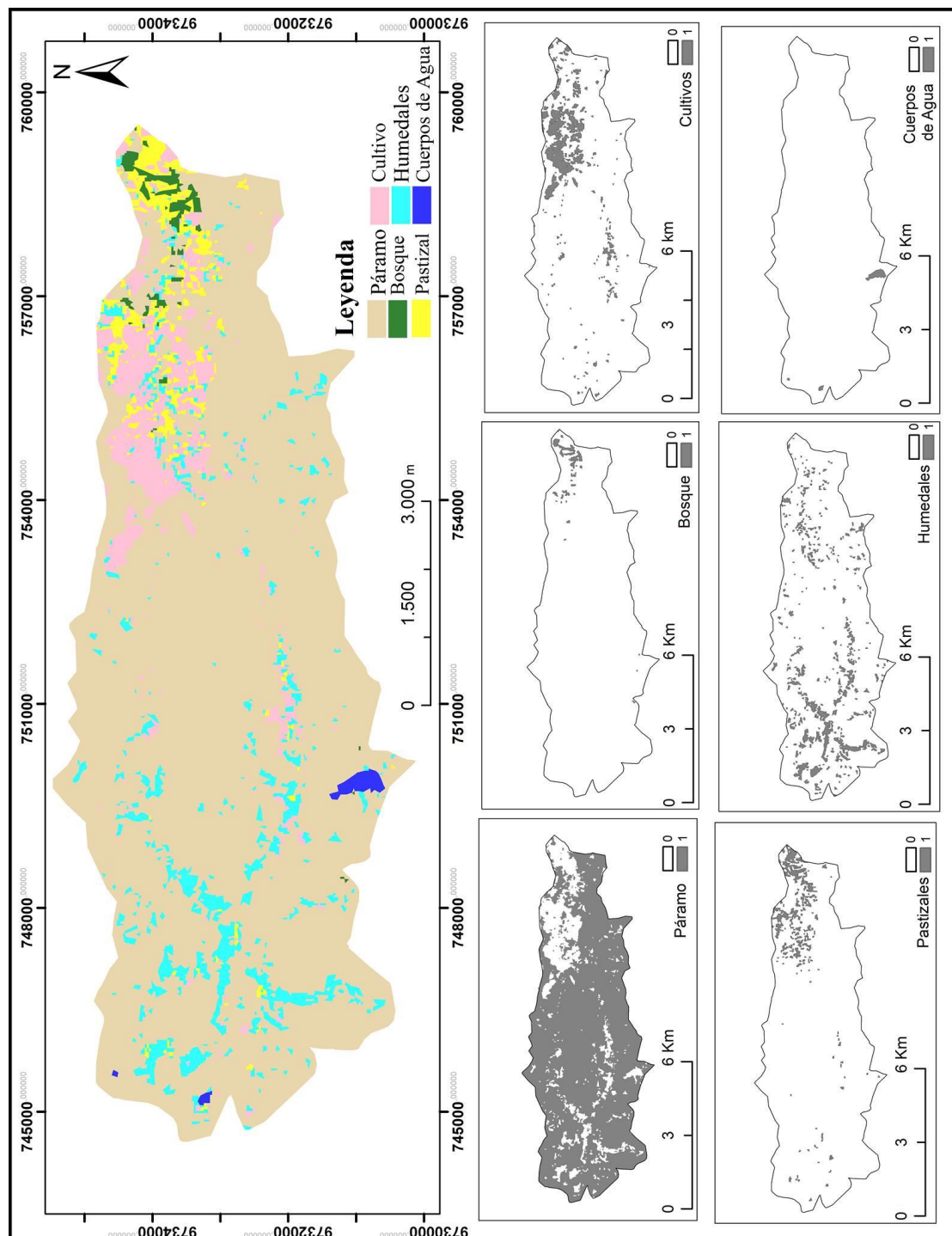


Figura 6. Mapa uso de la tierra en la MCJ en 2011, representación sintética de cada uso del suelo por los valores binarios de 1 o 0

En la Tabla 5 se muestra la matriz de tabulación cruzada con los valores expresados en puntos porcentuales del área total, donde las filas y columnas representan las pérdidas y ganancias que se ha producido por cambios de cobertura y uso del suelo, los datos generados en la Tabla 1 son usados para calcular las transiciones sistemáticas en términos de ganancias (Tabla 6) y pérdidas (Tabla 7).

Tabla 5. Matriz de tabulación cruzada de los mapas correspondientes a 1991 (filas) y 2011 (columnas) (Pontius, 2004). Valores expresados en puntos porcentuales del área total (4953 ha).

	Pa	Bs	Cu	Pz	Hm	Ca	Total 1991	Pérdidas
Pa	0,7305	0,0004	0,0056	0,0026	0,0228	0,0002	0,7621	0,0315
Bs	0,0030	0,0060	0,0004	0,0060	0,0003	0,0000	0,0157	0,0097
Cu	0,0006	0,0000	0,0253	0,0026	0,0006	0,0000	0,0291	0,0038
Pz	0,0058	0,0017	0,0155	0,0131	0,0027	0,0000	0,0388	0,0256
Hm	0,0823	0,0004	0,0215	0,0082	0,0375	0,0000	0,1499	0,1124
Ca	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0041	0,0047	0,0006
Total 2011	0,8226	0,0085	0,0682	0,0324	0,0640	0,0043	1,0000	0,1836
Ganancias	0,0921	0,0025	0,0429	0,0193	0,0265	0,0002	0,1836	

Las transiciones en términos de ganancias se muestran en la Tabla 6, donde cada segmento de columna tiene cuatro números. El primero se encuentra en la parte superior del segmento y representa el porcentaje de la cobertura en el 2011. El segundo número representa el porcentaje de suelo que se puede esperar si el proceso de cambio fuese aleatorio. El tercer número resulta de restar los dos números anteriores, y el cuarto número es el resultado de dividir el tercer número entre el segundo número en el segmento de columna. Las transiciones más significativas son las que ocurren cuando el Cu gana cobertura y reemplaza al Pz y al Hm, la otra transición importante es cuando el Pz gana cobertura y reemplaza al Bs, Cu y al Hm; y los páramos reemplazan a los Hm. Los procesos de transición de ganancias representan un proceso de avance de la frontera agropecuaria, siendo el más significativo el que representa el remplazo de Hm por Cu (Figura 7).

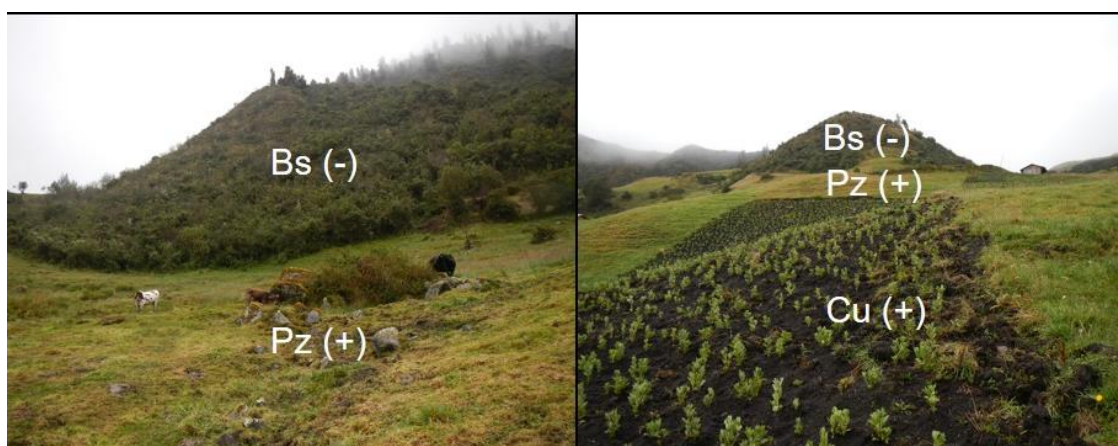


Figura 7. Usos de suelo Bs - (Bosque disminución), Cu + (Cultivos aumento), Pz + (Pastizales aumento)

Tabla 6. Análisis de los porcentajes de cambio en términos de ganancias.

	Pa	Bs	Cu	Pz	Hm	Ca
Pa	73,05	0,04	0,56	0,26	2,28	0,02
	15,97	0,20	3,37	1,53	8,26	0,01
		-0,15	-2,81	-1,27	-5,98	
		-0,78	-0,83	-0,83	-0,72	
Bs	0,3	0,60	0,04	0,60	0,03	0,00
	0,61	7,49	0,07	0,03	0,05	0,00
	-0,31		-0,03	0,56	-0,02	
	-0,51		-0,38	18,00	-0,36	
Cu	0,06	0,00	2,53	0,26	0,06	0,00
	1,13	0,01	14,14	0,06	0,08	0,00
	-1,06	-0,01		0,20	-0,02	
	-0,95	-0,76		3,39	-0,22	
Pz	0,58	0,17	1,55	1,31	0,27	0,00
	1,50	0,01	0,17	8,65	0,13	0,00
	-0,92	0,16	1,37		0,14	
	-0,61	15,61	8,03		1,10	
Hm	8,23	0,04	2,15	0,82	3,75	0,00
	5,80	0,04	0,66	0,30	4,16	0,00
	2,43		1,48	0,52		
	0,42		2,24	1,72		
Ca	0,04	0,00	0,00	0,00	0,02	0,41
	5,80	0,00	0,02	0,02	0,01	14,48
	-5,76					
	-0,99					

Las transiciones características de ganancia ilustran con el color de los usos de suelo bosques (verde); Cultivos (rosado); Pasto (amarillo); Humedales (azul cian).

En la Tabla 7 se muestra el análisis de transiciones características en términos de pérdidas, donde cada segmento de columna tiene cuatro números. El primero se encuentra en la parte superior del segmento y representa el porcentaje de la cobertura en el 2011. El segundo número representa el porcentaje de suelo que se puede esperar si el proceso de cambio fuese aleatorio. El tercer número resulta de restar los dos números anteriores, y el cuarto número es el resultado de dividir el tercer número entre el segundo número en el segmento de columna. Nuestro estudio refleja que las transiciones más importantes significan deforestación. Se observa que cuando el Pa pierde cobertura esta es remplazada por Cu, cuando el Bs pierde cobertura esta es remplazada por Pz y cuando el Hm pierde cobertura esta es remplazada por Cu y Pz. Por lo que se observa de estas transiciones, las pérdidas de los bosques y los páramos ocurren a costa de las zonas de ganadería y agricultura (Figura 8).

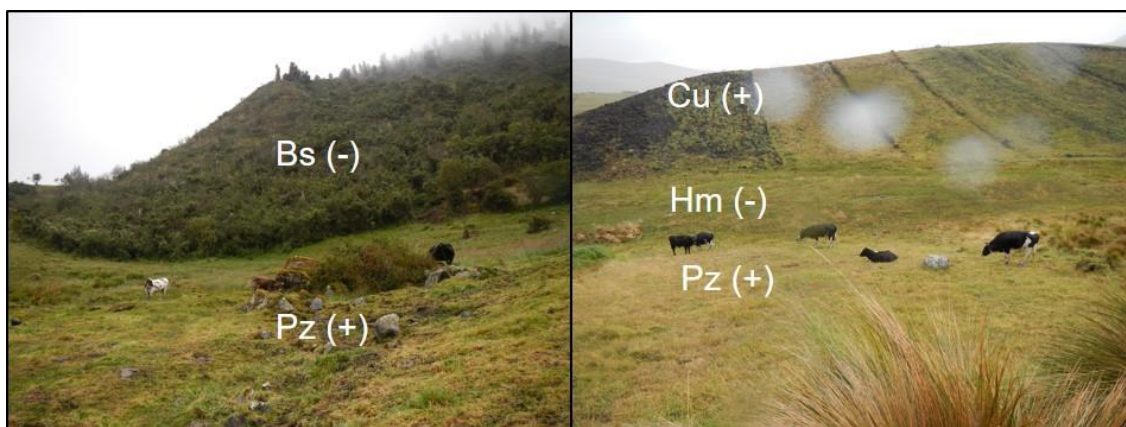


Figura 8. Usos de suelo Bs - (Bosque disminución), Hm - (Humedales disminución), Cu + (Cultivos aumento), Pz + (Pastizales aumento)

Tabla 7. Análisis de los porcentajes de cambio en términos de pérdidas.

	Pa	Bs	Cu	Pz	Hm	Ca
Pa	73,05	0,04	0,56	0,26	2,28	0,02
	15,97	0,75	0,30	2,03	10,07	0,05
		-0,71	0,26	-1,77	-7,79	
		-0,94	0,86	-0,87	-0,77	
Bs	0,3	0,60	0,04	0,60	0,03	0,00
	0,21	7,49	0,01	0,04	0,21	0,00
	0,09		0,04	0,55	-0,18	
	0,45		5,94	13,31	-0,85	
Cu	0,06	0,00	2,53	0,26	0,06	0,00
	0,39	0,03	14,14	0,08	0,38	0,00
	-0,32	-0,03		0,18	-0,32	
	-0,84	-0,94		2,30	-0,84	
Pz	0,58	0,17	1,55	1,31	0,27	0,00
	0,51	0,04	0,02	8,65	0,54	0,00
	0,07	0,13	1,53		-0,27	
	0,13	3,35	100,57		-0,50	
Hm	8,23	0,04	2,15	0,82	3,75	0,00
	1,99	0,15	0,06	0,40	4,16	0,10
	6,24	-0,10	2,09	0,42		
	3,14	-0,71	35,41	1,05		
Ca	0,04	0,00	0,00	0,00	0,02	0,41
	1,99	0,00	0,02	0,01	0,06	14,48
	-1,94					
	-0,98					

Las transiciones características de pérdidas se ilustran con el color de los usos de suelo bosques (verde); Cultivos (rosado); Pasto (amarillo); Humedales (azul cian).

Discusión

La actividad agraria en nuestra área de estudio esta encaminada a la ganadería (frecuentemente en combinación con quemas) y los cultivos (principalmente de papa y

otros productos secundarios). En ciertas zonas, estas actividades se encuentran combinadas mediante un sistema de rotación entre cultivos y pastos. En el trabajo elaborado por (Yáñez *et al.*, 2011) se evidenció que los páramos herbáceos y bosque siempre verdes montano alto en la sierra centro de Ecuador existe una reducción de cobertura entre los años 1999 y 2010 de 239.617 ha (27.5%) a 207.987 16 ha (16%) respectivamente, esta disminución el autor atribuye a los conflictos entre la conservación de las especies nativas y las actividades de desarrollo humano, además de los efectos del cambio climático. Mientras que (Beltrán *et al.*, 2009) atribuye la reducción a una importante intervención directa e indirecta por parte del ser humano.

Los cambios identificados en el periodo de evaluación probablemente se deben a diversos factores, uno de ellos sería la Ley de Reforma Agraria y Colonización de 1964, destinada fundamentalmente a aliviar la presión sobre la tierra en regiones de alta congestión humana ampliando la frontera agrícola. Mucho más drástica fue la Ley de Reforma Agraria aprobada en 1973 que requería la explotación eficiente de más del 80% del predio como condición para no ser sujeto de expropiación (Vanacker *et al.*, 2003) , lo cual impulsó a que los campesinos empezaran a subir la frontera agrícola y aumentar el sobrepastoreo en los páramos, proceso que ha ido continuando progresivamente hasta la actualidad.

La presente investigación revela que los Cu aumentaron aproximadamente 4 veces la cobertura inicial, la principal causa de esta pérdida se debe a que los moradores han desplazado el Bs y Pa, para implementar Cu como son *Solanum tuberosum*, *Oxalis tuberosa*, *Hordeum vulgare*, *Zea mays*, entre otros. Los Pz se incrementaron aproximadamente 3 veces, al mismo tiempo que la ganadería se intensificó en la sierra Ecuatoriana (datos de la ganadería FAO 4.516.000 e INEC 5.253.536 entre los años 1991 y 2011 respectivamente), dicho acontecimiento es entendible desde el punto de vista socioeconómico, ya que dichas actividades representan una fuente de ingreso a corto plazo para los habitantes.

Todos estos eventos se pueden deber a múltiples factores socioeconómicos, ya que los moradores no tienen otras fuentes de ingresos económicos y les induce a aumentar los Cu para obtener mayor rendimiento económico y mejorar sus condiciones de vida, sin ver los efectos a largo plazo que ocasionan al ecosistema altoandino. Además de existir una deficiente planificación y asesoramiento por parte de las autoridades y personal técnico sobre el uso sostenible de estos ecosistemas altoandinos.

Conclusiones

La integración de los SIG y la teledetección proporcionó información valiosa sobre la magnitud de los cambios asociados a crecimiento en actividades antropogénicas que

han sustituido la vegetación natural durante el período 1991-2011. La tasa de cambio anual fue negativa en usos de suelo bajo Pa, Bs, Ca, y positivas en uso de suelo bajo Cu y Pz. Se destaca la metodología de Pontius *et al.*, (2004), que contribuyó a entender el intercambio y las transiciones sistemáticas de las seis categorías estudiadas. Los resultados demuestran que las transiciones características en términos de pérdidas se dan cuando el Pa pierde cobertura y es remplazado por Cu, si el Bs pierde cobertura, es remplazado por el Pz, y si el Hm pierde cobertura, es remplazando por los Cu y Pz. Estos resultados demuestran que la ampliación de la frontera agrícola debido a los Cu en escenarios que apenas hace veinte años correspondían a ecosistemas endémicos (bosques, páramos y humedales) ha llevado a la disminución de su cobertura. Los resultados de este trabajo son de utilidad para futuros planes de ordenamiento territorial y la búsqueda de estrategias para la conservación de los recursos naturales de la microcuenca del río Jubal perteneciente al Parque Nacional Sangay.

La metodología utilizada puede aplicarse a todas las zonas con características similares a nuestra área de estudio por su alto grado de confiabilidad, permitiendo la planificación acertadas de autoridades ante los cambios de uso de suelo.

Agradecimiento

A Dios, que sin tu infinita fe nunca hubiera llegado tan lejos, a mi familia que siempre confió en mí, en especial a mi padre Ángel Napoleón, mi madre Sofía y mi hermano Paulo Cesar, por darme tanto amor y un buen ejemplo de que con perseverancia y constancia se puede lograr todo absolutamente todo. A mis amigos en especial a ti María Fernanda S. por demostrarme que las cosas buenas en la vida toman su tiempo y que para ser el mejor, ahí que estar con los mejores. Y a todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto, ustedes saben quiénes son por todo esto les agradezco de todo corazón de que estén conmigo.

Al Dr. Jose Antonio Delgado de la Mata, por su permanente apoyo y guía en los estudios de Master y en el presente trabajo.

Al Vicerrectorado de Postgrado e Investigación de la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH) por el financiamiento de esta investigación a través del proyecto “Caracterización biogeográfica de la subcuentas hídrica para la adaptación al cambio climático considerando el paisaje cultural andino en la parroquia Achupallas, Cantón Alausí, Provincia de Chimborazo”.

Bibliografía

- Armas M, Vanacker V, 2013. Forest cover change trajectories and their impact on landslide occurrence in the tropical Andes. *Environmental Earth Sciences*, 70(13), 2941-2952. doi:10.1007 / s12665-013-2352-9.
- Armenteras D, Rodríguez N, Retana J, Morales M, 2011. Understanding deforestation in montane and lowland forests of the Colombian Andes. *Regional Environmental Change*, 11(3), 693-705. doi:10.1007 / s10113-010-0200-y.
- Ayala-Izurieta JE, Márquez CO, García VJ, Recalde-Moreno CG, Rodríguez-Llerena MV, Damian-Carrion DA, 2017. Land Cover Classification in an Ecuadorian Mountain Geosystem Using a Random Forest Classifier, Spectral Vegetation Indices, and Ancillary Geographic Data. *Geosciences*, 7(2), 34. doi:10.3390 / geosciences7020034.
- Baicha W, 2016. Land Use Dynamics and Land Cover Structure Change in Thailand (As Exemplified by Mountainous Nan Province). *Geography and Natural Resources*, 37(1), 87-92. doi:10.1134/S1875372816010121.
- Beltrán K, Salgado S, Cuesta F, León-Yáñez S, Romoleroux K, Ortiz E, Velástegui A, 2009. Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador. Quito, Ecuador: EcoCiencia, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA.
- FAO, 2014. *OPEN FORIS*. Recuperado el 15 de febrero de 2014, de <http://www.fao.org/forestry/fma/openforis/en/>
- Feng Min, Chengquan H, Saurabh C, Vermote EF, Masek JG, Townshend JR, 2012. Quality Assessment of Landsat Surface Reflectance Products Using MODIS Data. *Computers & Geosciences*, 38(1), 9–22.
- GDAL, 2014. <http://www.gdal.org/>. Recuperado el 20 de febrero de 2017, de <http://www.gdal.org/>
- Kintz DB, Young KR, Crews-Meyer KA, 2016. Implications of Land Use/Land Cover Change in the Buffer Zone of a National Park in the Tropical Andes. *Environmental Management*, 38(2), 238-252. doi:10.1007 / s00267-005-0147-9.
- MAE, 2012. Ecosistemas REGIÓN ANDES. Sistema de clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Ministerio del Ambiente del Ecuador. Quito: Ministerio del ambiente.
- Masek JG, Vermote EF, Saleous N, Wolfe R, Hall FG, Huemmrich F, Lim TK, 2006. A Landsat Surface Reflectance Dataset for North America, 1990–2000. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1), 68-72.
- Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center; 2012. *LEDAPS Landsat Calibration, Reflectance, Atmospheric Correction Preprocessing Code. Model Product*. (O. Ridge, Editor) Recuperado el 13 de Abril de 2014, de <http://daac.ornl.gov//MODELS/guides/LEDAPS.html>

- Osuna-Osuna AK, Díaz-Torres JD, De Anda-Sánchez J, Villegas-García E, Gallardo-Valdez J, Davila-Vazquez G, 2015. Assessment of land use and land cover change in Tecolutla River Basin, Veracruz, Mexico; during the period 1994-2010. *Revista Ambiente & Agua*, 10(2), 350. doi:10.4136/ambi-agua.1539.
- Perea AJ, Meroño JE, Aguilera MJ, 2009. Algorithms of Expert Classification Applied in Quickbird Satellite Images for Land Use Mapping. *Chilean journal of agricultural research*, 69(3), 400-405.
- Perea AJ, Meroño JE, Aguilera MJ, 2009. Application of Numenta® Hierarchical Temporal Memory for land-use classification. *South African Journal of Science*, 105(9-10), 370-375.
- Pontius RG, Shusas E, McEachern M, 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture. Ecosystems & Environment*, 101(2), 251-268. doi:10.1016/j.agee.2003.09.008.
- Puyravaud JP, 2003. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1), 593-596. doi:10.1016/S0378-1127(02)00335-3.
- Rahman M, Saha S, 2009. Spatial dynamics of cropland and cropping pattern change analysis using landsat TM and IRS P6 LISS III satellite images with GIS. *Geospatial Information Science*, 12(2), 123-134. doi:10.1007 / s11806-009-0249-2.
- Rodríguez N, Armenteras D, Retana J, 2013. Effectiveness of protected areas in the Colombian Andes: deforestation, fire and land-use changes. *Reg Environ Change*, 13(2), 423-435. doi:10.1007 / s10113-012-0356-8.
- Sidhu N, Rishi M, Singh R, 2016. Spatio-Temporal Study of the Distribution of Land Use and Land Cover Change Pattern in Chandigarh, India Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment*, 785-789. doi:10.1007 / 978-3-319-18663-4_121.
- USGS, 2015. Science For a Changing World. Obtenido de <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Valencia Rojas MP, Figueroa Casas A, 2015. Vulnerabilidad de humedales altoandinos ante procesos de cambio: tendencias del análisis. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26), 29-42.
- Vanacker V, Govers G, Barros S, Poesen J, Deckers J, 2003. The effect of short-term socio-economic and demographic change on landuse dynamics and its corresponding geomorphic response with relation to water erosion in a tropical mountainous catchment, Ecuador. *Landscape Ecology*, 18, 1-15. doi:10.1023/A:1022902914221.
- Yáñez P, Núñez M, Carrera F, Martínez C, 2011. Posibles efectos del cambio climático global en zonas silvestres protegidas de la zona andina de Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 14(2). doi:<http://dx.doi.org/10.17163/lgr.n%25x>.
- Zhu Z, Liu L, Chen Z, Zhang J, Verburg P, 2010. Land-use change simulation and assessment of driving factors in the loess hilly region—a case study as Pengyang

County. Environmental Monitoring and Assessment, 164(1), 133-142.
doi:10.1007 / s10661-009-0880-2.