



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES**

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ARTÍCULO CIENTÍFICO

**EFFECTOS DE LOS CAMBIOS DEL PAISAJE EN LA SUSCEPTIBILIDAD A
DESLIZAMIENTOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO AMBI PROVINCIA DE
IMBABURA**

AUTOR:

Juan Luis Guerra Morales

DIRECTOR:

Ing. Paúl Arias, MSc.

ASESORES:

Ing. Oscar Rosales, MSc.

Ing. Lucía Vásquez, MSc.

Ibarra – Ecuador

2021

HOJA DE VIDA DEL INVESTIGADOR

APELLIDOS: Guerra Morales

NOMBRES: Juan Luis

C. CIUDADANÍA: 1002935011

EDAD: 27

NACIONALIDAD: Ecuatoriana

ESTADO CIVIL: Soltero

TELÉFONO CONVENCIONAL: 062-615-903

TELÉFONO CELULAR: 0989341192

CORREO ELECTRÓNICO: jlguerram@utm.edu.ec

DIRECCIÓN: Ibarra, La Victoria

Provincia: Imbabura

Cantón: Ibarra

Parroquia: El sagrario

Año: 2021

EFFECTOS DE LOS CAMBIOS DEL PAISAJE EN LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO AMBI PROVINCIA DE IMBABURA

Juan Guerra¹, Paúl Arias²
Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales
Ingeniería en Recursos Naturales Renovables
E-mail: jlguerram@utn.edu.ec

RESUMEN

Los humanos han transformado gran parte de la superficie del planeta en los últimos 300 años. La tala de bosques, las prácticas agrícolas de subsistencia, la intensificación de la producción agrícola y la expansión de los centros urbanos han cambiado drásticamente el paisaje. En la subcuenca del río Ambi se puede apreciar cada una de estas actividades que se han llevado con el transcurso de los años aumentando así el nivel agrícola y la presión demográfica. Es por ello que el presente estudio permitió conocer la evaluación de la variación de la cobertura vegetal de la subcuenca del río Ambi en el periodo 1996-2017, aplicando un análisis multitemporal con el uso de imágenes satelitales Landsat del portal USGS (United States Geological Survey) empleando softwares científicos para la elaboración de cartografía digital como ArcGIS 10.6. La subcuenca del río Ambi posee un gran potencial hídrico, en el que se valoran sitios hidrológicos de relevancia como son Lago San Pablo, Cascada Peguche, Laguna Cuicocha y Laguna Yahuarcocha. Además, se evaluó la susceptibilidad a deslizamientos con la función de creencia evidencial que se encargó de ponderar la relación espacial entre la ocurrencia de deslizamientos de tierra y 10 factores espaciales (ángulo de pendiente, distancia a la falla geológica, distancia a la red hídrica, rugosidad del suelo, índice de vegetación de diferencia normalizada, aspecto de la pendiente, curvatura, litología, elevación y uso del suelo de los años 1996 y 2017. Finalmente se analizó la relación entre pérdida de cobertura vegetal con la susceptibilidad a deslizamientos, mediante el coeficiente de correlación de Spearman. Los resultados muestran que la zona de alta susceptibilidad a deslizamiento tiene un área 6 243.76 ha del área de estudio. Esta categoría está distribuida principalmente en las faldas del volcán Imbabura y Cotacachi. También se puede evidenciar esta categoría en las parroquias de San Blas, Imantag, Angochahua y Plaza Gutierrez. Los factores que influyen para que la susceptibilidad sea alta son: pendientes que pueden llegar a ser >70%, cercanía a los ríos y la cobertura siendo en su mayor parte zonas de cultivo, pastizales y área sin vegetación.

Palabras claves: conservación, deslizamientos, fragmentación, paisaje, presión demográfica, susceptibilidad.

ABSTRACT

Humans have transformed much of the planet's surface over the past 300 years. Forest logging, subsistence agricultural practices, intensified agricultural production and the expansion of urban centers have drastically changed the landscape. In the sub-area of the Ambi River you can see each of these activities that have been carried out over the years, increasing the agricultural level and demographic pressure. That is why this study made it possible to know the assessment of the variation in plant cover of the Ambi River sub-area in the period 1996-2017, applying a multi-temporal analysis with the use of Landsat satellite images from the

USGS (United States Geological Survey) portal using scientific software for the development of digital mapping such as ArcGIS 10.6. The sub-area of the Ambi River has great water potential, in which important hydrological sites are valued such as Lago San Pablo, Cascada Peguche, Laguna Cuicocha and Laguna Yahuarcocha. Also, it evaluated the susceptibility to slides with the belief function evidential that was in charge of considering the spatial relation between the occurrence of landslides and 10 spatial factors. (slope angle, distance to geological fault, distance to water network, roughness of the soil, vegetation index of normalized difference, slope appearance, curvature, lithology, elevation and land use of the years 1996 and 2017. Finally, the relationship between loss of plant cover and susceptibility to slippage was analyzed, using Spearman's correlation coefficient. The results show that the area of high slip susceptibility has an area 6 243.76 ha of the study area. This category is distributed principally in the skirts of the volcano Imbabura and Cotacachi. Also it is possible to demonstrate this category in the parishes of San Blas, Imantag, Angochahua and Square Gutierrez. The factors that influence to make susceptibility high are: slopes that can become >70%, proximity to rivers and coverage being for the most part areas of cultivation, grasslands and area without vegetation.

Keywords: conservation, demographic pressure, fragmentation, landscape, landslides, susceptibility.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la contaminación, la fragmentación y la destrucción de los recursos naturales se presentan como una preocupación en la sociedad. Acciones como la ejecución y desarrollo de áreas protegidas son algunas formas de ratificar la estabilidad y continuidad biológica y ecológica (Cristeche y Penna, 2008).

Skokanová, y Eremiášová, en el año de 2013 mencionan al paisaje como una configuración topográfica con un patrón de cobertura y de uso de la tierra, que delimita procesos naturales y actividades humanas de manera coherente. El paisaje es heterogéneo compuesto por un conjunto de ecosistemas, los mismos interactúan y se repiten en forma similar en el área que son los encargados de determinar (Aguilera, Valenzuela y Botequilha, 2011).

La pérdida de hábitat y la fragmentación se consideran las principales amenazas que afectan a la diversidad biológica (Torres, 2016; Jost y González, 2012; Luna, Castaño y Raz, 2011). La fragmentación es un proceso continuo y dinámico, cuyos efectos en la estructura del paisaje pueden describirse mediante índices como el porcentaje de hábitat natural, número de fragmentos entre otros. La fragmentación del hábitat se refiere cuando un área continua de hábitat es fraccionada en dos o más fragmentos comprimiéndose su área. Estos fragmentos son separados entre sí por un paisaje altamente modificado. La fragmentación también se da cuando el área del hábitat no es muy afectada como el caso de que el hábitat original es dividido por caminos, carreteras, vías férreas, canales, líneas de energía, cercas u otras barreras al flujo de las especies (García, 2011; Cotler, Cram, Trinidad y Bunge, 2015).

La subcuenca del río Ambi se caracteriza por poseer un paisaje cambiante, dinámico y presentar variaciones a lo largo de tiempo. Skokanová, y Eremiášová (2013), sostienen que la ecología del paisaje consiste en el estudio de la estructura, función y cambio del paisaje, área de terreno heterogéneo que contiene ecosistemas que interactúan entre sí.

Esta subcuenca cubre un área de 11 529.60 hectáreas extensión y está conformada por los Cantones: San Miguel de Urcuquí, Antonio Ante, Cotacachi, Otavalo, e Ibarra en donde la creciente poblacional y sus actividades ha aumentado el deterioro de los recursos naturales haciendo que estos se vean afectados directamente.

La subcuenca del río Ambi se conoce como una ecorregión que ofrece múltiples servicios ambientales, resaltando la oferta hídrica, su diversidad ecosistémica y biológica que se encuentra amenazada debido a diferentes procesos de degradación antrópica y a la fragmentación de sus bosques (Carmona, Aravena, Bustamante, Celis, Charrier, Díaz y Hernández, 2010). La subcuenca del río Ambi ha experimentado procesos intensos de modificaciones y alteraciones consecuencia de la dinámica de cambios de usos del suelo. Dichos cambios, impulsados por actividades antrópicas, socioeconómicas y naturales se han reflejado en la transformación del paisaje, en el que las modificaciones del uso del suelo son más evidentes (Carmona, Aravena, Bustamante, Celis, Charrier, Díaz y Hernández, 2010).

Las actividades antrópicas, el aumento del nivel agrícola y la presión demográfica dentro de los sectores de la subcuenca del río Ambi han generado un fuerte declive a los sistemas biológicos de soportar y satisfacer las necesidades humanas (Schramski, Gattie y Brown, 2015). El cerro Imbabura es claro ejemplo de los efectos de actividades antrópicas que han producido alteración de la cobertura vegetal herbácea por causa de incendios y pérdida de los relictos de bosque nativo por desarrollo de la frontera agrícola, siendo de vital importancia la cobertura vegetal existente permite el almacenamiento de agua que abastecen a las poblaciones bajas del cantón Ibarra. (Cristeche y Penna, 2008).

Esta investigación realizará un análisis de los efectos de los cambios del paisaje en la susceptibilidad a deslizamientos en la subcuenca del río Ambi mediante el uso de tecnologías de Información Geográfica, que generará información destacada sobre los procesos ecológicos relacionados a la evolución del paisaje, que permitirá abordar las causas de fragmentación evaluando sus etapas, los patrones de asentamiento humano y uso de la tierra que los determinan, las relaciones entre la transformación de los paisajes, y la evolución en la conectividad, tanto estructural como funcional, entre otros (Forman, 2014; Leal, 2011; González, Ochoa, Pozo, Gordon, Rangel, Arriaga y Kampichler, 2011; Armenteras y Vargas, 2016; Valdés, 2011; Song, Liu, Wang, Zhang, Jin, Li y Liu, 2008). Aportará información cartográfica multitemporal del uso del suelo que permitirá conocer los impactos que se han generado tanto para la diversidad ecosistémica y biológica en los años 1993, 2001, 2008, 2016.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la subcuenca del río Ambi, localizado al Norte del Ecuador en la provincia de Imbabura. Altitudinalmente corresponde a los valles entre 1800 y 4000 metros sobre el nivel del mar aproximadamente (Figura 1).

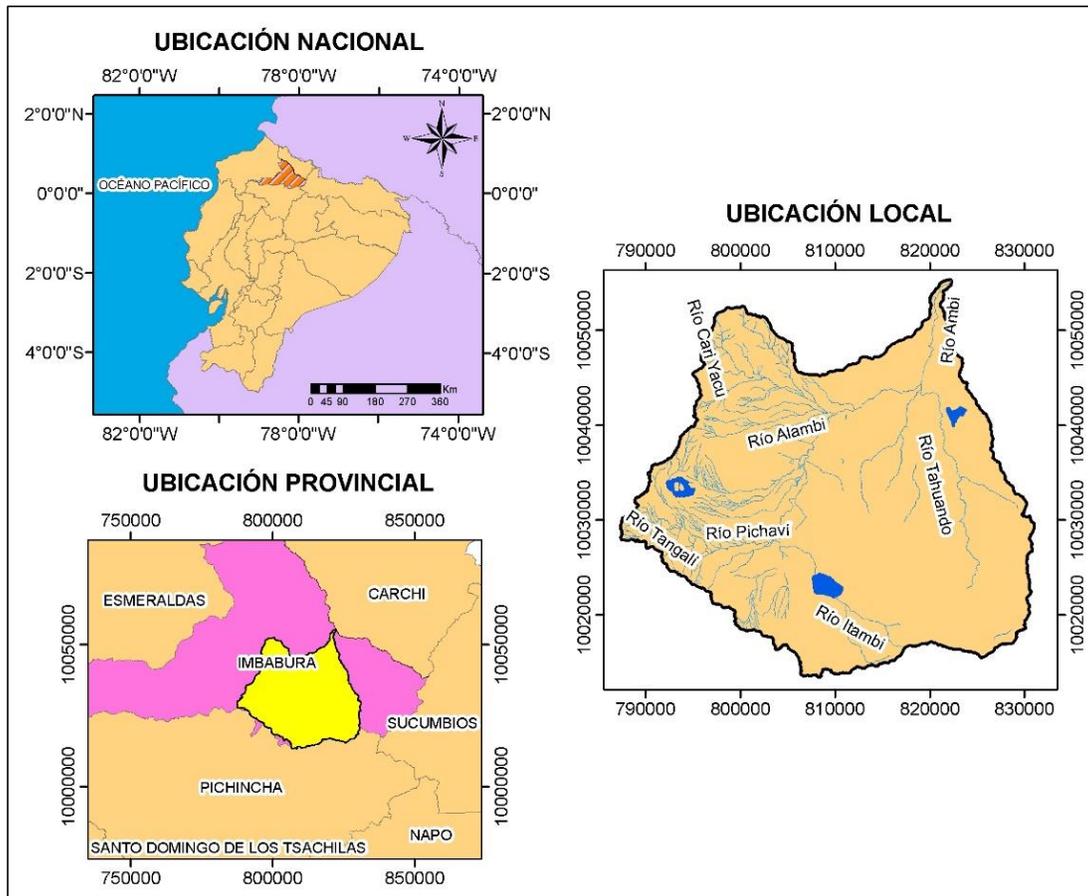


Figura 1. Mapa de Ubicación de la Subcuenca del río Ambi.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación se adquirió imágenes de los satélites Landsat y Aster de los años 1996, 2007 y 2017. Adicionalmente, se utilizó el navegador GPS, cámara fotográfica, computador, el software ArcGIS 10.6 y la cartografía temática disponible en el Sistema Nacional de Información (SIN).

Búsqueda de imágenes de diferentes años en el servidor Earth Explorer del USGS

Se descargó imágenes a partir del satélite de la tierra, destacado como LANDSAT, procedentes de los sensores: ETM, y OLI para los años: 1996, 2007 y 2017, que se obtuvo de la página de la NASA proporcionadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS.

Tratamiento digital de imágenes

Se realizó un pre-tratamiento y un tratamiento de las imágenes satelitales usando el software ARCGIS con licencia temporal. Se trabajó con esta herramienta para realizar correcciones radiométricas, atmosféricas y geométricas.

El realce radiométrico optimizó la imagen para reducir efectos atmosféricos como la nubosidad. La corrección geométrica permitió la proyección de la imagen satelital desde la zona 17 Norte hacia la zona 17 Sur en el sistema WGS 1984 UTM Zona 17S. La corrección atmosférica permitió la corrección del relieve y el descarte de las sombras de nubes en las imágenes, se aplicó una corrección atmosférica, con la herramienta DOS (Dark Object Subtraction). Optimizar la imagen para reducir efectos atmosféricos como la nubosidad es recomendable realizar la corrección atmosférica a la imagen Landsat entera.

Clasificación multitemporal de imágenes

Se aplicó una clasificación supervisada en las imágenes mediante la definición de firmas espectrales formando conjunto o grupo de píxeles con características similares para identificar las categorías y análisis visual. Se clasificó en nueve categorías: bosque, vegetación arbustiva, cuerpos de agua, cultivos, páramo, pastos, zona agrícola, zona urbana y área sin vegetación. Para finalizar se calculó los cambios, intercambios y transiciones ocurridos en el periodo de tiempo mediante el uso de la matriz de transición en un entorno de sistemas de información geográfica (SIG).

Validación de la clasificación de las imágenes

La confirmación de los resultados de clasificación de imágenes se realizó aplicando la técnica de matriz de confusión o de error, que evalúa la exactitud de la clasificación multitemporal. (Rodríguez, 2011) Igualmente se calculó el índice Kappa (López, 2014) para determinar el grado de significancia entre los datos obtenidos en la clasificación supervisada y los datos levantados en campo (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de confusión para la validación de la imagen LANDSAT L8-OLI del 2017 obtenida en ArcMap.

Matriz de confusión		Objetivo			
		Positivo	Negativo		
Modelo	Positivo	a	b	Valor predictivo positivo	$a/(a+b)$
	Negativo	c	d	Valor predictivo negativo	$d/(c+d)$
		Sensibilidad $a/(a+c)$	Especificidad $d/(b+d)$	Accuracy = $(a+d)/(a+b+c+d)$	

Determinación de la Susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Ambi

Para establecer las variables a interponerse, se consideró los eventos auténticos ocurridos históricamente, criterios técnicos de veracidad, zonas de estudios y la disponibilidad de datos.

Análisis de variables y relaciones

El desarrollo de Desinventar permite ver a los desastres desde una escala espacial local, facilita diálogos para gestión de riesgos entre actores e instituciones y sectores, y con gobiernos provinciales y nacionales. Se recolectó información y registros de eventos de deslizamientos de tierra desde el período 1996 - 2017 partir de análisis de información histórica (Guzzetti, Ardizzone, Cardinali, Rossi y Valigi, 2009).

Entre las variables independientes se consideró el factor pendiente y se realizó a partir de un modelo digital de elevación (SRTM 30m) perteneciente al área de estudio de la subcuenca en formato raster. Mediante la herramienta Slope se calculó la pendiente de cada celda del raster digital de elevación (Vargas, 2009) (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de pendientes en el terreno

Relieve	Pendiente-Rango	Clase
Plano	0-5%	1
Ligeramente Ondulado	5-12%	2
Ondulado	12-25%	3
Montañoso	25-50%	4
Muy Montañoso	50-70%	5
Escarpado	>70%	6

Fuente: Vargas, 2009

La litología a través del Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) se obtuvo el shape de geología a escala 1:25 000 del Ecuador. La erosión del suelo depende de la perspectiva topográfica, la pendiente del terreno o factores antrópicos y las propiedades del suelo.

Para el factor de **rugosidad** se estableció la ondulación de la superficie topográfica y es una derivada de las pendientes y de las orientaciones. El agua tiende a escurrirse rápidamente desde pendientes suaves y regulares. Sin embargo, si una pendiente es irregular, rugosa y con cambios en su micro topografía, el movimiento del agua se ve obstaculizado. Parte de ella se detiene temporalmente, la tasa de infiltración aumenta y la escorrentía se ralentiza (Arnáez, Ortigosa, Flaño y Martínez, 2012).

El aspecto de la pendiente se realizó mediante la herramienta Aspect de Spatial Analyst Tools se identificó la dirección de la brújula que enfrenta la pendiente cuesta abajo para cada ubicación.

La elevación no es un predictor de deslizamientos de tierra, pero fundamentalmente en estudios a pequeña escala incorpora el efecto de dependencia implícita de caminos y desarrollo residencial (o actividades humanas) (Sabatakakis, Koukis, Vassiliades y Lainas, 2012).

La curvatura se estableció tres categorías de formas de curvatura: cóncava, convexa, y plana. Las formas convexas son más sólidas que las formas cóncavas porque estas tienden a erosionarse menos en sus secciones superiores, pero a erosionarse rápidamente en sus secciones inferiores. Sin embargo, las pendientes cóncavas tienden a erosionarse en sus secciones superiores más empinadas donde la escorrentía se mueve rápidamente (Arnáez, Ortigosa, Flaño y Martínez, 2012).

El índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) se calculó por la diferencia entre el valor de reflectancia en el rango infrarrojo y rojo, dividido por la suma entre el valor de reflectancia en el rango infrarrojo y rojo (Ecuación 1). Se determinó el índice de densidad de vegetación con valores que fluctúan entre -1 y 1. Es de hacer notar que en este análisis se trabajó con el NDVI normalizado inverso, de esta manera, los valores bajos representarían alta cobertura vegetal mientras que los valores altos una baja cobertura.

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde

NDVI = Valor del índice de vegetación de diferencia normalizada

IVP = Valor de reflectancia en el rango infrarrojo

V = Valor de reflectancia en el rango rojo

La cobertura vegetal obtenida para el año 2017 permitió relacionar la influencia de la vegetación ante la protección de suelo para el origen a deslizamientos.

Se consideró variables como **distancia a la red hídrica y distancia a fallas geológicas** de acuerdo a su proximidad, de esta forma, se determinó que mientras más cercano se encuentra un punto a estas variables, su probabilidad de ocurrencia a un deslizamiento es mayor.

Análisis del modelo de frecuencias bivariada modificada

El modelo estadístico bivariado consistió en la idea de comparar un mapa de inventario de deslizamiento con mapas de parámetros que influyen en deslizamientos de tierra para determinar la clase correspondiente según su papel en la ocurrencia de deslizamientos de tierra (Yilmaz, 2009). Mediante el software ArcGIS se procedió a reclasificar los mapas temáticos (factores predictores) y se tabuló el área de datos de entrenamiento de deslizamientos mediante la herramienta Tabulate Área (Spatial Analyst) para cada factor predictor. Los resultados de evidencia se lograron mediante la proporción de ocurrencia de deslizamiento y la proporción de áreas de deslizamientos (Ecuación 2).

$$\lambda(Tp)E_{ij} = \frac{[N(L \cap E_{ij})/N(L)]}{[N(E_{ij}) - (L \cap E_{ij}) / (N(A) - N(L)]} = \frac{N}{D} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$N(L \cap E_{ij})$ = Cantidad de píxeles de deslizamientos de tierra en el dominio

$N(L)$ = Número total de deslizamientos de tierra o $\sum N(L \cap E_{ij})$

$N(E_{ij})$ = Número de píxeles en el dominio

$N(A)$ = Número total de píxeles en el dominio o $\sum N(E_{ij})$

N = Proporción de ocurrencia de deslizamiento.

D = Proporción de áreas de deslizamiento.

Radio de frecuencia (FR)

El método FR se basó en las relaciones entre la distribución de sitios de ocurrencia de deslizamientos de tierra y cada uno de los factores que intervinieron en estos para revelar la correlación entre ellos (Viloria, Viloria, Pineda y Valera, 2016). (Ecuación 3) y (Ecuación 4). Los valores de FR mayores que 1 indican la gran proporción de deslizamientos de tierra en el área y una alta correlación. Por el contrario, los valores de FR más pequeños que 1 muestran una correlación débil (Akgun, Dag y Bulut, 2008). La siguiente ecuación permitió los resultados de FR:

$$FR = \frac{\% \text{ ocurrencia objetiva en cada subcategoría}}{\% \text{ categoría de un factor independiente}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$FR = \frac{\frac{\text{puntos en factor clases}}{\text{total puntos}}}{\frac{\text{área de clase de factor}}{\text{total área}}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Para considerar las interrelaciones mutuas entre los factores independientes (Ecuación 5) y (Ecuación 6):

$$PR = \frac{(RF_{\text{Max}} - RF_{\text{Min}})}{(RF_{\text{Max}} - RF_{\text{Min}})} \text{Min} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$SI = \frac{\sum (RF \times PR)}{\text{Max} (RF \times PR)} (100) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Área bajo la curva ROC (AUC)

Los valores del área bajo la curva (AUC) de éxito indicaron la habilidad del modelo para distinguir entre zonas susceptibles y no susceptibles a movimientos en masa. La sensibilidad representó la proporción de casos positivos predichos correctamente. Sin embargo, el error negativo es la relación entre los falsos positivos y el total de negativos.

En la aplicación de la curva de ROC se tomaron en cuenta la sensibilidad (número de deslizamientos) y la especificidad (parroquias en donde se presentaron eventos de deslizamientos). Para el cálculo se aplicó (Ecuación 7) y (Ecuación 8). (Amorim, Corominas, Baeza, Portilla, M. y Angulo, 2009).

$$\text{SENSIBILIDAD} = \text{FVP} = \frac{VP}{(VP + FN)5} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$\text{ESPECIFICIDAD} = \text{FVN} = 1 - \text{FFP} = \frac{VN}{N} = \frac{VN}{VN + FP} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

FVP= Fracción de verdaderos positivos

FVN= Fracción de verdaderos negativos

FFP= Fracción de falsos positivos

VP= Verdadero positivo

VN= Verdadero negativo

FP= Falso positivo

FN= Falso negativo

Determinación de la conectividad y cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi

Para representación de la conectividad y cambios del paisaje se determinó 10 paisajes correspondientes a la subcuenca del río Ambi para los períodos de 1996 y 2017. Se clasificaron de acuerdo a las principales microcuencas integradas por los drenajes Menores de la subcuenca del río Ambi, microcuenca del río Machángara, microcuenca del río Jatunyacu, microcuenca del río Chorlaví, microcuenca del río Tahuando, microcuenca del río Alambi, microcuenca del río Blanco, microcuenca del río Pichaví, microcuenca del río Yanayacu y quebrada Yanayacu.

Determinación de las métricas de paisaje para los paisajes establecidos en la subcuenca del río Ambi

Se procedió a ingresar los datos en el programa estadístico Fragstat para el cálculo de las categorías métricas de superficie, área, densidad y viabilidad que correspondió al número de parches (NP) y área media del parche (AMN).

RESULTADOS

Evaluación y validación de la clasificación multitemporal mediante la matriz de contingencia y el índice de Kappa

El índice de Kappa indica que la clasificación supervisada es significativa, ya que el valor es de 0.73 que se clasifica en categoría de considerable (los valores del índice menores a 0,6 se clasifican en categoría moderada), en concordancia entre la predicción del software y el usuario, validando los resultados del análisis multitemporal en los periodos de estudio (Tabla 3 y Tabla 4).

Tabla 3. Matriz de contingencia de clasificación supervisada de la imagen Landsat L8, 2017

CLASE	Datos verdaderos									C.G	Precisión del Producto	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	100	
2	0	5	0	0	0	0	0	0	0	5	100	
3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	100	
4	1	0	1	4	3	2	0	1	0	12	33.333	
5	1	0	0	1	2	1	0	0	0	5	40	
6	0	0	1	0	0	2	0	0	0	3	66.667	
7	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5	100	
8	0	0	0	0	0	0	0	4	0	4	100	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	100	
V.G	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45		
Precisión del Usuario	60	100	60	80	40	40	100	80	1	0	0	
Exactitud General	73.3											
Índice Kappa	0.73										Fuerza de la concordancia	Considerable

Tabla 4. Valoración del coeficiente kappa.

Coefficiente Kappa	Fuerza de la concordancia
0.00	Pobre
0.01 – 0.20	Leve
0.21 – 0.40	Aceptable
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Considerable
0.81 – 1.00	Casi perfecta

Fuente: Landis y Koch, 1977.

Cambios del paisaje para el período 1996 - 2007.

El paisaje más distintivo para el período 1996 a 2007, fue el aumento de cultivos de 24.22% a 36.99% que representó un cambio de 27 251.33 a 41 623.11 hectáreas. La disminución de la cobertura bosque de 13.73% a 10.39%, se observó un cambio de 15 450.6 a 11 694.24 hectáreas. Los páramos y pastos se redujeron por lo que para el año 2007 se estableció

cambios de 20.21% a 16.48% para páramo y 11.89% a 3.42% para pastos, cabe recalcar que los páramos son fundamentales en la conservación del recurso hídrico. La vegetación arbustiva, zona urbana e infraestructura agrícola incrementaron su paisaje en consideraciones poco significativas (Tabla 5).

Tabla 5. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996-2007.

Coberturas	Año 1996		Año 2007	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área sin Vegetación	526.75	0.47	676.42	0.60
Bosque	15 450.6	13.73	11 694.24	10.39
Cuerpos de Agua	1 352.63	1.20	1 332.88	1.18
Cultivos	27 251.33	24.22	41 623.11	36.99
Infraestructura Agrícola	36.90	0.03	53.54	0.05
Páramo	22 741.03	20.21	18 547.71	16.48
Pastos	13 384.45	11.89	3 852.97	3.42
Vegetación Arbustiva	29 722.67	26.41	32 676.41	29.04
Zona Urbana	2 062.96	1.83	2 072.05	1.84
TOTAL	112 529.33	100.00	112 529.33	100.00

En la subcuenca del río Ambi para el periodo 1996-2007, el 77.52 % del territorio permaneció sin cambio alguno, mientras que el 22.48% presentó cambios en el paisaje, de esta forma se estableció la transición del mismo durante el período. El bosque disminuyó en un 6.80%, de este porcentaje se observó que el 3.23% modificó su vegetación de bosque a cultivos, el 2.73% de bosque a pastos y el 0.03% de bosque a zona urbana. La vegetación arbustiva disminuyó en 2.66 %. De este porcentaje el 1.71% se reemplazó por cultivos y generó un declive de la vegetación arbustiva.

Se obtuvo una ganancia de 14.64% de cultivos, de este valor el 3.23% de bosque experimentó un cambio de cobertura a cultivos, el 8.56% se modificó de pastos a cultivos y el 1.71% de vegetación arbustiva cambió a cultivos entre los registros que sobresalen en el estudio. Igualmente los pastos poseen una ganancia del 3.58% de cobertura, de este porcentaje el 2.22% corresponde al cambio de cultivos a pastos (Figura 2 y Tabla 6).

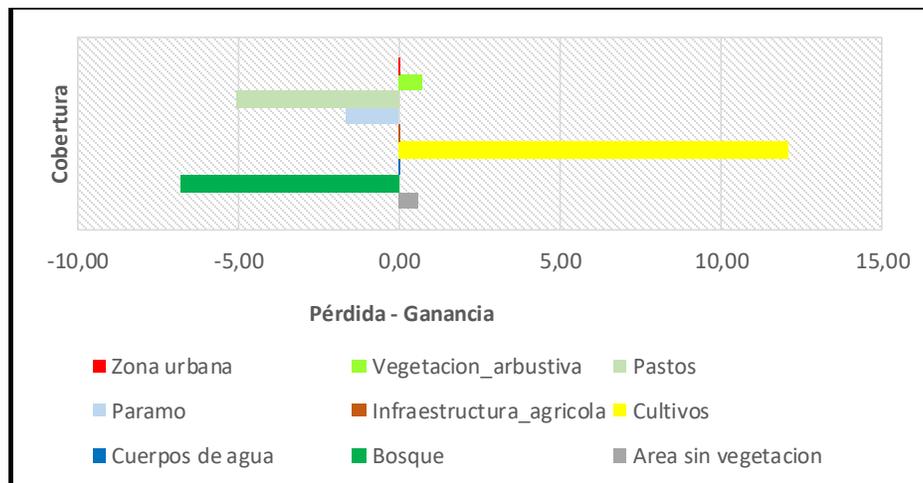


Figura 2. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996-2007.

Tabla 6. Matriz de transición del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996 – 2007.

Cobertura	2007									Total 1996	Pérdida
	ASV	BSQ	CA	CTV	IEA	PM	PST	VA	ZU		
1996											
ASV	0.65	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0.87	0.21
BSQ	0	35.65	0	3.23	0	0	0.79	2.73	0.3	42.46	6.80
CA	0	0	0.27	0	0	0	0	0	0	0.28	0.0029
CTV	0.24	0	0	8.52	0.02	0	2.22	0	0	11.03	2.51
IEA	0	0	0	0	0.09	0	0	0	0	0.09	0
PM	0.01	0	0	0.91	0	15.79	0.05	0.66	0	17.45	1.65
PST	0.06	0	0	8.56	0.006	0	2.46	0	0.005	11.11	8.64
VA	0.44	0	0	1.71	0	0	0.49	13.69	0.001	16.36	2.66
ZU	0	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0.35	0
Total 1996	1.44	35.66	0.27	23.17	0.13	15.80	6.04	17.10	0.39	100	22.48
Ganancia	0.78	0	0	14.64	0.04	0	3.58	3.40	0.04	22.48	

Cambios del paisaje para el período 2007 - 2017.

Los cultivos aumentaron de 41 623.11 a 56 957.45 hectáreas que significó el cambio de 36.99% a 50.62% en el paisaje. Los pastos aumentaron de 3.42% a 13.59% para el año 2017 representando 15 290.74 hectáreas. Por otra parte, el bosque y páramos perdieron paisaje de forma paulatina por lo que para el año 2017 se estableció 9.60% para bosques y 15.28% para páramo. De igual forma, la vegetación arbustiva disminuyó de forma drástica de 32 676.41 a 5 087.44 hectáreas que significó el cambio de 29.04% a 4.52% (Tabla 7).

Tabla 7. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 2007-2017.

Coberturas	Año 2007		Año 2017	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área sin Vegetación	676.42	0.60	2 168.73	1.93
Bosque	11 694.24	10.39	10 797.0	9.60
Cuerpos de Agua	1 332.88	1.18	1 332.88	1.18
Cultivos	41 623.11	36.99	56 957.45	50.62
Infraestructura Agrícola	53.54	0.05	72.45	0.06
Páramo	18 547.71	16.48	17 195.45	15.28
Pastos	3 852.97	3.42	15 290.74	13.59
Vegetación Arbustiva	32 676.41	29.04	5 087.44	4.52
Zona Urbana	2 072.05	1.84	3 626.29	3.22
TOTAL	112 529.33	100.00	112 529.33	100.00

En el periodo 2007 al 2017 en la subcuenca del río Ambi, el 75.99% del territorio se mantuvo sin modificaciones, mientras que el 24.01% representó cambios en el paisaje por lo que se estableció la matriz de transición y se analizó sus cambios.

El bosque disminuyó en 2.37%. El 1.24% de cobertura de bosque cambió a cultivos, el 0.68% a pastos y el 0.44% a vegetación arbustiva. De igual importancia, el 3.95% de cobertura de cultivos se perdió de los cuales el 3.43% se transformó a pastos. Se registró pérdida de vegetación arbustiva en 12.88%, entre este porcentaje el 6.56% de vegetación arbustiva cambio a cultivos y el 5.30% a pastos.

Los cultivos aumentaron en un 11.72%, de este porcentaje el 6.56% de vegetación arbustiva cambió a cultivos, el 3.90% de pastos a cultivos y el 1.24% de bosque a cultivos. De igual manera los pastos poseen una ganancia de 10.30% de paisaje, de este porcentaje el 5.30%

cambió de vegetación arbustiva a pastos, el 3.43% de cultivos a pastos y el 0.87% pertinente a la transformación de páramo a pastos (Figura 3 y Tabla 8).

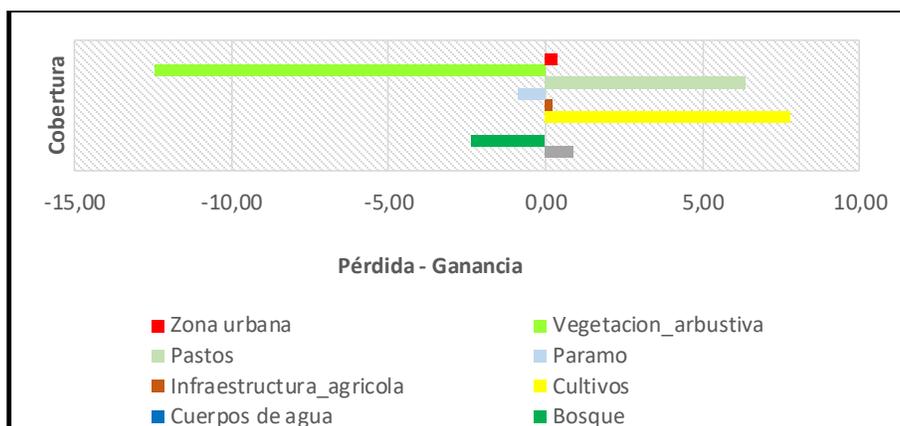


Figura 3. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 2007 – 2017.

Tabla 8. Matriz de transición del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 2007 – 2017.

Cobertura	2017									Total 2007	Pérdida	
	ASV	BSQ	CA	CTV	IEA	PM	PST	VA	ZU			
2007												
ASV	1.41	0	0	0	0	0	0	0	0,02	1,44	0,03	
BSQ	0	33.28	0	1.24	0	0	0.68	0.44	0	35,66	2,37	
CA	0	0	0.27	0	0	0	0	0	0	0,27	0	
CTV	0	0	0	19.22	0.23	0	3.43	0	0,28	23,17	3,95	
IEA	0	0	0	0	0.12	0	0	0	0	0,13	0	
PM	0	0	0	0	0	14.92	0.87	0	0	15,80	0,88	
PST	0	0	0	3.90	0	0	2.12	0	0	6,04	3,92	
VA	0.92	0	0	6.56	0	0	5.30	4.21	0,07	17,10	12,88	
ZU	0	0	0	0	0	0	0	0	0.39	0,39	0	
Total 2007	2,34	33,29	0,27	30,95	0,36	14,92	12,42	4,66	0,79	100	24,01	
Ganancia	0,93	0	0	11,72	0,23	0	10,30	0,44	0,39	24,01		

Cambios del paisaje para el período 1996 - 2017.

Se determinó dos cambios de paisaje de mayor relevancia durante el periodo 1996 al 2017. El bosque de 15 450.6 hectáreas disminuyó en 10 797.0 hectáreas, esto representó el cambio de 13.73% a 9.60% de paisaje. Los cultivos aumentaron del 24.22% al 50.62% y significó 56 957.45 hectáreas para el año 2017. La vegetación arbustiva de 29 722.67 hectáreas disminuyó a 5 087.44 hectáreas y representó el 4.52% para el año 2017. El páramo disminuyó de 20.21% a 15.28% y representó el cambio de 22 741.03 hectáreas a 17 195.45 hectáreas de paisaje para el año 2017. Para zona urbana, cuerpos de agua e infraestructura agrícola alcanzó cambios pocos significativos (Tabla 9).

Tabla 9. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996-2017.

Coberturas	Año 1996		Año 2017	
	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Área sin Vegetación	526.75	0.47	2 168.73	1.93
Bosque	15 450.6	13.73	10 797.0	9.60
Cuerpos de Agua	1 352.63	1.20	1 332.88	1.18
Cultivos	27 251.33	24.22	56 957.45	50.62
Infraestructura Agrícola	36.90	0.03	72.45	0.06
Páramo	22 741.03	20.21	17 195.45	15.28
Pastos	13 384.45	11.89	15 290.74	13.59
Vegetación Arbustiva	29 722.67	26.41	5 087.44	4.52
Zona Urbana	2 062.96	1.83	3 626.29	3.22
TOTAL	112 529.33	100.00	112 529.33	100.00

Durante el periodo 1996-2017, el 64.19 % del territorio de la subcuenca del río Ambi permaneció sin cambios, mientras que el 35.81 % presentó cambios en la cobertura vegetal. El tipo de cobertura de mayor pérdida es el bosque con el 9.17%. De tal manera, se analizó que el 5.11% cambió su vegetación de bosque a cultivos, el 2.58% de bosque a pastos y el 1.42% de bosque a vegetación arbustiva.

La vegetación arbustiva disminuyó 13.48 %. Los cultivos con 7.64% reemplazó a la vegetación arbustiva y provocó un declive del paisaje y el 4.39% de la vegetación arbustiva del año de 1996 cambió a pastos. Del 8.38% de la cobertura de pastos el 8.25% se perdió y significó el aumento de cultivos por competencia de las actividades antrópicas presentes en la subcuenta del río Ambi.

Se obtuvo una ganancia de 21.93% de cultivos, el 5.11% de bosque cambió de paisaje a cultivos, el 8.25% disminuyó de pastos a cultivos y el 7.64% de vegetación arbustiva a cultivos entre los registros de mayor significancia. De igual manera los pastos poseen una ganancia del 9.69% de paisaje, de este porcentaje el 2.58% corresponde al cambio de bosque a pastos, 4.39% de vegetación arbustiva a pastos y el 1.41% referente a la pérdida de páramo a pastos (Figura 4 y Tabla 10).

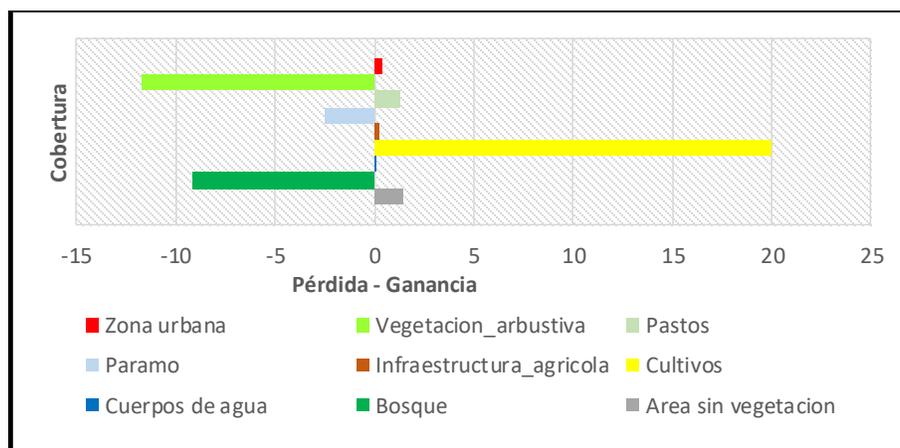


Figura 4. Cambios del paisaje de la subcuenca del río Ambi período 1996 – 2017.

Tabla 10. Matriz de transición de cambio del paisaje período 1996 – 2017.

Cobertura	2017									Total 1996	Pérdida
	ASV	BSQ	CA	CTV	IEA	PM	PST	VA	ZU		
1996											
ASV	0.64	0	0	0.18	0	0	0.02	0	0.01	0.87	0.22
BSQ	0	33.28	0	5.11	0	0	2.58	1.42	0.03	42.46	9.17
CA	0	0	0.27	0	0	0	0	0	0	0.28	0
CTV	0.23	0	0	9.01	0.22	0	1.27	0	0.27	11.03	2.02
IEA	0	0	0	0	0.09	0	0	0	0	0.09	0
PM	0.02	0	0	0.73	0	14.92	1.41	0.35	0	17.45	2.52
PST	0.06	0	0	8.25	0.04	0	2.73	0	0.02	11.11	8.38
VA	1.36	0	0	7.64	0	0	4.39	2.87	0.07	16.36	13.48
ZU	0	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0.35	0
Total 2017	2.34	33.29	0.27	30.95	0.36	14.92	12.42	4.66	0.79	100	35.81
Ganancia	1.70	0	0	21.93	0.27	0	9.69	1.78	0.43	35.81	

Determinación de susceptibilidad a deslizamientos

En la determinación de la susceptibilidad a deslizamiento se obtuvo como resultado modelos cartográficos a cada una de las variables. Los modelos cartográficos correspondieron a ángulo pendientes, distancia a la falla geológica, distancia a la red hidrográfica, rugosidad del suelo, índice de vegetación diferenciada normalizada (NDVI), aspecto de la pendiente, curvatura, litología, elevación y uso del suelo para los años de 1996 y 2017.

Pendientes

En el mapa se estableció que las pendientes entre 25% a 50% denominadas montañoso y 50% a 70% llamado muy montañoso son de alta vulnerabilidad y mayor preponderancia a deslizamientos debido a su alta inclinación en el terreno por lo tanto el riesgo de deslizamiento es de mayor pronunciación, este tipo de pendientes se encontró en las parroquias de San Blas, Imantag, Angochahua, Mariano Acosta, Plaza Gutierrez y Ambuquí. Las pendientes para terrenos planos que van desde 0% a 7.5%, pendientes ligeramente ondulados desde 7.6% a 17.5% y pendientes ondulados desde 17.6% - 30% se establece una baja susceptibilidad a deslizamientos (Figura 5 y Tabla 11).

Tabla 11. Pendientes en el terreno.

Pendiente - Rango	Área (ha)	Porcentaje (%)
0 – 5%	28 484.52	25.31
5 – 12%	21 018.50	18.68
12 – 25%	15 990.00	14.21
25 – 50%	19 299.82	17.15
50 – 70%	18 050.41	16.04
>70%	9 686.60	8.61
Total	112 529.85	100

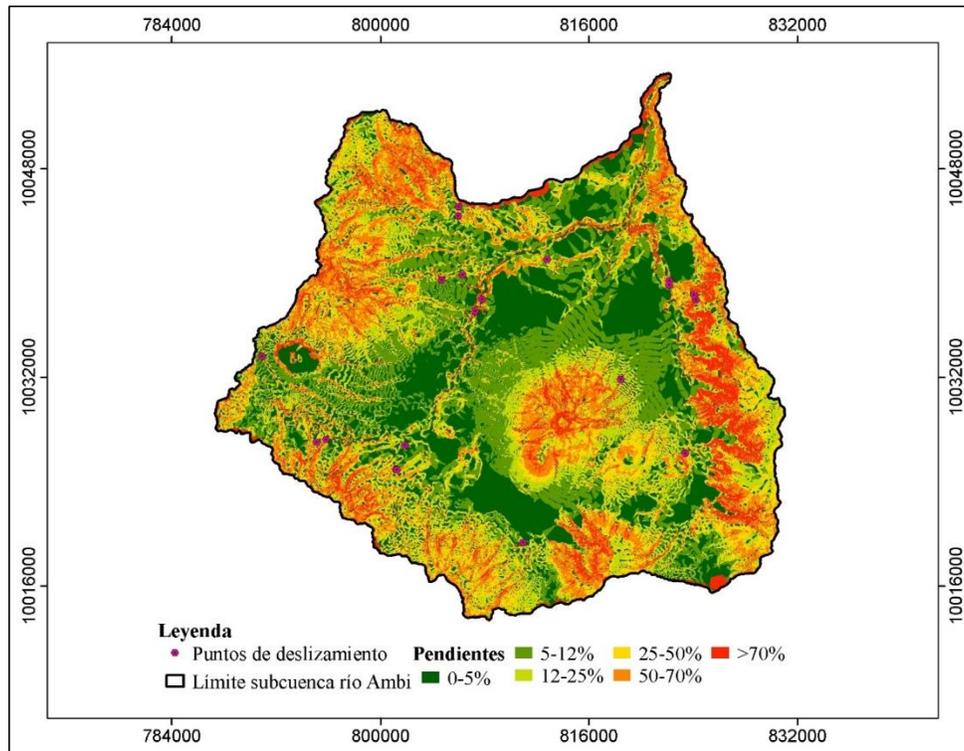


Figura 5. Mapa de pendientes de la subcuenca del río Ambi.

Distancia a falla geológica

En relación al área de estudio se determinó que la distancia a 1 km de la falla geológica se pondera una alta probabilidad a deslizamientos debido a su efecto por la cercanía a eventualidades de sismicidad. Sin embargo, para distancias entre 1 km a 2 km y 2 km a 3 km se considera una probabilidad media a deslizamientos en consideración a la falla geológica. De igual importancia, las distancias mayores a 4 km se consideran de baja susceptibilidad a pesar que existen eventualidades registradas a esta distancia.

Para las parroquias de La Esperanza, San Antonio, San Francisco de Natabuela, Quiroga, Cotacachi, Atuntaqui, Otavalo, San José de Quichinche, San Miguel de Ibarra, Angochahua, Selva Alegre se determinó cercanías a la falla geológica, por lo tanto, debido a su aproximación a la falla geológica se estableció que existe susceptibilidad a deslizamientos en gran magnitud en la subcuenca del río Ambi (Figura 6 y Tabla 12).

Tabla 12. Área de distancia a la falla geológica.

Distancia a la falla geológica	Área (ha)	Porcentaje (%)
>4 000m	25 433.45	22.60
3 000m – 4 000m	17 401.51	15.46
2 000m – 3 000m	22 027.53	19.58
1 000m – 2 000m	23 921.45	21.26
<1 000m	23 741.27	21.10
Total	112 525.21	100

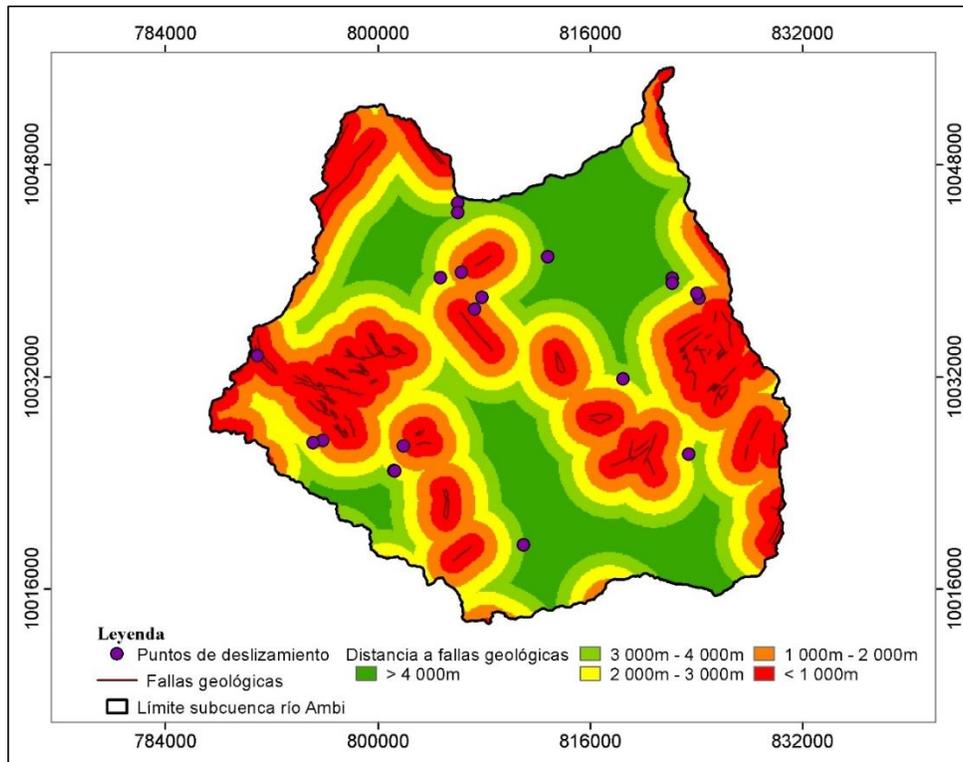


Figura 6. Mapa de distancia a la falla geológica de la subcuenca del río Ambi.

Distancia a la red hídrica

En la determinación de distancias con afinidad a la red hídrica se estableció la susceptibilidad, se destacó que a una distancia de 200 m en relación a la red de drenaje existe una alta probabilidad a deslizamientos debido a los registros establecidos en salidas de campo donde se corroboró su cercanía con la red hídrica. Para distancias de 200 m a 400 m y 400 m a 600 m se estableció una susceptibilidad media a deslizamientos mientras que para distancias de 600 m a 800 m y mayores de 800 m se califica susceptibilidades bajas (Figura 7).

La subcuenca del río Ambi presentó una red de drenaje pronunciada por toda su área, por lo tanto, existe una gran susceptibilidad a deslizamientos mientras más contiguo se encuentre el punto de la red hídrica (Tabla 13).

Tabla 13. Área de distancia a la red hídrica.

Distancia a la red hídrica	Área (ha)	Porcentaje (%)
< 200m	63 088.22	56.09
200m - 400m	28 598.07	25.43
400m - 600m	10 880.35	9.67
600m - 800m	4 233.66	3.76
> 800m	5 679.63	5.05
Total	112 479.93	100

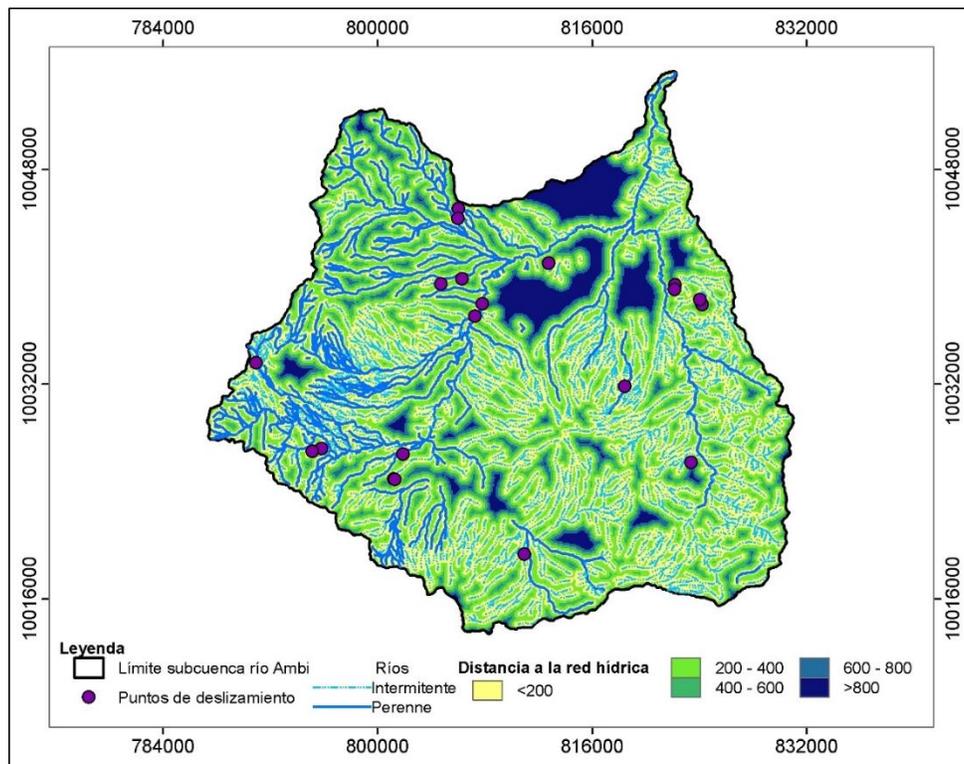


Figura 7. Mapa de distancia a la red hídrica de la subcuenca del río Ambi.

Rugosidad del suelo

Correspondiente a la rugosidad del suelo se determinó que la susceptibilidad a deslizamientos que se encuentra en un rango de 0.55 a 1 corresponde a una alta probabilidad a deslizamientos. Sin embargo, cabe recalcar que valores que van de 0.48 a 0.55 corresponden a susceptibilidad media y valores menores de 0.45 son considerados suelos lisos por lo que su susceptibilidad es baja. Este resultado refleja la relación directa de la rugosidad de la superficie con complejidad del terreno.

Las parroquias de Cotacachi, Atuntaqui, San Juan de Iluman, Angochahua, La Esperanza, Imbaya, San José de Chaltura presentan suelos altamente rugosos. Cuando el suelo es altamente rugoso el agua tiende a escurrirse rápidamente desde pendientes suaves y regulares (Figura 8 y Tabla 14).

Tabla 14. Área de rugosidad del suelo en la subcuenca del río Ambi.

Rugosidad del suelo	Área (ha)	Porcentaje (%)
0.009-0.34	6 484.87	5.80
0.34-0.44	22 557.87	20.17
0.44-0.52	41 158.02	36.81
0.52-0.61	30 482.43	27.26
0.61-0.99	11 137.60	9.96
Total	111 820.79	100

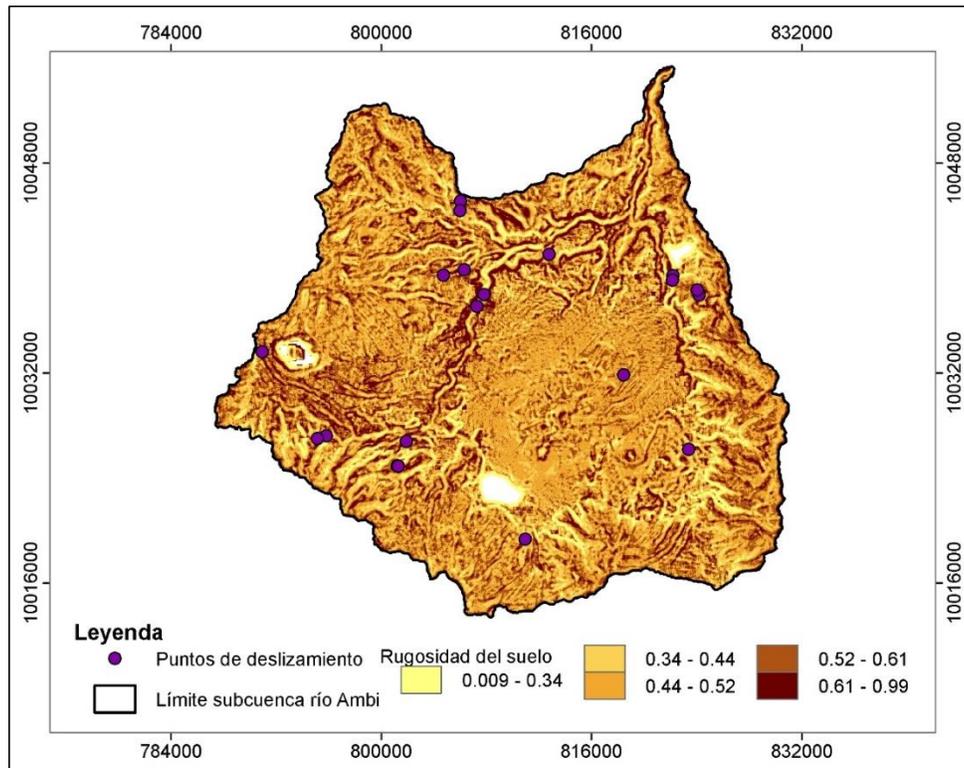


Figura 8. Mapa de rugosidad del suelo de la subcuenca del río Ambi.

Índice de vegetación de diferencia normalizada

El NDVI estimó la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. En el mapa de NDVI se contempló que los valores entre -0.39 hasta 0.16 se encuentran con alta densidad de vegetación por lo que son menos propensos a deslizamientos. Correspondiente a la parroquia de San Antonio, Plaza Gutierrez, Cotacachi, Selva Alegre, San José de Quichinche, San Blas, Imantag se identificó que presentan alta densidad de vegetación. Sin embargo, los valores entre 0.62 y 0.99 presentan escasa densidad de vegetación y se encontró especialmente en zonas urbanas del Cantón Ibarra, Cantón Otavalo, Cantón Cotacachi, Cantón Urcuquí, Cantón Antonio Ante (Figura 9 y Tabla 15).

Tabla 15. Área del NDVI en la subcuenca del río Ambi.

NDVI	Área (ha)	Porcentaje (%)
-0.39-0.16	25 024.25	22.24
0.16-0.32	29 567.29	26.28
0.32-0.47	29 539.91	26.25
0.47-0.62	21 866.16	19.43
0.62-0.99	6 529.01	5.80
Total	112 526.62	100

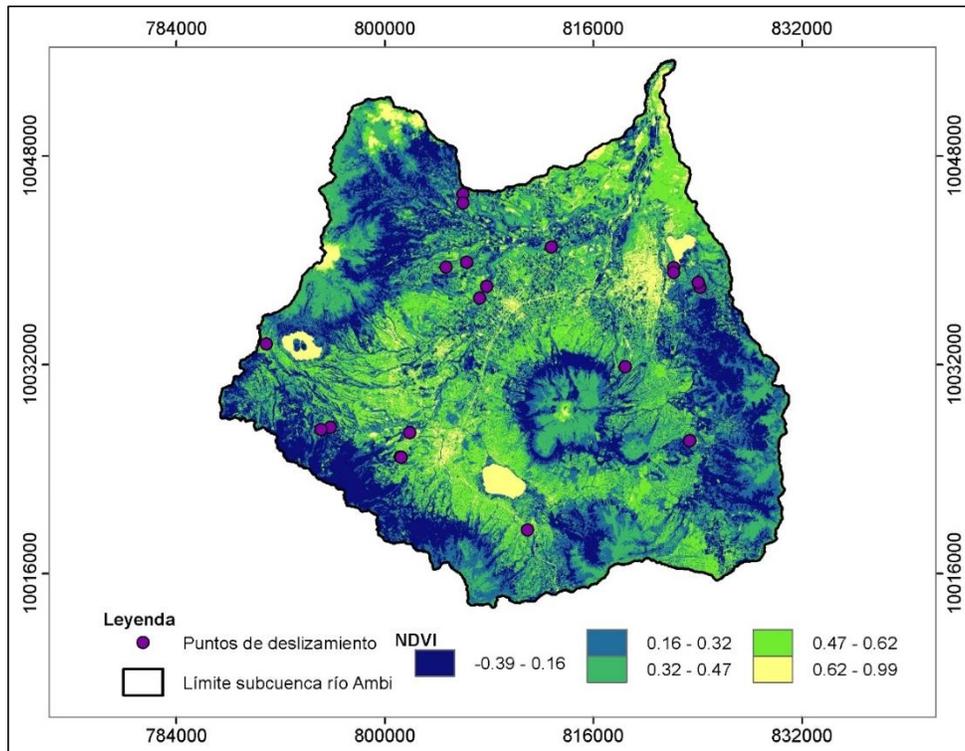


Figura 9. Mapa de NDVI de la subcuenca del río Ambi.

Curvatura

Para el mapa de curvatura se consideró tres categorías denominadas cóncavas, planas y convexas. Se analizó el mapa de curvatura y se identificó en el volcán Imbabura, volcán Cotacachi, San Blas, Gonzales Suarez, Mariano Acosta la presencia de formas cóncavas y convexas (Figura 10 y Tabla 16).

Tabla 16. Área de curvatura en la subcuenca del río Ambi.

Curvatura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Cóncava	11 437.99	10.17
Plana	89 700.48	79.72
Convexa	11 383.16	10.12
Total	112 521.63	100

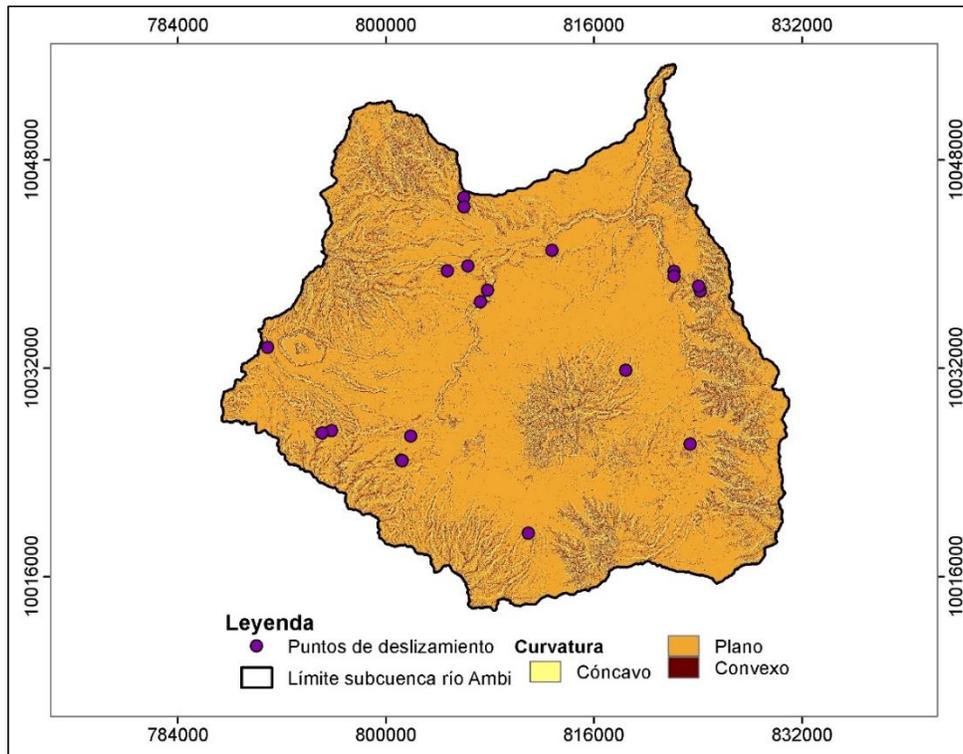


Figura 10. Mapa de curvatura de la subcuena del río Ambi.

Elevación

Para el factor elevación se determinó que los deslizamientos ocurridos en la subcuena del río Ambi se dieron cita entre 2 256.10m a 2 632.38m, esta es la elevación de ocurrencia de eventos. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la elevación no es considerada como un factor predictor, pero a pequeña escala es importante en la dependencia implícita de caminos y desarrollo residencial (Figura 11 y Tabla 17).

Tabla 17. Área de elevación en el terreno de la subcuena del río Ambi.

Elevación del terreno	Área (ha)	Porcentaje (%)
1 515.78m – 2 256.10m	13 297.96	11.82
2 256.10m – 2 632.38m	24 924.45	22.16
2 632.38m – 3 016.97m	30 139.89	26.80
3 016.97m – 3 482.11m	26 882.51	23.90
3 482.11m – 4 866.14m	17 228.68	15.32
Total	112 473.49	100

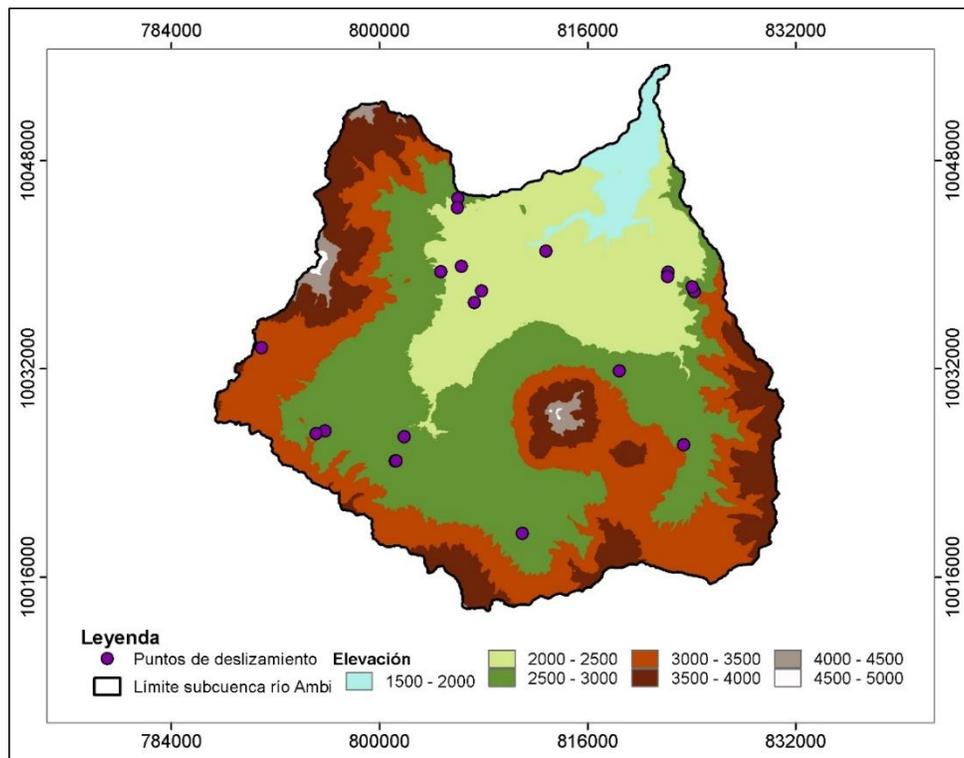


Figura 11. Mapa de elevación de la subcuenca del río Ambi.

Uso del suelo

Las parroquias de San Antonio, San Roque, La Esperanza, Atuntaqui, San Pablo, Urcuquí, San José de Chaltura se evidenciaron en gran magnitud con la presencia de cultivos siendo la cobertura más predominante en la subcuenca (Tabla 18 y Tabla 19).

Tabla 18. Área de uso del suelo de la subcuenca del río Ambi año 1996.

Cobertura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área sin Vegetación	526.75	0.47
Bosque	15 450.60	13.73
Cuerpos de Agua	1 352.63	1.20
Cultivos	27 251.33	24.22
Infraestructura Agrícola	36.90	0.03
Páramo	22 741.03	20.21
Pastos	13 384.45	11.89
Vegetación Arbustiva	29 722.67	26.41
Zona Urbana	2 062.96	1.83
Total	112 529.3	100

Tabla 19. Área de uso del suelo de la subcuenca del río Ambi año 2017.

Cobertura	Área (ha)	Porcentaje (%)
Área sin Vegetación	2 168.73	1.93
Bosque	10 797.90	9.60
Cuerpos de Agua	1 332.88	1.18
Cultivos	56 957.45	50.62
Infraestructura Agrícola	72.45	0.06
Páramo	17 195.45	15.28
Pastos	15 290.74	13.59
Vegetación Arbustiva	5 087.44	4.52
Zona Urbana	3 626.29	3.22
Total	112 529,3	100

Aspecto de la pendiente

En el aspecto de la pendiente o de orientación se consideró como punto de importancia en el inicio de un movimiento de pendiente, debido al espacio afectado por la humedad retenida y la cobertura vegetal, limitado y definido por la consolidación de los suelos (Figura 12).

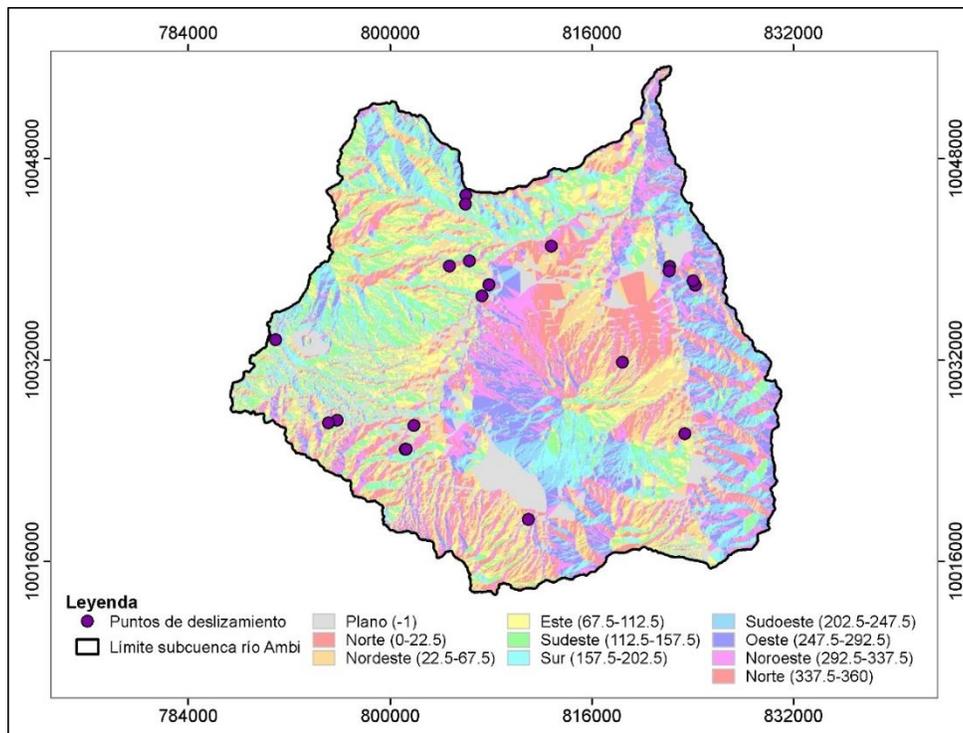


Figura 12. Mapa de aspecto de la pendiente de la subcuenca del río Ambi.

Litología

Las formaciones rocosas muy duras denominadas lavas andesíticas es la formación más dominante en la subcuenca dificultando la erosión por procesos naturales (Figura 13 y Tabla 20).

Tabla 20. Área de la litología de la subcuenca del río Ambi.

Litología	Área (ha)	Porcentaje (%)
Andesitas	25 234.48	22.43
Bloques dacíticos matriz ceniza	1 418.72	1.26
Cenizas y Lapilli	6 359.97	5.65
Conglomerado volcánico	42.67	0.04
Conglomerados	30.30	0.03
Depósitos aluviales	4 083.35	3.63
Depósitos coluviales	1 246.00	1.11
Depósitos coluvio aluviales	1 932.26	1.72
Depósitos fluvio glaciares	825.92	0.73
Depósitos fluvio lacustres	2 413.06	2.14
Depósitos glaciares	950.74	0.84
Formación cangahua	10 322.46	9.17
Lavas andesíticas	31 079.37	27.62
Lavas basálticas	318.05	0.28
Lavas composición andesítica	9 511.36	8.45
No aplicable	7 048.99	6.26
Piroclastos	7 447.66	6.62
Toba volcánica	2 258.34	2.01
Total	112 523.7	100

Correspondiente a la litología, se determinó que las parroquias de La Esperanza, San Antonio, San Pablo, Otavalo, San Francisco de Natabuela, Imbaya, San José de Chaltura, San Juan de Ilumán presentaron lavas andesíticas.

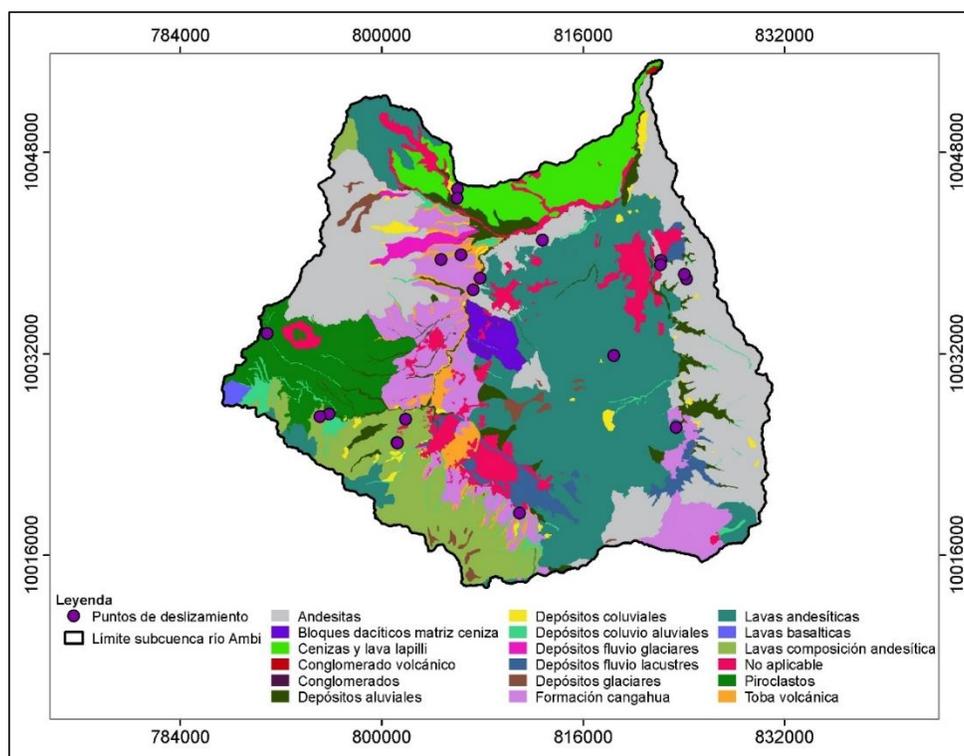


Figura 13. Mapa de litología de la subcuenca del río Ambi.

Análisis de asociación espacial mediante la función de creencia evidencial

Para el ángulo de pendiente se determinó que las ocurrencias de deslizamientos son del 10% en pendientes de 12 a 25% de inclinación, cabe recalcar que estos deslizamientos se registran en vías de comunicación, el 40% de ocurrencia para pendientes de 25 a 50% de inclinación, el 45% de ocurrencia para pendientes de 50 a 70% de inclinación y en un 5% en pendientes mayores del 70% de inclinación. Para elevación se estableció que el 30% de ocurrencia de deslizamiento se presentó en elevaciones de 2 000 m a 2 500 m, el 65% de ocurrencia en elevaciones de 2 500 m a 3 000 m, se señaló los registros de mayor ponderación (Tabla 21).

La curvatura de la pendiente presentó 60% de ocurrencia en la cara convexa de la pendiente, el 20% en la forma plana y el 20% de ocurrencia en la forma cóncava. Por otro lado, la rugosidad determinó un 5% de ocurrencia de deslizamiento en suelos que van de 0.009 a 0.34 considerados poco rugosos, el 55% de ocurrencia en suelos de 0.44 a 0.52 denominados rugosos, se consideraron los pesos de mayor ponderación. Por otra parte, para el índice de vegetación diferenciada normalizada se estableció el 60% que significó valores de 0.16 a 0.32 considerado de baja densidad de vegetación y el 20% que representó valores de 0.32 a 0.47 considerado de densidad media de vegetación (Tabla 21).

Para el uso del suelo del año 1996, se determinó que los cultivos presentaron el 20% de ocurrencia de deslizamientos y la vegetación arbustiva presentó el 55%. Además, para el uso del suelo del año 2017, los cultivos presentaron el 60% de ocurrencia a deslizamiento, se consideró que la subcuenca contiene a los principales cantones de la provincia de Imbabura. Los pastos presentaron el 30% de ocurrencia de deslizamientos para la subcuenca del río Ambi. De igual manera, para la distancia a la falla geológica se determinó que a distancias de 2 000 m a 3 000 m significó el 30% de ocurrencia y para distancias de 1 000m a 2 000m representó el 30%.

La ocurrencia en relación al aspecto de la pendiente se determinó qué, para Nordeste (22.5-67.5) presentó el 30% de ocurrencia a deslizamiento y el 15% para Oeste (247.5-292.5) y Noroeste (292.5-337.5). De la misma forma para la red hídrica se estableció qué, el 55% de ocurrencia de deslizamiento se presentó en distancias menores de 200 m y el 30% se presentó en distancias de 200 m a 400 m. Para litología se determinó el 30% en andesitas y el 25% de ocurrencia para lavas de composición andesítica (Tabla 21).

Tabla 21. Coeficiente de función de creencia evidencial para factores espaciales, ponderación de clase y calificaciones de predictores (RF) basados en grados de asociaciones espaciales.

Predictores de deslizamiento	Clases	Ocurrencia	Frecuencia de deslizamiento (%)	Área de clase	Área de clase %	R	RF
Ángulo de pendiente	0 - 5%	0	0	444 979	38.00	0	0
	5 - 12%	0	0	300 220	25.64	0	0
	12 - 25%	1 800	10	224 010	19.13	0.52	0.03
	25 - 50%	7 200	40	137 165	11.71	3.41	0.17
	50 - 70%	8 100	45	55 795	4.77	9.44	0.47
	>70%	900	5	8 755	0.75	6.69	0.33

Elevación							
	1 500 m – 2 000 m	0	0	42 642	3.63	0	0
	2 000 m – 2 500 m	5 400	30	255 381	21.72	1.38	0.40
	2 500 m – 3 000 m	11 700	65	403 767	34.34	1.89	0.55
	3 000 m – 3 500 m	900	5	297 771	25.32	0.20	0.06
	3 500 m – 4 000 m	0	0	159 787	13.59	0	0
	4 000 m – 4 500 m	0	0	14 945	1.27	0	0
	4 500 m – 5 000m	0	0	1 579	0.13	0	0
Curvatura							
	Convexa	10 800	60	132 017	11.23	5.34	0.72
	Plano	3 600	20	911 926	77.55	0.26	0.03
	Cóncavo	3 600	20	131 929	11.22	1.78	0.24
Rugosidad							
	0.009 – 0.34	900	5	68 870	5.89	0.85	0.20
	0.34 – 0.44	5 400	30	237 090	20.29	1.48	0.35
	0.44 – 0.52	9 900	55	426 248	36.48	1.51	0.36
	0.52 – 0.61	1 800	10	318 058	27.22	0.37	0.09
	0.61 – 0.99	0	0	118 307	10.12	0	0
NDVI							
	-0.39 – 0.16	900	5	2 507 565	22.28	0.22	0.06
	0.16 – 0.32	10 800	60	2 951 910	26.23	2.29	0.57
	0.32 – 0.47	3 600	20	2 956 731	26.28	0.76	0.19
	0.47 – 0.62	2 700	15	2 177 780	19.35	0.78	0.19
	0.62 – 0.99	0	0	659 018	5.86	0	0
Uso del suelo 1996							
	Área sin vegetación	0	0	24 106	1.93	0	0
	Zona urbana	0	0	190 994	15.28	0	0
	Bosque	2 700	15	56 588	4.53	3.31	0.23
	Cultivos	3 600	20	40 322	3.22	6.20	0.44
	Pastos	900	5	632 635	50.60	0.10	0.01
	Vegetación arbustiva	9 900	55	169 978	13.59	4.05	0.29
	Cuerpos de agua	0	0	14 794	1.18	0	0
	Infraestructura agrícola	0	0	810	0.06	0	0
	Páramo	900	5	120 076	9.60	0.52	0.04
Uso del suelo 2017							
	Área sin vegetación	0	0	24 106	1.93	0	0
	Zona urbana	900	5	40 322	3.22	1.55	0.28
	Bosque	900	5	120 076	9.60	0.52	0.10
	Cultivos	10 800	60	632 635	50.60	1.19	0.22
	Pastos	5 400	30	169 978	13.59	2.21	0.40
	Vegetación arbustiva	0	0	56 588	4.53	0	0
	Cuerpos de agua	0	0	14 794	1.18	0	0
	Infraestructura agrícola	0	0	810	0.06	0	0
	Páramo	0	0	190 994	15.28	0	0
Distancia a la falla geológica							
	>4000m	1 800	10	282 597	22.60	0.44	0.09
	3000m - 4000m	3 600	20	193 360	15.47	1.29	0.25
	2000m - 3000m	5 400	30	244 761	19.58	1.53	0.30
	1000m - 2000m	5 400	30	265 800	21.26	1.41	0.27
	<1000	1 800	10	263 789	21.10	0.47	0.09
Aspecto de la pendiente							
	Plano (-1)	900	5	1 658 374	14.74	0.34	0.03
	Norte (0-22.5)	1 800	10	723 034	6.43	1.56	0.16
	Nordeste (22.5-67.5)	5 400	30	1 497 363	13.31	2.25	0.23
	Este (67.5-112.5)	1 800	10	1 355 743	12.05	0.83	0.09
	Sudeste (112.5-157.5)	900	5	1 175 042	10.44	0.48	0.05
	Sur (157.5-202.5)	0	0	909 008	8.08	0	0
	Sudoeste (202.5-247.5)	1 800	10	907 976	8.07	1.24	0.13

	Oeste (247.5-292.5)	2 700	15	1 004 668	8.93	1.68	0.17
	Noroeste (292.5-337.5)	2 700	15	1 281 780	11.39	1.32	0.14
	Norte (337.5-360)	0	0	740 016	6.58	0	0
Distancia a la red hídrica							
	<200m	9 900	55	62 867	55.86	0.98	0.27
	200m - 400m	5 400	30	28 689	25.49	1.18	0.32
	400m - 600m	2 700	15	11 000	9.77	1.53	0.42
	600m - 800m	0	0	4 285	3.81	0	0
	>800m	0	0	5 693	5.06	0	0
Litología							
	Andesitas	5 400	30	280 290	22.42	1,34	0.08
	Bloques dacíticos -matriz ceniza	0	0	15 723	1.26	0	0
	Cenizas y la pilli	1 800	10	70 671	5.65	1.77	0.10
	Conglomerados volcánicos	0	0	478	0.04	0	0
	Conglomerados	0	0	333	0.03	0	0
	Depósitos Aluviales	0	0	45 558	3.64	0	0
	Depósitos coluviales	900	5	13 884	1.11	4.50	0.26
	Depósitos coluvio aluviales	0	0	21 678	1.73	0	0
	Depósitos fluvio glaciares	0	0	9 175	0.73	0	0
	Depósitos fluvio – lacustres	0	0	26 825	2.15	0	0
	Depósitos glaciares	0	0	10 570	0.85	0	0
	Formación cangahua	900	5	114 593	9.17	0.55	0.03
	Lavas andesíticas	1 800	10	345 240	27.61	0.36	0.02
	Lavas basálticas	0	0	3 527	0.28	0	0
	Lavas composición andesítica	4 500	25	105 602	8.45	2.96	0.17
	No aplicable	0	0	78 394	6.27	0	0
	Piroclastos	900	5	82 672	6.61	0.76	0.04
	Toba volcánica	1 800	10	25 094	2.01	4.98	0.29

Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos año 1996

Se registró veinte puntos de deslizamientos entre rotacionales y flujos de derrubios en el área de estudio, se corroboró y validó la información de las zonas de susceptibilidad obtenidas a partir de la aplicación del modelo Radio frecuencia.

La zona susceptible muy alta a deslizamiento tiene 5 911.6 ha de área. Esta categoría se evidenció en las parroquias de San Blas, Imantag, Plaza Gutierrez, La Esperanza, Angochahua y Eugenio Espejo. Los factores que influyen para que la susceptibilidad sea alta son: pendientes que pueden llegar a ser >70%, cercanía a los ríos y la cobertura siendo en su mayor parte zonas de cultivo y pastizales (Figura 15 y Tabla 22).

La zona susceptible alta a deslizamiento presentó un área de 16 447.5 ha dentro del área de estudio representando el 14.79%. Se extiende por las parroquias de Selva Alegre, San José de Quichinche y San Rafael. Las pendientes entre el rango de 50-70% mantienen la susceptibilidad debido a su inclinación en el terreno (Figura 15 y Tabla 22).

La zona susceptible media a deslizamientos representa 34 470.7 ha de la zona de estudio equivalente a 30.99%, las parroquias de Cotacachi, Quiroga, Otavalo, San Pablo, presentan pendientes de 25% a 50% manteniendo la susceptibilidad media. La litología favoreció a la subcuenca debido a que presenta rocas muy duras como andesitas y lavas andesíticas (Figura 15 y Tabla 22).

La zona susceptible baja corresponde a 31 389.9 ha de la zona de estudio y representó 28.22%. En las parroquias de San Miguel de Ibarra, Urcuquí, Atuntaqui, San Antonio se pudo determinar que la cobertura bosque juega un papel fundamental en los deslizamientos debido a su protección al suelo (Figura 15 y Tabla 22).

La zona susceptible muy baja representó 23 002.7 ha de la zona de estudio y significó el 20.68%. En las parroquias de Chaltura, Imbaya, San Roque se evidenció una susceptibilidad muy baja, por la presencia de cobertura vegetal tanto de Bosque y páramo que son las clases que se presentan con mayor abundancia en estas categorías (Figura 14 y Tabla 22).

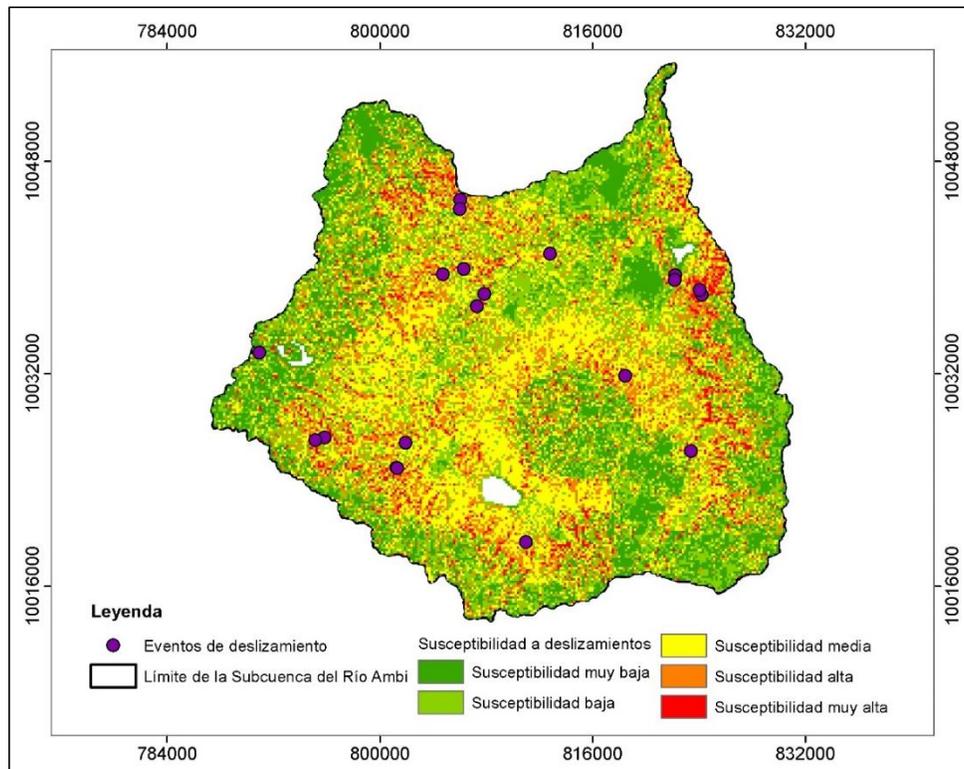


Figura 14. Mapa de Susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Ambi año 1996.

Tabla 22. Área de susceptibilidad a deslizamientos en la subcuenca del río Ambi año 1996.

Categoría	Área (ha)	Porcentaje (%)	Color simbolización
Susceptibilidad muy baja	23 002.7	20.68	Verde oscuro
Susceptibilidad baja	31 389.9	28.22	Verde claro
Susceptibilidad media	34 470.7	30.99	Amarillo
Susceptibilidad alta	16 447.5	14.79	Anaranjado
Susceptibilidad muy Alta	5 911.6	5.32	Rojo
Total	111 222.40	100	

Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos año 2017

Se evidenciaron cincuenta y cuatro puntos de deslizamientos entre rotacionales y flujos de derrubios en el área de estudio, se corroboró y validó la información de las zonas de susceptibilidad obtenidas a partir de la aplicación del modelo Radio frecuencia. Se

establecieron cinco categorías de susceptibilidad: susceptibilidad muy baja, susceptibilidad baja, susceptibilidad media, susceptibilidad alta y susceptibilidad muy alta.

La zona susceptible muy alta a deslizamiento tiene 6 243.76 ha de superficie del área de estudio. Esta categoría está distribuida principalmente en las faldas del volcán Imbabura y Cotacachi. También se puede evidenciar esta categoría en las parroquias de San Blas, Imantag, Angochahua y Plaza Gutierrez. Los factores que influyen para que la susceptibilidad sea alta son: pendientes que pueden llegar a ser >70%, cercanía a los ríos y la cobertura siendo en su mayor parte zonas de cultivo y pastizales. Los factores con un menor índice de susceptibilidad fueron la geología que está conformada en su mayor parte por andesitas (Figura 16 y Tabla 23).

La zona susceptible alta a deslizamiento tiene un área de 18 856.56 ha dentro del área de estudio. Se extiende por las parroquias de Urcuquí, San José de Chaltura, San Francisco de Natabuela, Angochahua y Tumbabiro. La distancia a la red hídrica de igual manera es fundamental en la susceptibilidad alta, mientras más cerca a la red se encuentre la susceptibilidad es mayor, cabe recalcar que los registros de deslizamientos en su mayoría se han presentado cerca de la red hídrica (Figura 31 y Tabla 31). Además, la distancia a la falla geológica es importante en rangos de 1 000 m a 2 000 m se mantiene una susceptibilidad alta debido a que mientras más cerca de la falla la probabilidad es mayor a un deslizamiento (Figura 16 y Tabla 23).

La zona susceptible media a deslizamientos representa 34 738.51 ha de la zona de estudio, las parroquias de Olmedo, San Pablo, Quiroga, Cotacachi, San José de Quichinche, presentan pendientes de 25% a 50% manteniendo la susceptibilidad media. La cobertura vegetal jugó un papel importante en la susceptibilidad media debido a la protección que este brinda al suelo (Figura 16 y Tabla 23).

La zona susceptible baja corresponde a 29 851.32 ha de la zona de estudio. En las parroquias de Otavalo, Urcuquí, Imbaya, San Roque la curvatura es importante y se determinó la presencia de formas cóncavas y planas (Figura 16 y Tabla 23).

La zona susceptible muy baja representó 21 629.98 ha la zona de estudio. En los cantones de Ibarra, Otavalo, Atuntaqui, San José de Chaltura se evidenció que la susceptibilidad es muy baja ya que presenta pendientes que van de 0 a 5% y de 5 a 12 %, de igual manera se encontró curvaturas planas (Figura 15 y Tabla 23).

Tabla 23. Área de susceptibilidad a deslizamientos en la subcuenca del río Ambi año 2017.

Categoría	Área (ha)	Porcentaje	Color simbolización
Susceptibilidad muy baja	21 629.98	19.43	Verde oscuro
Susceptibilidad baja	29 851.32	26.82	Verde claro
Susceptibilidad media	34 738.51	31.21	Amarillo
Susceptibilidad alta	18 856.56	16.94	Anaranjado
Susceptibilidad muy Alta	6 243.76	5.61	Rojos
Total	111 320.13	100	

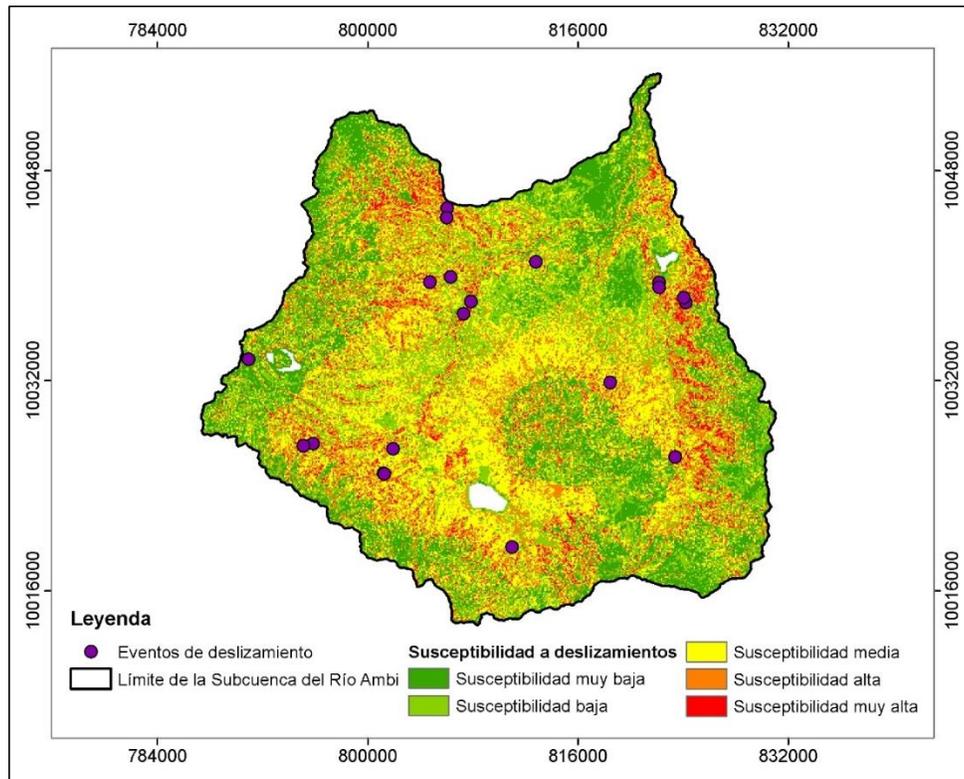


Figura 15. Mapa de Susceptibilidad a deslizamientos de la subcuenca del río Ambi año 2017.

Análisis estadístico mediante regresión geográfica ponderada para el cambio de uso de suelo y la susceptibilidad a deslizamientos en el período 1996 -2017

Se realizó el análisis estadístico mediante la regresión geográfica ponderada, para lo cual se necesitó clasificar la subcuenca del río Ambi en 10 microcuencas principales llamadas: Drenajes Menores, río Machángara, río Jatunyacu, río Chorlavi, río Tahuando, río Alambi, río Blanco, río Pichaví, río Yanayacu y quebrada Yanayacu. Posteriormente se obtuvo el área que ocupa cada cobertura vegetal para los años 1996 y 2017 por cada microcuenca (Tabla 24).

Tabla 24. Correlación geográfica ponderada por R2 entre coberturas vegetales vs susceptibilidad.

Período	Coberturas	R2 Ajustado	Correlación
1996 - 2017	Bosque VS Susceptibilidad	0,291217	Débil
1996 - 2017	Cultivos VS Susceptibilidad	0,057505	Nula
1996 - 2017	Páramo VS Susceptibilidad	0,537463	Fuerte
1996 - 2017	Pastos VS Susceptibilidad	0,357717	Débil
1996 - 2017	Vegetación Arbustiva VS Susceptibilidad	-0,033522	Nula

Para el período 1996 – 2017 se obtuvo la relación geográfica ponderada entre los cambios de uso de suelo y la susceptibilidad a deslizamientos. Correspondiente a la cobertura bosque se determinó un R2 ajustado de 0.29 que indica una correlación espacial débil positiva con la variable susceptibilidad a deslizamientos, mientras que, los cultivos presentan una

correlación nula mediante un R2 ajustado 0.05 lo que permite interpretar que no existe asociación espacial entre las variables (Figura 16).

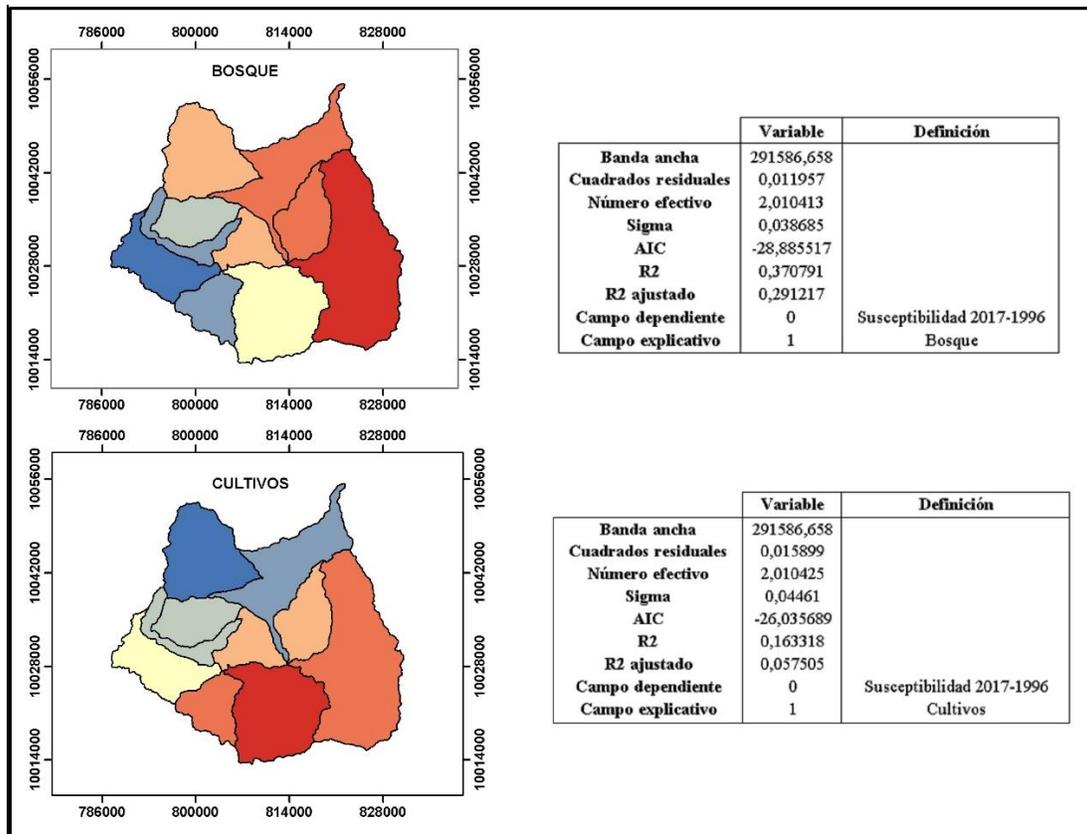


Figura 16. Mapa de Correlación geográfica ponderada de las coberturas bosque y cultivos VS Susceptibilidad.

Correspondiente a la cobertura vegetación arbustiva se determinó una correlación nula negativa mediante un R2 ajustado de -0.03 que determinó que no existe asociación espacial entre las variables (Figura 17).

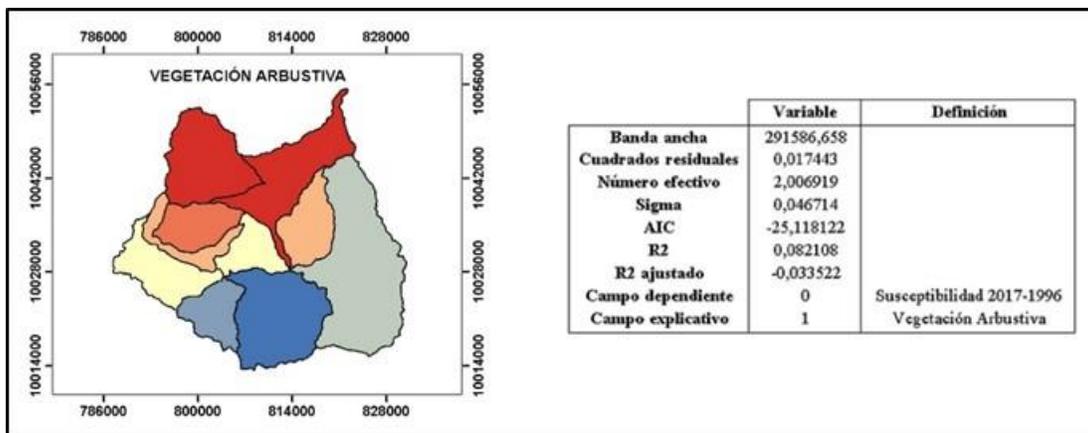


Figura 17. Mapa de Correlación geográfica ponderada de la cobertura vegetación arbustiva VS Susceptibilidad.

Correspondiente a la cobertura páramo se determinó una correlación espacial fuerte positiva con la variable susceptibilidad a deslizamientos con un R2 ajustado 0.53, y se interpreta, a mayor presencia de páramo mayor susceptibilidad a deslizamiento. Por otra parte, los pastos

presentan una correlación débil con un R2 ajustado de 0.35 con la variable susceptibilidad lo que permite interpretar que existe asociación espacial entre las variables baja (Figura 18).

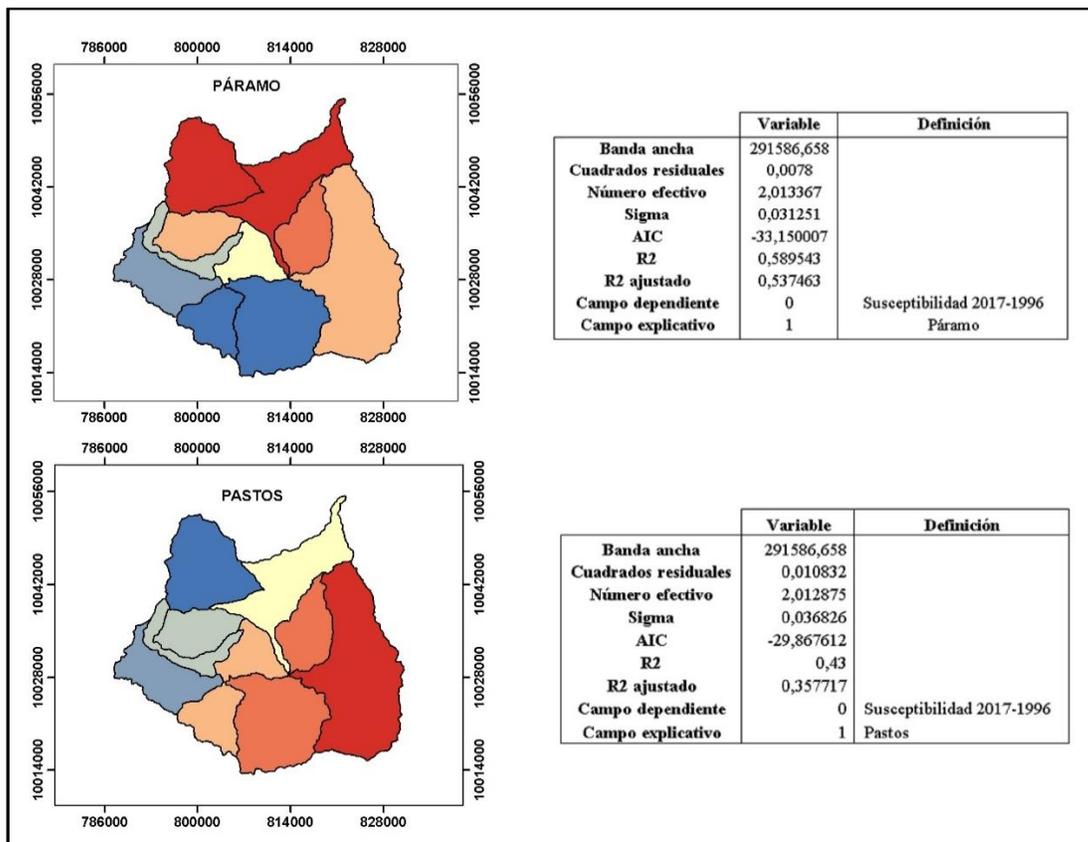


Figura 18. Mapa de Correlación geográfica ponderada de las coberturas páramo y pastos VS Susceptibilidad.

Análisis de la conectividad y cambios del paisaje en la subcuenca del río Ambi

Se realizó el análisis respectivo de las métricas de paisaje para las microcuencas principales que conforman el río Ambi los cuales son: drenajes Menores, río Machángara, río Jatunyacu, río Chorlaví, río Tahuando, río Alambi, río Blanco, río Pichaví, río Yanayacu y quebrada Yanayacu. Se determinó el número de parches (NP) y el área media del parche (AMN) para los períodos de 1996 y 2017.

Análisis del número de parches (NP) de los paisajes que conforman la subcuenca del río Ambi en los años 1996 y 2017

Los drenajes menores presentaron en la cobertura cultivos 439 parches en el año 1996 y disminuyeron a 103 parches en el año 2017. Por otra parte, los pastos en el año 1996 presentaron 224 parches y en el año 2017 aumentaron a 243. La vegetación arbustiva en el año 1996 se registraron 126 parches y para el año 2017 aumentaron a 211 parches.

El río Machángara presentó en la cobertura cultivos 183 parches en el año 1996 y disminuyeron en 61 parches para el año 2017, de igual manera, la vegetación arbustiva

registró 149 parches para el año 1996 y para el año 2017 se presentó una disminución en 65 parches. Por otro lado, los pastos aumentaron de 58 parches en el año 1996 a 76 parches en el año 2017.

El río Jatunyacu presentó para el año 1996 en la cobertura de cultivos 223 parches y para el año 2017 disminuyó en 97 parches. De igual manera, la vegetación arbustiva presentó 367 parches en el año 1996 y para el 2017 disminuyó 116 parches. Sin embargo, los pastos presentaron 156 parches en el 1996 y aumentó en el año 2017 a 270 parches.

El río Chorlaví en la cobertura cultivos presentó 147 parches en el año 1996 y disminuyó a 56 parches en el año 2017. Correspondiente a la cobertura de vegetación arbustiva se registró 147 parches en el año 1996 y 51 parches en el año 2017. Por otro lado, los pastos aumentaron de 59 parches a 122 parches entre el año 1996 y 2017. De igual manera la cobertura páramo aumento de 7 a 22 parches entre el año 1996 y 2017

EL río Tahuando en la cobertura de cultivos presenta 505 parches en el año 1996 y para el año 2017 disminuyó en 244 parches. La vegetación arbustiva disminuyó de 437 parches a 275 parches entre los años 1996 y 2017. Sin embargo, los pastos aumentaron sus parches de 205 en el año 1996 a 442 parches en el año 2017. De igual manera la cobertura páramo presentó 171 parches en el año 1996 y aumentaron a 263 parches en el año 2017.

El río Alambi presentó en cultivos 213 parches en el año 1996 y disminuyó a 82 parches en el año 2017. Por otro lado, la cobertura bosque presentó un aumento de parches de 87 a 112 en los años 1996 y 2017, de igual manera los pastos presentaron 114 parches en el año 1996 y aumentaron a 238 en el año 2017.

El río Blanco presentó en cultivos 400 parches en el año 1996 y 100 parches en el año 2017. La vegetación arbustiva registró 261 parches que disminuyeron a 190 parches entre los años 1996 y 2017. Correspondiente a la cobertura pastos se registró un aumento de 169 parches a 234 entre los años 1996 y 2017.

El río Pichaví presentó en la cobertura cultivos 67 parches y disminuyó a 29 parches entre los años 1996 y 2017. Además, la vegetación arbustiva presentó 71 parches en el año 1996 y disminuyó a 39 parches en el 2017. Sin embargo, los pastos aumentaron de 56 parches a 98 parches entre los años 1996 y 2017.

El río Yanayacu presentó en la cobertura cultivos 162 parches en el año 1996 y disminuyó a 56 parches para el año 2017, de igual manera, la vegetación arbustiva presentó 122 parches en el año 1996 y disminuyó a 78 parches para el 2017. Por otro lado, los pastos aumentaron los parches de 96 en el año 1996 a 102 parches en el año 2017.

La quebrada Yanayacu presentó en la cobertura cultivos 178 parches en el año 1996 y disminuyó en el año 2017 a 24 parches. También la vegetación arbustiva de 59 parches en el año 1996 disminuyó a 30 parches para el 2017. De igual manera, los pastos disminuyeron de 123 parches en el año 1996 a 120 parches en el año 2017.

Se concluyó que la variación del número de parches se debe a diversos procesos simultáneos como el incremento de la frontera agrícola, crecimiento poblacional o actividades antrópicas.

Análisis de área media del parche (AMN) de los paisajes que conforman la subcuenca del río Ambi en los años 1996 y 2017.

Los drenajes menores presentaron en la cobertura cultivos un área media del parche de 9.27 m en el año 1996 y aumentó a 85.64 m en el 2017. Además, la cobertura pasto presentó un área media de parche de 6.07 y aumentó a 10.76 m. Sin embargo, en la cobertura de páramo se registró para el año 1996 un área media del parche de 71.76 m y disminuyó para el año 2017 a 48.6 m. De igual manera, la vegetación arbustiva en el año 1996 presentó un área media del parche de 63 m y disminuyó a 4.07 m en el año 2017.

El río Machángara registró en la cobertura cultivos un área media del parche de 7 m en el año de 1996 y aumentó en el año 2017 a 46.46. También, los pastos aumentaron de 5.99 m en el año 1996 a 10.14 en el año 2017. Por otro lado, la cobertura bosque registró un área media del parche de 32 m en el año 1996 y disminuyó a 26.35 m para el año 2017. La cobertura páramo, registro para el año 1996 un área media del parche de 67.90 m y disminuyó para el año 2017 a 29.09 m.

El río Jatunyacu para el año 1996 en la cobertura cultivos registró un área media del parche de 22 m y aumentó a 91.03 m en el año 2017. Sin embargo, la cobertura de páramo registró en el año 1996 un área media del parche de 59.77 m y disminuyó a 32.37 m para el año 2017. De igual manera, la cobertura de bosque registró en el año 1996 un área media del parche de 25.47 m y disminuyó a 11.80 m en el año 2017.

El río Chorlaví presentó en la cobertura de cultivos un área media del parche de 20 m en el año 1996 y aumentó en el año 2017 a 85.43 m. Por otra parte, el páramo registró en el año 1996 un área media del parche de 139.26 m y disminuyó en el año 2017 a 31.08 m. De igual manera, la vegetación arbustiva en el año 1996 registró un área media del parche de 17.72 m y disminuyó en el año 2017 a 4.30 m

El río Tahuando registró en el año 1996 en la cobertura de cultivos un área media del parche de 11 m y aumentó en el año 2017 a 50.54 m. Sin embargo, en la cobertura de páramo se registró un área media del parche de 44.04 m en el año 1996 y el 2017 disminuyó a 21.99 m. También, los pastos en el año 1996 registraron un área media del parche 17.68 m y disminuyó a 7.05 m en el año 2017.

El río Alambi presentó en el año de 1996 en la cobertura de cultivos un área media de parche de 8 m y aumentó a 63.25 m en el año 2017. Por otra parte, en la cobertura páramo se registró un área media del parche de 247.56 m y disminuyó a 65.58 m en el año 2017, también, la cobertura pasto presentó en el año 1996 un área media del parche 14.19 m y disminuyó a 7.27 m en el año 2017. De igual manera, la cobertura bosque en el año 1996 presentó 21.52 m de área media del parche y disminuyó a 10 m en el año 2017.

El río Blanco presentó en la cobertura cultivos un área media del parche de 4 m en el año 1996 y aumentó a 50.84 m en el año 2017. Sin embargo, la cobertura páramo en el año 1996 registró un área media del parche de 34.36 m y disminuyó en el año 2017 a 16.56 m. Además, los pastos en el año 1996, el área media del parche disminuyó de 13.39 m a 6.60 m en el año 2017.

El río Pichaví registró en el año 1996 en la cobertura de cultivos un área media del parche de 18 m y aumentó a 62.69 m en el año 2017. De igual manera, la vegetación arbustiva en el año 1996 presentó un área media del parche de 12.32 m y aumentó a 15.16 m en el año 2017. Por otra parte, la cobertura páramo registro en el año 1996 un área media del parche de 211.39 m y disminuyó en el 2017 a 83.62 m. También, la cobertura pastos presentó 9.21 m de área media del parche y disminuyó a 4.93 m en el 2017.

En el río Yanayacu la cobertura de cultivos presentó un área media del parche de 14 m en el año 1996 y aumentó a 63.05 para el año 2017. De igual forma, la cobertura pasto presentó en el año 1996 un área media de parche de 6.91 m y aumentó a 13.45 m en el 2017. Sin embargo, la cobertura de páramo registró en el año 1996 un área media del parche de 237.04 y disminuyó a 192.53 m en el año 2017.

En la quebrada Yanayacu se registró en la cobertura de cultivos en el año de 1996 el área media del parche con un valor de 8 m y aumentó a 155.94 m para el 2017. Por otra parte, la vegetación arbustiva presentó en año de 1996 un área media del parche de 42.80 m y disminuyó a 1.83 m. Además, la cobertura páramo presentó en el año de 1996 un área media del parche de 67.95 m y disminuyó en el año 2017 a 58.97 m

Por lo tanto, se concluyó que mientras el número de parches aumenta y el área del parche es mayor, existe una gran susceptibilidad a fragmentación en los diferentes paisajes.

Análisis estadístico mediante regresión geográfica ponderada para la métrica de número de parches y la susceptibilidad a deslizamientos en el período 1996 -2017

Para el período 1996 – 2017 se calculó la relación geográfica ponderada entre el número de parches y la susceptibilidad a deslizamientos. Perteneciente al número de parches de la cobertura bosque se determinó un R2 ajustado de 0.38 que indica una correlación espacial débil positiva con la variable susceptibilidad a deslizamientos, mientras que, los cultivos presentan una correlación nula mediante un R2 -0.11 lo que permite interpretar que no existe asociación espacial entre las variables (Tabla 25 y Figura 19).

Tabla 25. Correlación geográfica ponderada por R2 entre coberturas vegetales vs susceptibilidad.

Período	Coberturas	R2 Ajustado	Correlación
1996 - 2017	Número de parches en la cobertura bosque VS Susceptibilidad	0.382025	Débil
1996 - 2017	Número de parches en la cobertura cultivos VS Susceptibilidad	-0.11773	Nula
1996 - 2017	Número de parches en la cobertura páramo VS Susceptibilidad	0.222505	Nula
1996 - 2017	Número de parches en la cobertura pastos VS Susceptibilidad	0.332305	Débil
1996 - 2017	Número de parches en la cobertura vegetación Arbustiva VS Susceptibilidad	-0.081333	Nula

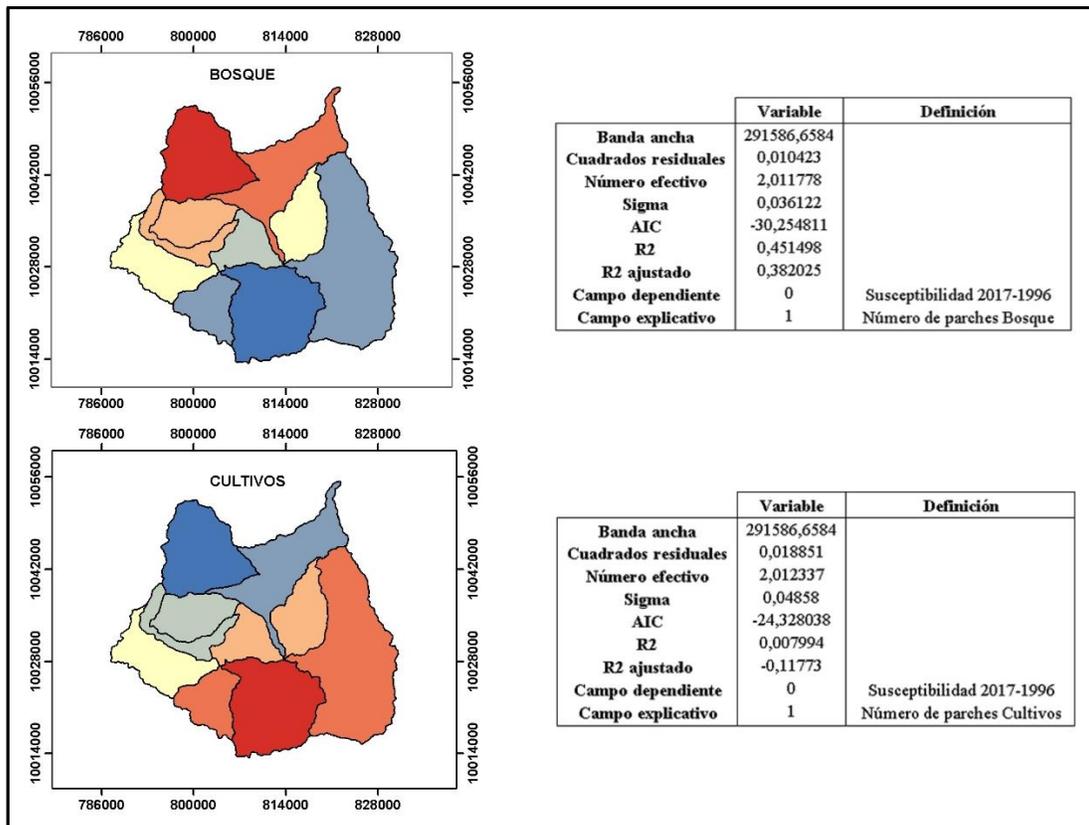


Figura 19. Mapa de correlación geográfica ponderada del número de parches de las coberturas bosque y cultivos VS Susceptibilidad.

Mediante el número de parches de la vegetación arbustiva se determinó una correlación nula negativa con la variable de susceptibilidad mediante un R2 ajustado de -0.08 que determinó que no existe asociación espacial entre las variables (Figura 20).

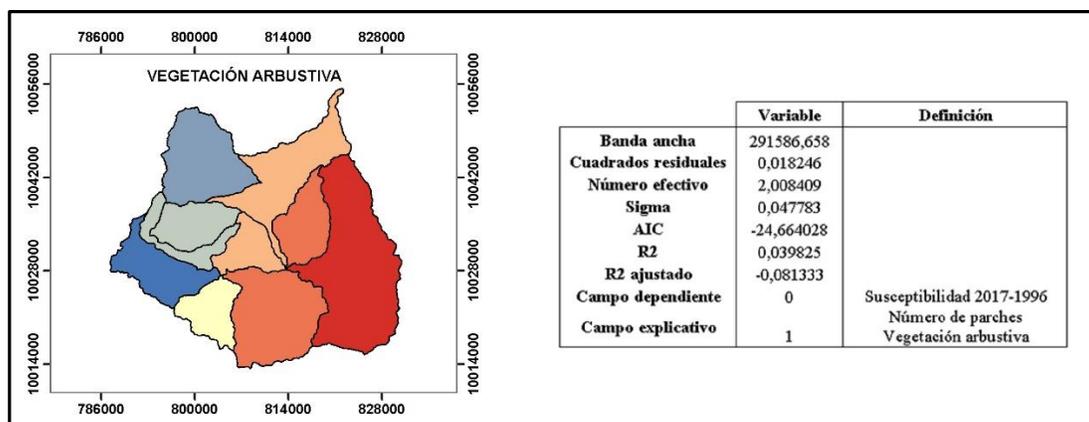


Figura 20. Mapa de correlación geográfica ponderada del número de parches de la cobertura vegetación arbustiva VS Susceptibilidad.

Correspondiente al número de parches de la cobertura páramo se determinó una correlación espacial nula con la variable susceptibilidad a deslizamientos con un R2 ajustado 0.22, la cual no existe correlación significativa. Por otra parte, los pastos presentan una correlación

débil con un R2 ajustado de 0.33 con la variable susceptibilidad lo que permite interpretar que existe asociación espacial baja entre las variables (Figura 21).

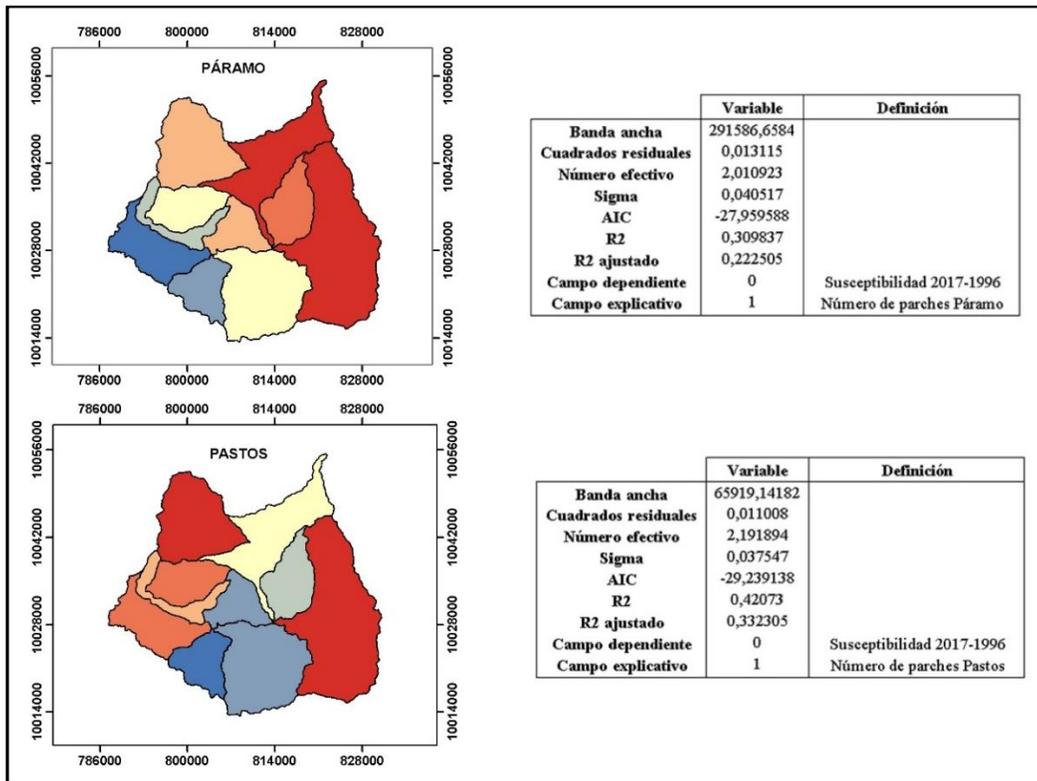


Figura 21. Mapa de correlación geográfica ponderada del número de parches de las coberturas páramo y pastos VS Susceptibilidad.

Análisis estadístico mediante regresión geográfica ponderada para la métrica de área media del parche y la susceptibilidad a deslizamientos en el período 1996 -2017

Mediante el área media del parche de la vegetación arbustiva se determinó una correlación nula negativa con la variable de susceptibilidad mediante un R2 ajustado de 0.06 que determinó que no existe asociación espacial entre las variables (Figura 22).

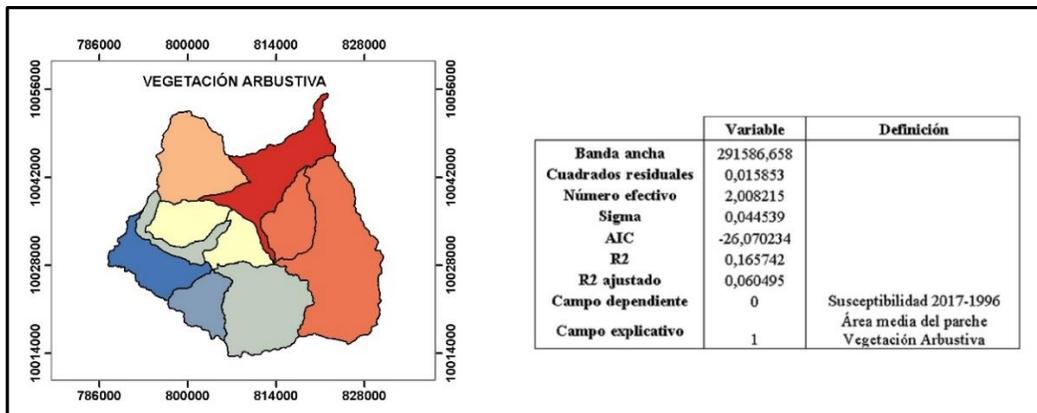


Figura 22. Mapa de correlación geográfica ponderada del área media del parche de la cobertura vegetación arbustiva VS Susceptibilidad.

Pertenciente al área media del parche de la cobertura bosque se determinó un R2 ajustado de 0.18 que indica una correlación espacial nula positiva con la variable susceptibilidad a deslizamientos, mientras que, los cultivos presentan una correlación nula mediante un R2 - 0.09 lo que permite interpretar que no existe asociación espacial entre las variables (Figura 23).

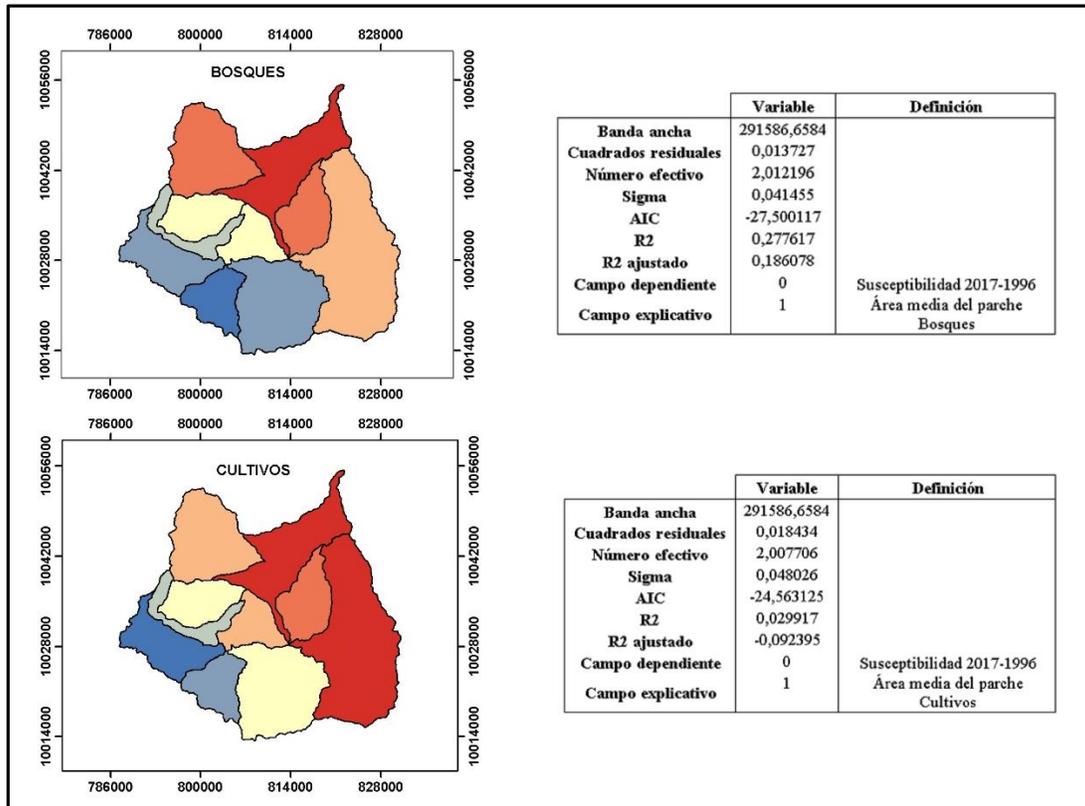


Figura 23. Mapa de correlación geográfica ponderada del área media del parche de las coberturas bosque y cultivos VS Susceptibilidad.

Correspondiente al área media del parche de la cobertura páramo se determinó una correlación espacial nula con la variable susceptibilidad a deslizamientos con un R2 ajustado -0.01, la cual no existe correlación significativa. Por otra parte, los pastos presentan una correlación moderada positiva con un R2 ajustado de 0.60 con la variable susceptibilidad lo que permite interpretar que a mayor sea el área del parche en la cobertura pastos mayor será la susceptibilidad a deslizamientos (Figura 24).

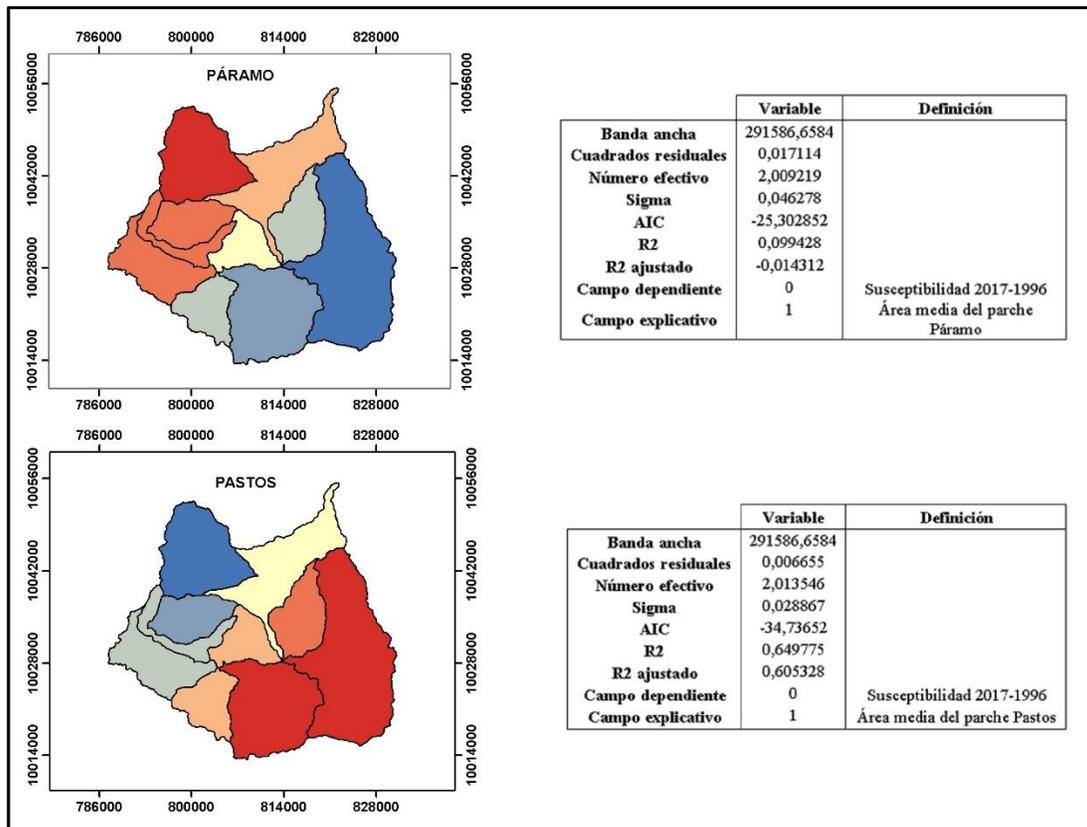


Figura 24. Mapa de correlación geográfica ponderada del área media del parche de las coberturas páramo y pastos VS Susceptibilidad.

DISCUSIÓN

Cambios del paisaje años 1996, 2007, 2017.

Resultados similares se determinó el estudio de análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México 1990–2000 en la cual a través del análisis derivado de la matriz de tabulación llevó a conclusiones erróneas sobre la dinámica del territorio debido a que ésta es abrumadoramente superior a los cambios producidos, ya que en la zona la superficie que se mantuvo estable fue alrededor del 92%, por otra parte, hay que tomar en cuenta que, en la mayoría de los paisajes, la superficie de no cambio es lo que domina en el medio ambiente (López y Plata, 2009).

En este sentido, se analizó los datos fuera de la diagonal principal ya que permitió identificar patrones dominantes y sistemáticos presentes en los análisis de cambios. Analizada la tabla de esta forma, se observó que en la zona ocurrieron 32 transiciones entre categorías (ganancias y pérdidas), y excepto lo urbano que presentó solamente ganancias, las otras categorías sufrieron intercambios, por lo que de esta manera se observa que en realidad el área en estudio presenta una dinámica de cambio muy considerable.

Resultados diferentes se registraron en el estudio de cambio de uso de suelo en el azolvamiento del embalse “La Esperanza” Manabí-Ecuador el cuál el cambio de uso de suelo ha provocado la degradación y transformación de muchos ecosistemas de las microcuencas

aportantes al embalse “La Esperanza”. La labor de las actividades agropecuarias en la zona son un factor significativo de cambio, el 81 815.68 ha de suelo están dedicadas en un 70% a la arboricultura tropical y el 30% restante corresponde a bosque intervenido producto de la deforestación. En la zona de estudio, entre las microcuencas aportantes al embalse, la deforestación estimada para el período 1994-2015 es de 733,08 ha/año o equivalente a un 0.091% anual (Velásquez, Calderón, Urdánigoca y Cárdenas, 2016).

Determinación de la susceptibilidad en la subcuenca del río Ambi.

Resultados similares se pudo determinar en el estudio de función de creencia evidencial estadística bivariada de conjunto con jerarquía analítica establecida en el conocimiento y regresión logística estadística multivariada para mapeo de susceptibilidad a deslizamientos. El factor de creencia evidencial ponderó la relación espacial entre la eventualidad de deslizamientos de tierra y factores espaciales (ángulo de pendiente, aspecto de pendiente, curvatura, elevación, rugosidad de la superficie, distancia desde el drenaje, TWI, SPI, espesor del suelo, drenaje del suelo, textura del suelo, tipo de madera, edad de la madera, bosque densidad y diámetro de madera). Cabe recalcar que los modelos de credibilidad como los enfoques estadísticos bivariados son favorables debido a la capacidad de lograr precisión lógica junto a las variables determinadas aplicando la técnica de conjunto para reducir el ruido y dichas limitaciones. Se consideró 10 variables en conjunto para la determinación de la susceptibilidad con categoría de confiabilidad.

Para el aspecto de la pendiente, el suroeste, el sureste y el oeste contienen casi el 48% de los registros de falla de la pendiente. La curvatura de la pendiente tuvo tres caras (cóncava, plana y convexa). La cara cóncava contuvo la mayor cantidad de ocurrencia de deslizamientos con 52%, mientras que la cara convexa contiene 39% de ocurrencia de deslizamientos.

Se evidenció, que las pendientes convexas son sólidas porque facilitan la dispersión igual de la escorrentía por la pendiente. El valor de rugosidad de la superficie muestra una alta susceptibilidad con casi el 89% de la ocurrencia de deslizamientos de tierra. Este resultado refleja la relación directa de la rugosidad de la superficie con la complejidad del terreno (Althuwaynee, Pradhan, Park y Lee, 2014).

Por otra parte, se estableció resultados diferentes basados en el estudio de metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Los resultados basados en el crecimiento histórico de la ciudad a partir de 1892 (Gobierno de Chiapas, 1992), año en que se registra el primer plano urbano de la ciudad, indican que de 1892 a 2010 la ciudad ha crecido en superficie 100 veces y 70 en cantidad de habitantes. Para el caso de estudio de la ladera sur en Tuxtla Gutiérrez, se presentaron cinco niveles de amenaza en la zona, que abarcan los siguientes porcentajes: muy baja 5%, baja 27.1%, media 39.3%, alta 15.3% y muy alta 13.3%, siendo esta última la que se distribuye en su mayor parte en los depósitos de talud, alrededor de la Mesa de Copoya, lo que confirma su situación de máximo peligro. El crecimiento demográfico continúa paulatinamente y la presión hacia los recursos cada vez es mayor con el fin de satisfacer las necesidades de los humanos.

CONCLUSIONES

De acuerdo al cambio de uso de suelo la técnica de clasificación supervisada fue la más concreta en los últimos 20 años; por ende, las cuantificaciones de la superficie en cambios de uso de suelo fueron más aproximados a la realidad del uso de suelo y cobertura vegetal para todo el periodo de análisis.

El 29.20% del área de estudio correspondiente al año 2017 presenta una susceptibilidad media a deslizamientos y representó 32 487.21 ha, el 27.08% representa la susceptibilidad alta y se extiende a lo largo de la zona especialmente en las parroquias de Imantag y San Blas, y el 13.53% corresponde a susceptibilidad muy alta presente en las faldas del volcán Imbabura y Cotacachi estudio en base a la aplicación del método Bivariado. Se validó este modelo de predicción mediante el área bajo la curva (AUC) lo cual lo determina como un modelo admisible. Además, las zonas con mayor susceptibilidad a deslizamientos coinciden con los puntos de los eventos registrados en campo.

La mayor incidencia en la disminución de cobertura bosque, vegetación arbustiva y páramo fue el constante aumento de las extensiones de cultivos hacia estas zonas, debido a las actividades agrícolas, ganaderas. El incremento demográfico y las extensas épocas secas que han incidido en un aumento de erosión del suelo, así como una mínima regeneración natural.

En el modelado de deslizamientos de tierra, tanto los modelos de probabilidad como los enfoques estadísticos bivariados son favorables debido a la capacidad de lograr precisión lógica, pero existen algunas limitaciones debido a los supuestos estadísticos cuando se aplican individualmente. Por lo tanto, la investigación actual propone una técnica de conjunto, que podría reducir dicha limitación al extender la capacidad

RECOMENDACIONES

Analizar la vulnerabilidad a elementos fundamentales tales como: viviendas, instituciones públicas (centros de salud, escuelas, entre otros) con el propósito de conocer la realidad de los demás elementos físicos del área de estudio, disminuyendo las afectaciones a los que dichos elementos están expuestos.

Con base a los resultados del presente estudio, forjar investigaciones para conocer la proyección de cambios en el uso de suelo y cobertura vegetal a periodos futuros de 20 y 30 años, tanto para la subcuenca del río Ambi, como para la cuenca del río Mira el cual abarca la subcuenca.

La metodología empleada, a partir de la combinación de técnicas en Teledetección, SIG y análisis estadístico, ha demostrado su potencial para estudios en los que se involucren los cambios de usos de suelo, ya que no sólo permite lograr imágenes categorizadas de las coberturas, sino que permite cuantificar los cambios y observar su dinámica a diferentes niveles de complemento, para con ello ganar en entendimiento sobre las diferentes coberturas que se están interrelacionando.

REFERENCIAS

- Aguilera, F., Valenzuela, L.M. y Botequilha, A. (2011). Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, 99(3-4), 226-238.
- Akgun, A., Dag, S. y Bulut, F. (2008). Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*, 54(6), 1127-1143.
- Althuwaynee, O.F., Pradhan, B., Park, H.J. y Lee, J.H. (2014). A novel ensemble decision tree-based Chi-squared Automatic Interaction Detection (CHAID) and multivariate logistic regression models in landslide susceptibility mapping. *Landslides*, 11(6), 1063-1078.
- Amorim, S., Corominas, J., Baeza, C., Portilla, M. y Angulo, C. (2009). *Análisis comparativo de técnicas estadísticas y de aprendizaje para evaluar la susceptibilidad del terreno a los deslizamientos superficiales en el pirineo catalán. Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Barcelona, España: CIMNE.
- Arnáez, J., Ortigosa, L., Flaño, P.R. y Martínez, T.L. (2012). Distribución espacial del viñedo en la Comunidad Autónoma de La Rioja: influencia de la topografía y de las formas del relieve. *Revista de Geografía*, (16), 11-34.
- Cabrera, M.M.R., Dáger, M.R., Rojas, R.M. y García, H. (2010). Estudio exploratorio de las propiedades físicas de suelos y su relación con los deslizamientos superficiales: Cuenca del río Maracay, estado Aragua-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(2), 225-247.
- Carmona, M.R., Aravena, J.C., Bustamante, M.A., Celis, J.L., Charrier, A., Díaz, I.A. y Hernandez, C. (2010). Estación Biológica Senda Darwin: Investigación ecológica de largo plazo en la interfase ciencia-sociedad. *Revista Chilena de Historia Natural*, 83(1), 113-142.
- Cristeche, E. y Penna, J.A. (2008). Métodos de valoración económica de los servicios ambientales. *Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales*, 3, 1-55.
- Forman, R.T. (2014). *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions* (1995). Washington, Estados Unidos: Forster O. Ndubisi
- García, D. (2011). Efectos biológicos de la fragmentación de hábitats: nuevas aproximaciones para resolver un viejo problema. *Revista Ecosistemas*, 20, 2-3.

- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M. y Valigi, D. (2009). Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 279(3-4), 222-229.
- López, W. (2014). Análisis del manejo de cuencas como herramienta para el aprovechamiento sustentable de recursos naturales. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 13(2), 39-45.
- López, V.H. y Plata, W. (2009). Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000. *Investigaciones geográficas*, (68), 85-101.
- Paz, J.A., González, R., Gómez, M. y Velasco, J.A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones geográficas*, 92, 11-24.
- Rodríguez, A. (2011). *Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos, estudio de caso piedemonte de Villavicencio*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Sabatakakis, N., Koukis, G., Vassiliades, E. y Lainas, S. (2013). Landslide susceptibility zonation in Greece. *Natural Hazards*, 65(1), 523-543.
- Schramski, J.R., Gattie, D.K. y Brown, J.H. (2015). Human domination of the biosphere: Rapid discharge of the earth-space battery foretells the future of humankind. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(31), 9511-9517.
- Skokanová, H. y Eremlášová, R. (2013). Landscape functionality in protected and unprotected areas: Case studies from the Czech Republic. *Ecological informatics*, 14, 71-74.
- Torres, D.J. (2016). Formación docente en desarrollo sostenible para la preservación de la biodiversidad. *Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 21-31.
- Vargas, R. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma, Italia: FAO
- Velásquez, F., Calderón, J., Urdánigo, L. y Cárdenas, F. (2016). Cambio de uso de suelo en el azolvamiento del embalse “La Esperanza” Manabí-Ecuador. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 19(37).
- Villacorta, S.P., Fidel, L. y Zavala, B. (2012). Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú. *Revista Geológica Argentina*, 3(69), 393-399.

- Viloria, J.A., Viloria, A., Pineda, M.C. y Valera, A. (2016). Digital modelling of landscape and soil in a mountainous region: A neuro-fuzzy approach. *Geomorphology*, 253, 199-207.
- Yilmaz, I. (2009). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat—Turkey). *Computers & Geosciences*, 35(6), 1125-1138.