



RIESGOS NATURALES EN LA CUENCA DEL RIO MIRA

**Variabilidad del clima, deslizamientos, incendios
y vulnerabilidad volcánica**

Patricia Aguirre Mejía (Ed.)



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



RIESGOS NATURALES EN LA CUENCA DEL RIO MIRA

Variabilidad del clima, deslizamientos, incendios y vulneración volcánica





RIESGOS NATURALES EN LA CUENCA DEL RIO MIRA

Variabilidad del clima, deslizamientos, incendios y vulneración volcánica



Bibliographical information held by the German National Library

The German National Library has listed this book in the Deutsche Nationalbibliografie (German national bibliography); detailed bibliographic information is available online at <http://dnb.d-nb.de>.

1st edition - Göttingen: Cuvillier, 2020

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen, Germany 2020

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telephone: +49 (0)551-54724-0

Telefax: +49 (0)551-54724-21

www.cuvillier.de

All rights reserved. This publication may not be reproduced by photomechanical means (photocopying, microfiche), in whole or in part, without the prior express permission of the publisher.

1st edition, 2020

eISBN 978-3-7369-6292-7



ÍNDICE DE CONTENIDO

RIESGOS NATURALES EN LA CUENCA DEL RIO MIRA:

Variabilidad del clima, deslizamientos, incendios y vulneración volcánica.

Análisis de la relación del patrón climático ENOS sobre la dinámica del EVI en el páramo de la cuenca hidrográfica del río Mira, al norte de Ecuador9

Bryan Vallejo, Sakira Rivadeneira y Paúl Arias Muñoz

Aplicación del modelo Fuzzy para la determinación de la Susceptibilidad a Deslizamientos: caso de la Subcuenca del río Mataquí ubicada en la provincia Imbabura-Ecuador.....23

Andrés Escalante, Shirley Sandoval, Oscar Rosales y Paul Arias Muñoz

Zonificación de Áreas Propensas a Incendios de Cobertura Vegetal en la Subcuenca del Río Mataquí ubicada en la Provincia Imbabura41

Paúl Arias Muñoz, Gabriela Encarnación, Angélica Díaz y Fernanda Herrera

Zonificación de Cobertura Vegetal Propensa a Incendios en el Cantón Ibarra: Una Mirada al Centro Poblado Más Grande de la Cuenca del Río Mira.....57

Saúl Anrango, Merly Chingal y Paúl Arias Muñoz

Estrategias de Gestión de Riesgos de Incendios en la Reserva Ecológica El Ángel: Un Nuevo Paradigma para la Conservación de las Cuencas Hidrográficas a través de la Reducción de la Vulnerabilidad en las Áreas Protegidas.....75

Erika Angulo, Oscar Rosales y Fernanda Herrera

Análisis de la Vulnerabilidad Volcánica en Sectores Rurales: el caso de la Microcuenca Alta del Río Tahuando-Ecuador.....90

Diego Guerrero y Paul Arias Muñoz



PRÓLOGO

La presente publicación está dedicada al tema de Riesgos Naturales relacionados con variabilidad del clima, deslizamientos, incendios y vulnerabilidad volcánica. Se podría percibir que el análisis se centra en el medio ambiente físico natural contra el medio ambiente humano construido: fuerzas naturales que contrarrestan el desarrollo humano. Por su puesto que la idea es comprender el comportamiento de los eventos naturales extremos a través de la identificación de sus causas y el modelamiento predictivo de su ocurrencia. Sin embargo, los riesgos no se enmarcan únicamente dentro de procesos geográficos e hidro-climáticos del territorio, el denominado “paradigma fiscalista” señalado ya por Hewitt en su libro por el año 1983. Los desastres no son únicamente la manifestación de eventos físicos naturales, sino además son el producto de factores estructurales de condiciones sociales, económicas o ambientales. Es decir, la ocurrencia de eventos naturales extremos se origina en condiciones geológicas, hidrológicas, climáticas o geomorfológicas y con la modificación de éstas por procesos geodinámicos, vegetación y uso de la tierra, se desencadena el fenómeno que finalmente es gravado por actividades humanas que llegan a magnificar la intensidad del desastre.

Consecuentemente, un problema local puede convertirse en un factor subyacente del riesgo, al robustecer las condiciones de vulnerabilidad del territorio. De ahí la importancia de diferenciar los conceptos de peligro, susceptibilidad y vulnerabilidad. En el presente libro se analiza por diferenciado las tres fases de construcción del riesgo en diferentes áreas de estudio dentro de la cuenca hidrográfica del río Mira, y se da un especial énfasis a la cartografía de incidencia espacial. En cada capítulo se discuten las ventajas e inconvenientes de los distintos tipos de cartografía, se proponen conclusiones y recomendaciones para la mejora de su utilidad como documentos básicos en toma de decisiones en prevención del riesgo. Finalmente, la presente publicación busca ser una herramienta de educación y reflexión sobre las formas en que se construye el riesgo.

Paúl Arias Muñoz





Análisis de la relación del patrón climático ENOS sobre la dinámica del EVI en el páramo de la cuenca hidrográfica del río Mira, al norte de Ecuador

Bryan Vallejo¹, Sakira Rivadeneira¹ y Paúl Arias Muñoz¹

Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador. Correo de correspondencia: dparias@utn.edu.ec

Resumen

El patrón climático de Oscilación del Sur-El Niño ha atraído la atención de la comunidad científica internacional, debido a que se considera que constituye una de las principales fuentes de variabilidad climática global. En la presente investigación se analizó para el periodo 2000-2016, la relación del patrón climático ENOS sobre la dinámica del EVI en tres ecosistemas, Herbazal del páramo, Arbustal siempre verde-Herbazal del páramo y Rosetal caulescente-Herbazal del páramo, ubicados en la cuenca hidrográfica del río Mira. En consecuencia, se evaluó la dinámica temporal del páramo mediante el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), su relación con la precipitación y se determinó la existencia de anomalías estadística en sus valores en los periodos ENOS 2000-2009 y 2014-2015. Se comprobó que existe una relación entre la variación intra anual de la precipitación y la respuesta espectral interanual del páramo medida con el índice EVI. No obstante, el Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en sus dos fases (El Niño y La Niña) no ocasionó anomalías en la respuesta espectral del índice EVI. Así, se concluyó que en los años que se manifestó el patrón climático ENOS no existió influencia en el vigor de los tres ecosistemas.

Palabras clave: ENOS, Índice de Vegetación Mejorado, páramo.

Introducción

El clima en el planeta está definido por complejas interacciones entre el sol, los océanos, la atmósfera, la criósfera, las tierras emergidas y la biosfera (Ochoa et al., 2015). Los patrones climáticos son los factores meteorológicos que se desarrollan en la atmósfera y que determinan el clima local a corto plazo y afectan el desarrollo de la vida (Ochoa et al., 2015). A escala interanual se desarrolla un importante patrón climático producto de la interacción océano-atmósfera en el Pacífico ecuatorial, conocido con el nombre de El Niño-Oscilación del Sur, ENOS, en español o ENSO, en inglés (Bjerknes, 1969; Philander, 1983).

El patrón climático ENOS consiste en una oscilación de tres fases: una precursora, otra en la que se produce un aumento de las condiciones anómalas inicialmente frente a las costas de Perú y Ecuador y una última fase donde se retorna a las condiciones normales hasta casi un año después (Philander, 1983). En general al ciclo ENOS se lo puede categorizar en tres fases: una neutral, una fase cálida conocida como El Niño y una fase fría conocida como La Niña (Wang et al., 2020). Las dos últimas se presentan mediante un calentamiento o enfriamiento anormal de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el océano Pacífico ecuatorial central y oriental cada tres o siete años (Maturana et al., 2004; Martínez, 2009; Trenberth, 2019).

El Niño se asocia a un debilitamiento de los vientos alisios del este y un aumento anómalo de la temperatura superficial del océano Pacífico tropical, que provoca una profundización de la termoclina oceánica y el desplazamiento del centro de convección del oeste al centro del océano Pacífico tropical (Poveda y Mesa, 1996). La Niña, es su fase opuesta, y ocurre cuando



se produce una intensificación del funcionamiento de la celda de Walker por un reforzamiento de los vientos alisios, lo cual ocasiona una acumulación de aguas cálidas al oeste del Pacífico (Maturana et al., 2004; Comunidad Andina, 2008).

Aunque existen registros sobre los fenómenos de El Niño y La Niña desde las épocas de la colonia, su origen se remonta a escalas de tiempo geológico (Montealegre, 2007). Martínez (2009) estima que, al menos en Colombia, la primera presencia de eventos ENOS sucedió en la transición del Pleistoceno medio hacia el tardío. Mientras que, el uso de la expresión “El Niño” se concede a pescadores artesanales en la costa de Perú, quienes observaron un aumento estacional de la temperatura superficial del mar en los meses de diciembre cada cierto periodo de tiempo (Maturana et al., 2004). Los pescadores asociaron este evento inusual con las festividades de Navidad y el nacimiento del niño Jesús, de acuerdo a la creencia cristiana (Trenberth, 2019).

Hoy en día, se ha determinado que los pescadores peruanos denominaban “corriente de El Niño”, a una corriente estacional cálida que se presenta durante todos los años alrededor del mes de diciembre, que se traslada de norte a sur a lo largo de la costa de Ecuador y Perú, la cual desplaza la corriente fría de Humboldt (Glantz M. , 1996). La relación entre el fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur, fue reconocida primero por Bjerknes (1969) y el término ENSO (ENOS en español) fue reconocido por Philander (1983).

Ambas fases ENOS producen fuertes perturbaciones sobre la circulación atmosférica global (Poveda y Mesa, 1996), lo cual altera los regímenes de lluvia a escala global (Maturana et al., 2004), principalmente en zonas tropicales (Hernández, 2002). Esto trae como consecuencia sequías en zonas donde regularmente llueve y lluvias torrenciales en zonas usualmente desérticas (Poveda y Mesa, 1996). También el ENSO cambia la circulación extratropical lo cual genera inusuales precipitaciones en los inviernos del hemisferio norte (Philander, 1983; Hernández, 2002).

En Latinoamérica las perturbaciones climáticas asociadas al ENSO son conocidas. Se ha demostrado, por ejemplo, la influencia del ENOS en variables y eventos hidrometeorológicos como huracanes que afectan el Caribe noroccidental (Gray, 1992), o el incremento de los frentes fríos en Cuba (Hernández, 2002). En el norte de Sudamérica el ENSO se manifiesta a través del flujo de la corriente atmosférica, el Chorro del Chocó (Martínez, 2009). Esta corriente es un sistema convectivo tropical altamente sensible a los cambios de temperatura superficial del mar y de ahí al cambio climático regional o global (Chiang, 2009).

Al presentarse el fenómeno de El Niño en Sudamérica, normalmente en las áreas húmedas se originan largas sequías y en las áreas áridas se originan fuertes lluvias (Carmona y Muñoz, 2009). En la región se evidencia que El Niño afecta a los márgenes costaneros del Pacífico y además provoca daños a la infraestructura por el oleaje producido (Salazar et al., 2016). Un estudio realizado en países andinos ha demostrado que, al presentarse El Niño y La Niña, el régimen de lluvias se altera, genera una variabilidad climática y afecta el estado de los ecosistemas (Hofstede et al., 2014). El Niño produce precipitaciones intensas de poca altitud en la vertiente pacífica de los Andes, mientras que las zonas situadas por encima de los 2000 metros reciben menos lluvia y experimentan temperaturas más altas que en condiciones normales (Garreaud, 2009). No hay que olvidar que en Sudamérica la presencia de la Cordillera de los Andes ocasiona una gran influencia en los patrones climáticos regionales (Cuesta et al., 2012).

En Perú y Ecuador, aproximadamente cada seis años y durante un periodo entre 12 a 18 meses, El Niño genera torrenciales lluvias lo que ha ocasionado desastres naturales y sociales (Glantz, 2001, p.17). Sin embargo, en ambos países el impacto causado por las lluvias e

inundaciones ocurridas posiblemente durante los años de El Niño ha dejado visibles marcas en el ambiente natural (Glantz M. , 1996). En Ecuador se determinó una fuerte influencia de El Niño sobre la pluviometría en la mayor parte de la costa ecuatoriana, la cual disminuye cuando llega a la vertiente occidental de los Andes hasta ser casi nula en los valles interandinos y en la vertiente oriental de los Andes (Rossel, 1997).

Si bien el ENOS es uno de los patrones climáticos más estudiados, también hay que mencionar que es uno de los menos comprendidos. Los índices climáticos del ENOS son valores que pueden ser utilizados para describir el estado y los cambios en la interacción entre el sistema climático. De esta manera se pueden comprender los ciclos y el flujo de energía y materia en la atmósfera, a través de análisis estadísticos para la comparación de series de tiempo, estimación de medias e identificación de valores extremos y tendencias (Quiroz, 2011). Para facilitar la investigación del progreso en fases de los eventos ENOS, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) dividió el Océano Pacífico en cuatro regiones: Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 y Niño 4 (Figura 1). Por cada región se estudian varios índices que permiten conocer las características de una variabilidad climática.

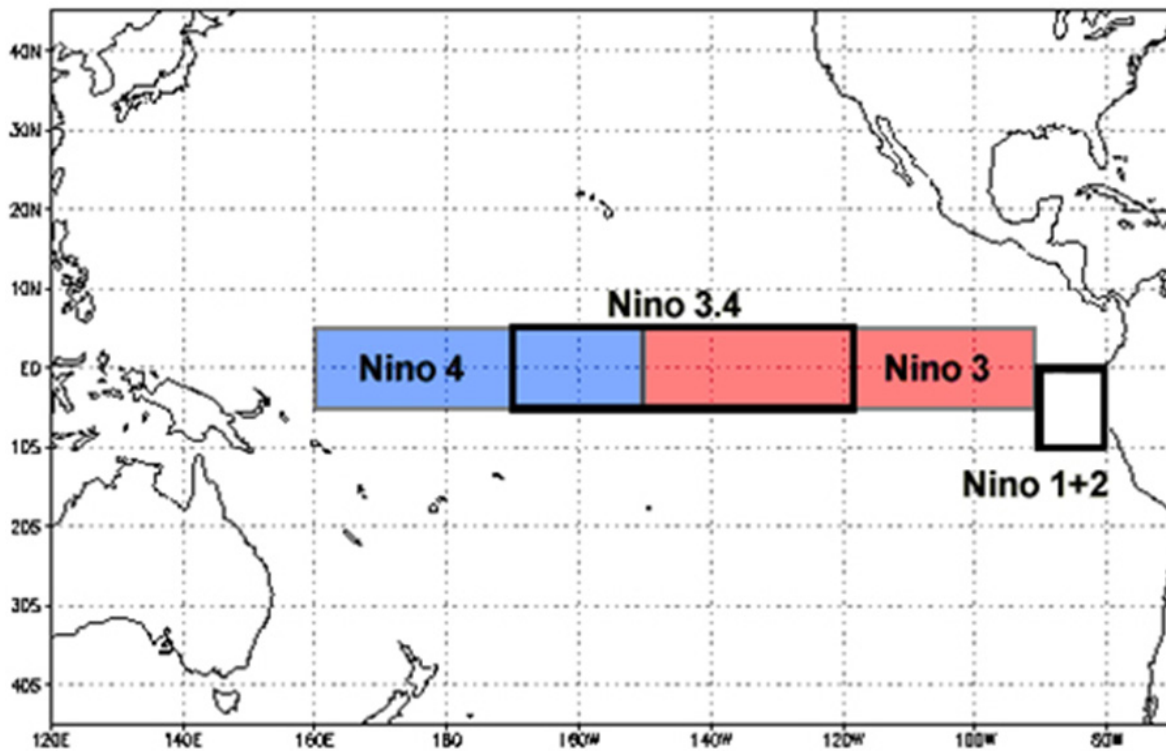


Figura 1. Regiones del Enos.

Fuente: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, 2020

El índice Multivariado ENSO (MEI) es un índice que indica la presencia de un evento ENOS, a través de la relación entre el factor océano-atmosférico con la medición de la diferencia entre la anomalía promedio mensual de presión atmosférica superficial en Tahití (Polinesia Francesa) y el puerto de Darwin (Australia). En el índice MEI los valores positivos representan la presencia de El Niño y cuando los valores son negativos representan La Niña (Quiroz, 2011).

A nivel mundial se han desarrollado varios trabajos que utilizan índices espectrales con el fin de investigar los impactos del patrón climático ENOS sobre la cobertura vegetal (Gutman et al., 2000; Propastin et al., 2010; Vijith y Dodge-Wan, 2020). El Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) ha sido el índice más utilizado para determinar la respuesta

de la vegetación a condiciones climáticas anómalas relacionadas con fenómenos ENOS (Salinas-Zavala et al., 2002; Park et al., 2020). Debido a que se demostró que los patrones espaciales y temporales de NDVI están en gran medida controlados por parámetros climáticos (Yang et al., 1998).

El índice de vegetación mejorada EVI también ha sido utilizado para determinar la respuesta de la vegetación y su relación con fenómenos externos (Moreira et al., 2019). El EVI se caracteriza por mejorar la calidad del índice NDVI porque corrige los efectos derivados por la nubosidad y los aerosoles en la atmósfera que bloquean la visión de los satélites (Gao et al., 2003; Poveda y Roldán, 2006). No obstante, la respuesta espectral tanto del EVI y NDVI es similar, así lo comprobaron Carvacho y Sánchez (2010) en su estudio de comparación de tres tipos de vegetación: agrícola, pradera y forestal en Chile.

Después de comparar valores promedios NDVI y EVI se demostró que cuando se presentaron El Niño y La Niña, en Colombia, la respuesta de la vegetación a la hidrología se modificó debido a las anomalías de precipitación (Poveda y Roldán, 2006). En las estepas argentinas se probó parcialmente la relación de las fases ENOS y las precipitaciones después de comparar valores medios de NDVI (Maggi et al., 2020). En una investigación realizada en quince ecosistemas en el sur de Ecuador, que incluía bosque siempre verde, bosque deciduo y herbazal de páramo, se concluyó que los cambios en la serie EVI se debieron a una influencia de la presencia de El Niño y La Niña (Maita, 2015).

Sin embargo, en el sector de los Andes al norte de Ecuador ocupado también por herbazal de páramo son muy pocos los estudios de las tendencias del clima y sus posibles impactos. Se conoce que la consecuencia inmediata de la presencia ENOS es la alteración en el régimen de precipitación durante las fases El Niño y la Niña. No obstante, la información sobre los impactos ENOS en los ecosistemas es escasa, debido a que generalmente la información es limitada en el NOAA. Los cambios en el régimen hídrico afectan la productividad de los ecosistemas (Maggi, et al., 2020), y se ha comprobado sus impactos en los páramos (Cárdenas y Tobón, 2017). Aquellos efectos se pueden determinar con el índice de vegetación mejorada (EVI). El índice de vegetación mejorado (EVI) tiene la finalidad de apartar la vegetación del brillo que produce el suelo, facilitando el cálculo e interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación (Rouse et al., 1974).

A partir de este análisis surgió la necesidad de comprender las relaciones entre la cobertura páramo con las precipitaciones de las distintas fases ENOS en el periodo 2000-2016. Debido a que se estima que dicha variabilidad impacta en la vigorosidad de los ecosistemas. En base a esa información, el objetivo principal de este trabajo fue caracterizar la dinámica de la cobertura vegetal estimada mediante el EVI en tres ecosistemas en la cuenca hidrográfica del río Mira. También se estudió las relaciones temporales entre el ENOS y la precipitación. De este modo, se planteó como hipótesis que la presencia ENOS en sus dos fases ocasiona anomalía en el vigor de los ecosistemas, medido a través del índice EVI.

Área de estudio

El área de estudio ocupa una superficie de 651,76 km² dentro de la cuenca del río Mira y corresponde a los espacios ocupados por los siguientes tipos de ecosistema: a) Herbazal del páramo, b) Arbustal siempre verde y Herbazal del páramo y c) Rosetal caulescente y Herbazal del páramo. Administrativamente la zona de investigación comprende sectores entre las provincias de Carchi e Imbabura (Figura 2).



Figura 2. Ubicación de la Cuenca Hidrográfica del Río Mira.

La cobertura páramo identificada en el área de estudio se caracteriza por presentar durante el año una única época, la lluviosa. Presenta dos picos pluviométricos en los meses de abril y noviembre. No existe una época seca, pero si una caída de la precipitación en los meses de mayo a septiembre (Figura 3).

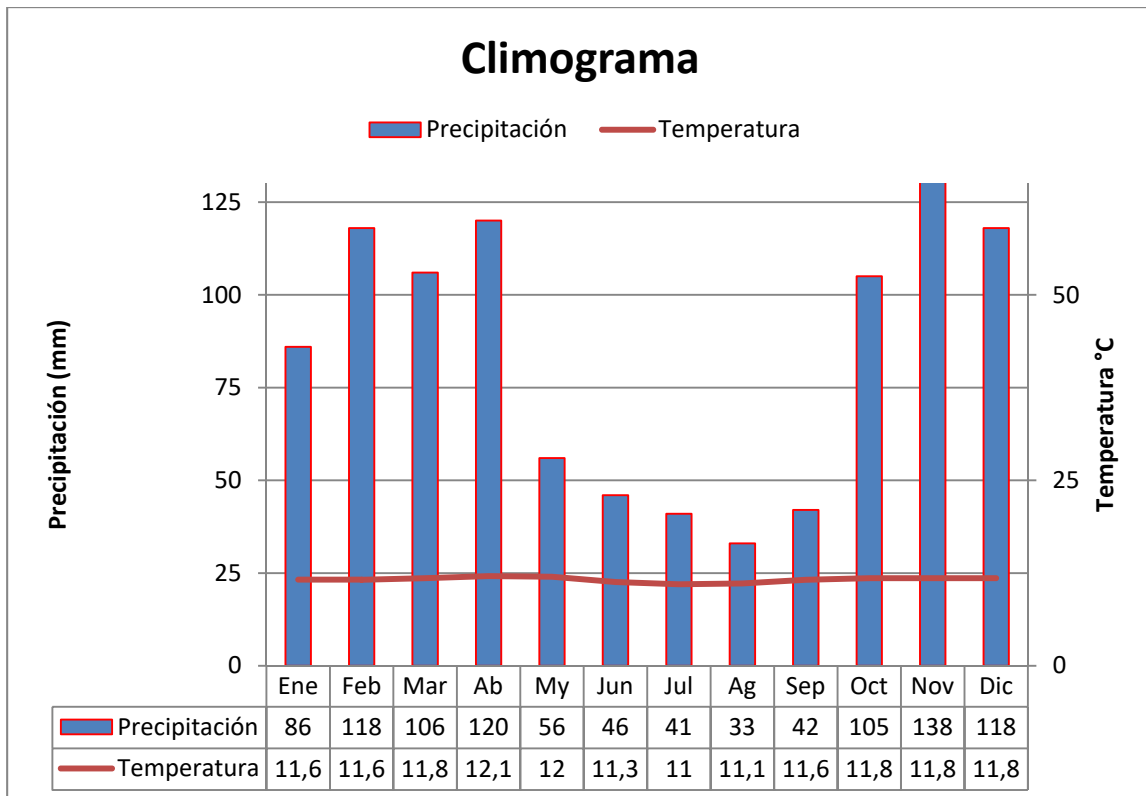


Figura 3. Climograma en la cobertura páramo en la cuenca del río Mira.
 Fuente: FAO (2005)

Caracterización de los ecosistemas

El ecosistema Herbazal del páramo se encuentra ubicado a 3400 - 4300 m s. n. m. de la cordillera occidental y central de los Andes con una superficie de 184,93 km². Se caracteriza por poseer suelos ricos en materia orgánica y una excelente capacidad hídrica por su alta humedad. La vegetación se encuentra dominada por los géneros *Calamagrostis*, *Agrostis*, *Festuca*, *Stipa*, *Diplostephium*, *Hypericum* y *Pentacalia* (Ramsay y Oxley, 1997).

El ecosistema Arbustal siempreverde y Herbazal del páramo se encuentra ubicado a 3300-3900 m s. n. m. de la cordillera occidental, central y oriental de los Andes con una superficie de 123,24 km². La vegetación está dominada por *Calamagrostis spp.*, y por los géneros *Baccharis*, *Gynoxys*, *Brachyotum*, *Escallonia*, *Hesperomeles*, *Miconia*, *Buddleja*, *Monnina* e *Hypericum* (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2013).

El ecosistema Rosetal caulescente y Herbazal del páramo se encuentra ubicado a 3350-4100 m s. n. m. de la cordillera central y oriental de los Andes con una superficie de 175,32 km². Este se caracteriza por poseer suelos bien drenados. La vegetación está dominada por *Calamagrostis intermedia* y *Espeletia pycnophylla* (Ramsay, 1992).

Métodos

Se analizó la influencia de los patrones climáticos ENOS, El Niño y la Niña, en la dinámica del páramo en la cuenca hidrográfica del río Mira mediante la aplicación del índice espectral de vegetación (EVI) durante el período 2000-2016. Inicialmente, se delimitó el área de estudio y se utilizó el mapa de cobertura de uso del suelo a escala 1:100000 (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2015). Después se descargaron imágenes del sensor pasivo MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer). Cada imagen se encuentra en formato TIFF (Tagged Image File Format) y contenía información binaria de 16 bits por pixel. Se

obtuvieron 748 imágenes tipo raster, entre febrero del 2000 a diciembre del 2016, para el área de estudio, debido a que el área comprendió dos tiles h10v08 y h10v09 (Figura 4). Es decir, se descargaron 374 imágenes por cada *tile*.

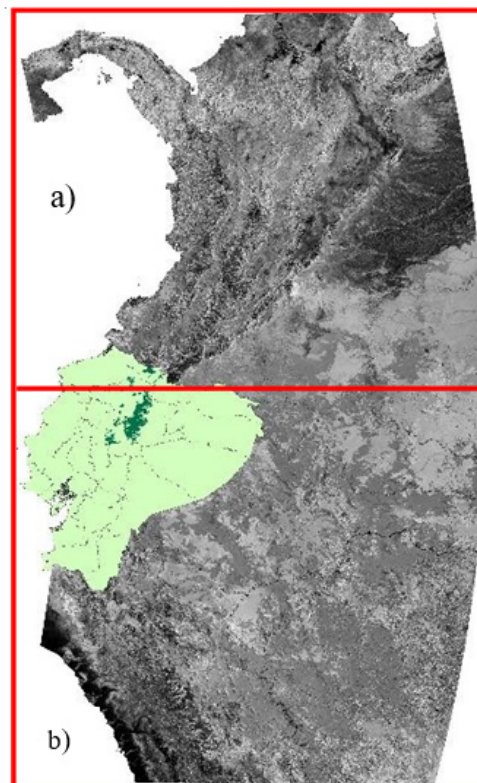


Figura 4. Tiles a) H10V08 y b) H10V09 Correspondientes al Área de Estudio.

A continuación, se calculó el índice de vegetación EVI para los tres ecosistemas: Herbazal del páramo (HsSn02), Arbustal siempre verde-herbazal de páramo (AsSn01) y Rosetal caulescente-herbazal del páramo (RsSn01) de forma mensual por los diecisiete años de estudio (2000-2016) mediante la aplicación de la Ecuación (1).

$$EVI = 2,5(banda\ IR - bandaR)/(banda\ IR + C1 * banda\ R - C2 * banda\ B + L) \quad (1)$$

Donde:

Banda IR = es la banda del infrarrojo cercano

Banda R = es la banda visible roja

Banda B = es la banda visible azul

L= (0 para vegetación densa, 0,5 para cobertura intermedia y 1 para vegetación rala)

C1 = 6, C2 = 7,5 son los coeficientes adoptados en el algoritmo

Los valores del EVI fluctúan entre -1 y 1, y están en función de la energía absorbida. Cuando los valores son mayores a cero, es porque existe vegetación viva y si presenta valores negativos representan superficies sin vegetación, que también puede ser: nieve, cuerpos de agua y rocas (Figura 5) (Poveda y Roldán, 2006).



Figura 5. Simbología del Índice de Vegetación EVI.

Obtenidos los valores EVI de forma mensual por el periodo 1990-2016 se comprobó la presente hipótesis a) Existe relación entre la oscilación de la precipitación mensual multianual con la oscilación de la vigorosidad del páramo multianual. Para ello, se aplicó la prueba estadística de correlación de Spearman y se categorizó la transición mensual de los valores. Al momento que aumentó un valor entre dos meses se estableció una variable dummy con valor (1), y cuando se redujo un valor entre dos meses se estableció un variable dummy con valor (2).

Posteriormente se aplicó la ecuación de Grubbs (Ecuación 2) y se comprobó la presente hipótesis a) existe datos anómalos entre los promedios EVI de los tres ecosistemas durante el periodo 2000-2016 y en los periodos 2009-2010 y 2014-2015.

$$gmax = \frac{x - \hat{x}}{\sigma} \quad (2)$$

Donde:

σ = desviación estándar

\hat{x} = promedio

x= valor considerado anómalo

Resultados y discusión

Se presentó una variación mensual y anual en los valores del índice de vegetación EVI en la cobertura páramo. Para el periodo 2000-2016 los valores EVI, en general del páramo, mensualmente mantienen una tendencia y una distribución espacial. El análisis temporal confirma que se alcanzó la cúspide de EVI al mismo tiempo que en la precipitación (Figura 6). En efecto, la precipitación y EVI alcanzaron sus máximos valores en abril y noviembre. Sin embargo, la presencia de única época lluviosa durante todo el año ocasiona que la variabilidad mensual del EVI sea mínima.

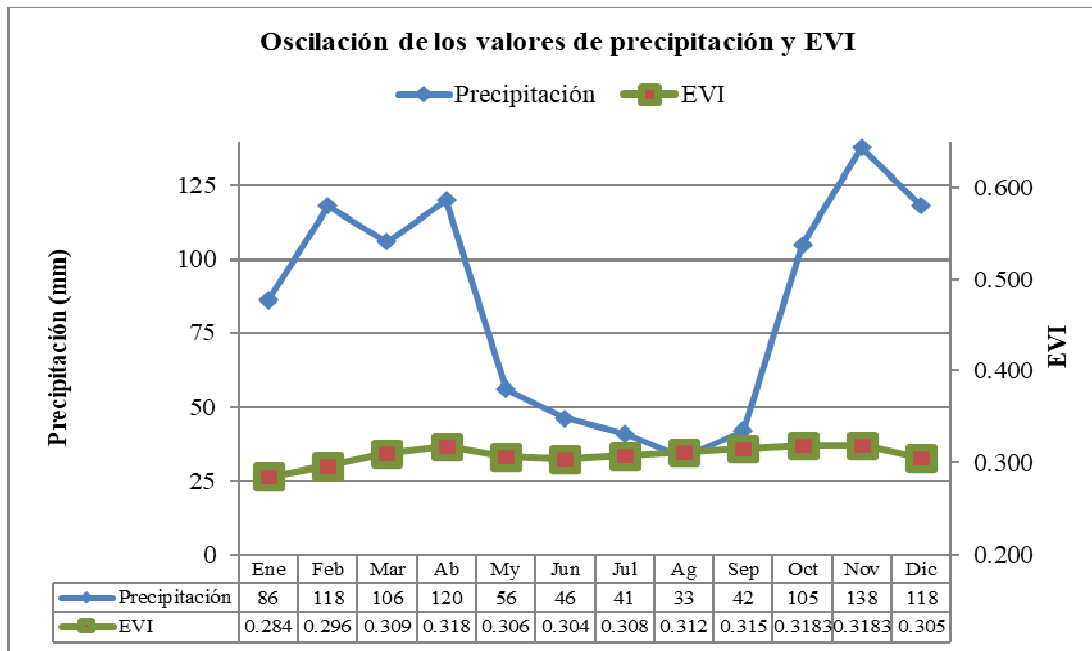


Figura 6. Oscilación de los valores de precipitación y EVI para el periodo 2000-2016.

De este modo, se observó que la variación de valores para ambos casos, precipitación y EVI, es muy similar. Por ejemplo, se observó que en la transición de enero a febrero aumentaron tanto los valores de precipitación como los valores del coeficiente EVI. Esta relación se comprobó para la transición entre todos los meses gracias a los resultados de la prueba estadística Spearman, que presentó un nivel de significancia de 0,019 (Tabla 1). Es decir, se acepta una correlación entre el aumento y/o disminución de los valores EVI con los valores de pluviosidad. Es decir, cuando el índice EVI presenta valores altos existe alta concentración de agua lo que se traduce en vigorosidad de la planta. En consecuencia, se concluye que cuando aumenta la precipitación, aumenta el vigor en el páramo y viceversa.

Tabla 1.

Análisis estadístico de la influencia de la precipitación sobre EVI.

Transición Mensual	Precipitación		EVI		Correlación	Nivel significancia
	Transición	Categoría	Transición	Categoría		
Enero – Febrero	Aumenta	1	Aumenta	1	0,691	0,019
Febrero – Marzo	Disminuye	2	Aumenta	1		
Marzo – Abril	Aumenta	1	Aumenta	1		
Abril - Mayo	Disminuye	2	Disminuye	2		
Mayo – Junio	Disminuye	2	Disminuye	2		
Junio – Julio	Disminuye	2	Aumenta	1		
Julio – Agosto	Disminuye	2	Disminuye	2		
Agosto – Septiembre	Aumenta	1	Aumenta	1		
Septiembre – Octubre	Aumenta	1	Aumenta	1		
Octubre – Noviembre	Aumenta	1	Aumenta	1		
Noviembre – Diciembre	Disminuye	2	Disminuye	2		

Respuesta espectral a la influencia ENOS por ecosistema

Los tres ecosistemas: Herbazal del páramo (HsSn02), el Arbustal siempre verde-herbazal de páramo (AsSn01) y Rosetal caulescente-herbazal del páramo (RsSn01) presentan similar tendencia espectral EVI. Es decir, el comportamiento del vigor del páramo ha sido similar en los tres ecosistemas durante el periodo 2000-2017, con leves diferencias en los promedios espectrales.

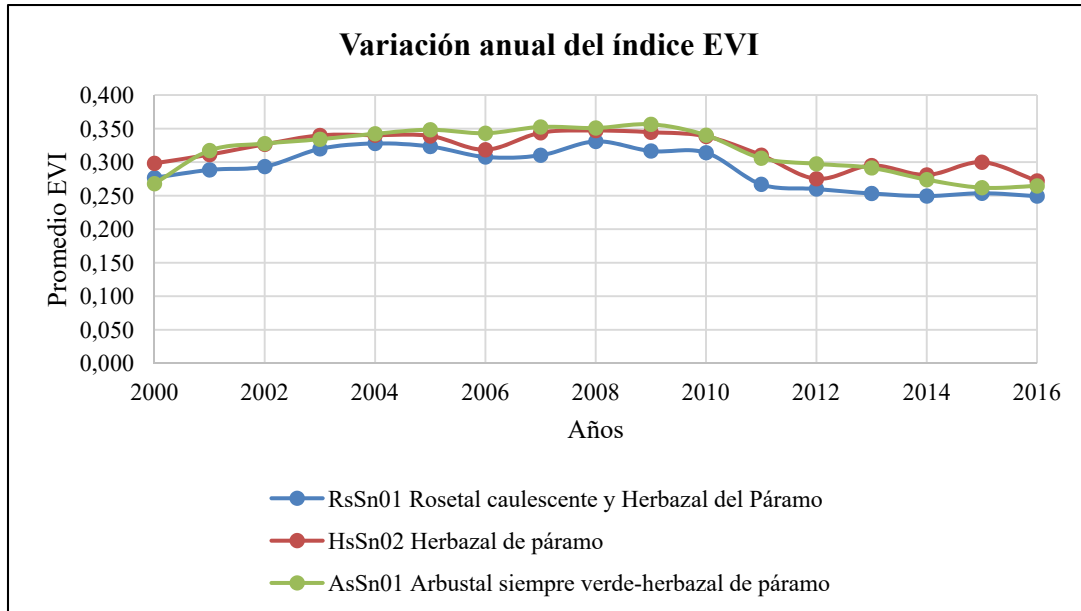


Figura 7. Promedio Anual del Espectro del Índice EVI para los ecosistemas durante el periodo 2000-2016.

Los ecosistemas HsSn02, HsSn02 presentan similar promedio espectral EVI, mientras que el ecosistema RsSn01 presenta menor respuesta espectral. Esto pese a que los tres ecosistemas se ubican entre los mismos niveles altitudinales (3400-4300 m s. n. m.). No obstante, el ecosistema Rosetal caulescente y Herbazal del páramo está ubicado en zonas más bajas, entre 3350 y 4100 m s. n. m., por lo que estaría expuesto a actividades antrópicas. De acuerdo con el Ministerio de Ambiente del Ecuador (2013), las quemas asociadas a la agricultura y ganadería extensiva han provocado disminución en la densidad de la vegetación de páramo.

Por otro lado, de acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba estadística Grubbs, en ningún año del periodo existió anomalía en el comportamiento del vigor de los tres ecosistemas, HsSn02, HsSn0, RsSn01. Incluso no se identificó ninguna anomalía en los periodos ENOS: 2009-2010 y 2014-2015 (Tabla 2). Es decir, El Niño y la Niña no ocasionaron ninguna anomalía en el comportamiento de la vigorosidad de los ecosistemas páramo en la cuenca del río Mira.

Tabla 2.

Análisis de datos anómalos EVI de acuerdo a la prueba de Grubbs.

Año	Cob*	Rs	Hs	As	Páramo	Rs	Hs	As	g tabular
	Páramo	Sn01	Sn02	Sn01		Sn01	Sn02	Sn01	
Valores EVI					Prueba de Grubbs calculada g calculado				
2000	0,281	0,277	0,298	0,268	-0,920	-0,461	-0,706	-1,424	2,47
2001	0,305	0,289	0,311	0,317	-0,073	-0,073	-0,204	0,032	
2002	0,315	0,293	0,327	0,328	0,276	0,089	0,387	0,337	
2003	0,331	0,320	0,340	0,334	0,803	0,961	0,900	0,528	
2004	0,336	0,328	0,340	0,342	0,992	1,226	0,912	0,769	
2005	0,336	0,323	0,339	0,348	0,997	1,077	0,871	0,945	
2006	0,323	0,308	0,319	0,343	0,524	0,562	0,076	0,793	
2007	0,335	0,310	0,344	0,352	0,949	0,646	1,053	1,069	
2008	0,343	0,331	0,347	0,351	1,204	1,326	1,178	1,023	
2009	0,339	0,317	0,345	0,356	1,075	0,856	1,083	1,184	
2010	0,330	0,314	0,338	0,340	0,790	0,771	0,843	0,706	
2011	0,294	0,267	0,310	0,306	-0,460	-0,784	-0,238	-0,304	
2012	0,277	0,260	0,275	0,297	-1,037	-1,014	-1,594	-0,554	
2013	0,279	0,253	0,295	0,291	-0,956	-1,234	-0,831	-0,731	
2014	0,268	0,249	0,281	0,274	-1,361	-1,360	-1,373	-1,248	
2015	0,271	0,254	0,300	0,262	-1,234	-1,224	-0,641	-1,602	
2016	0,262	0,249	0,272	0,265	-1,570	-1,363	-1,716	-1,523	
X*	0,308	0,291	0,317	0,316					
σ^*	0,0291	0,030	0,025	0,0339					

*Cob=Cobertura

*X=Promedio

* σ =Desviación estándar

** Años con presencia del patrón climático ENOS

Se demostró que el EVI es un buen indicador para diferenciar el vigor de los ecosistemas, Herbazal del páramo (HsSn02), el Arbustal siempre verde-herbazal de páramo (AsSn01) y Rosetal caulescente-herbazal del páramo (RsSn01) ubicados en la cuenca hidrográfica del río Mira. Aun cuando los tres ecosistemas muestran valores intermedios de EVI, ninguno de estos fue estadísticamente diferente (Tabla 1). Esto coincide con lo señalado por Garreaud (2009) de que no existe influencia del Niño-Oscilación del Sur (ENSO) en la producción de precipitaciones por encima de los 2000 m s. n. m. Además, Rossel (1997), señala que la influencia del ENOS disminuye en las vertientes oriental y occidental de los Andes ecuatorianos, sectores donde están ubicados los tres ecosistemas estudiados.

Conclusiones

La presente investigación permitió caracterizar la dinámica de la cobertura páramo y sus relaciones con la oscilación de la precipitación intra anual en una zona que posee escasos datos e información. El EVI obtenido a partir del sensor MODIS entregó información diferenciada para los distintos ecosistemas páramo en la cuenca del río Mira. Se probó que existe una relación entre la variación intra anual de la precipitación y la respuesta espectral interanual del páramo medida con el índice EVI. No obstante, no se determinó la influencia del Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en sus dos fases (El Niño y La Niña) sobre la respuesta espectral del índice EVI.



Ello no evidencia ningún grado de conexión climática del fenómeno ENSO con una afectación de precipitaciones y el EVI en los páramos de la cuenca hidrográfica. Esto sugiere que los efectos de las alternancias de las fases del ENSO en el EVI no producen cambios en el vigor de los ecosistemas Herbazal del páramo, Arbustal siempre verde-herbazal de páramo y Rosetal caulescente-herbazal del páramo. Estos resultados aportan mucha información que contribuye a la comprensión de los efectos del fenómeno ENSO en la cobertura vegetal páramo ubicada a lo largo de la región interandina. Sin embargo, se recomienda profundizar las investigaciones en los páramos con series más largas que permitan confirmar o contrarrestar las nulas relaciones existentes entre el fenómeno ENSO y el EVI encontradas aquí.

Referencias

- Administración Nacional Oceánica y Atmosférica. (2020). *Description of Changes to Ocean Niño Index (ONI)*. Obtenido de Description of Changes to Ocean Niño Index (ONI): http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_ch_ange.shtml
- Bjerknes, J. (1969). Atmospheric teleconnections from the equatorial. *Monthly Weather Rev.* 115, 51-74.
- Cárdenas, M. F., y Tobón, C. (2017). Recuperación del funcionamiento hidrológico de ecosistemas de páramo en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 20 (2), 403-412.
- Carmona, J. C., y Muñoz, J. (2009). Comparación y manejo de los diferentes riesgos del agua, en los aspectos social, económico y de la salud general. *Luna Azul.* (29), 68-81.
- Carvacho, L., y Sánchez, M. (2010). Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. En J. Ojeda, M. F. Pita, & I. Vallejo, *Tecnologías de la Información Geográfica: La información Geográfica al servicio de los ciudadanos* (págs. 728-737). Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Chiang, J. C. (2009). The Tropics in Paleoclimate. . *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 37, 263-297.
- Comunidad Andina. (2008). *El Cambio Climático no tiene fronteras*. Lima: Dot Print SAC.
- Cuesta, F., Muriel, P., Beck, S., Meneses, R., Halloy, S., Salgado, S., . . . y Becerra, M. (2012). *Biodiversidad y Cambio Climático en los Andes Tropicales-Conformación de una red de investigación para monitorear sus impactos y delinear acciones d*. Lima-Quito: CONDESAN.
- Gao, X., Huete, A., y Didan, K. (2003). Multisensor comparisons and validation of MODIS vegetation indices at the semiarid Jornada Experimental Range. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (10), 2368- 2381.
- Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather . *Advances in Geosciences* 22, 3-11.
- Glantz, M. (1996). *Corrientes de Cambio: El Impacto de El Niño sobre el Clima y la Sociedad*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Glantz, M. (2001). *Currents of change. Impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society*. Cambridge: University Press.



- Gray, W. (1992). Update forecast of Atlantic Seasonal Hurricane Activity for 1992. *Climate Diagnostics Bulletin* 92(7), 44-45.
- Gutman, G., Csiszar, I., y Romanov, P. (2000). Using NOAA/AVHRR Products to Monitor El Niño Impacts: Focus on Indonesia in 1997–98. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1189-1205.
- Hernández, B. (2002). El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y los frentes fríos que arriban a la región occidental cubana. *Investigaciones marinas*, 1-19.
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., . . . y Cerra, M. (2014). *Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. Quito: UICN.
- Maggi, A., Ponienan, K., Castro, N., y Di Ferinando, M. (2020). Dinámica del NDVI en distintas fases del fenómeno ENSO en la Reserva de Biósfera Laguna Blanca (Catamarca, Argentina). *Ecología Austral* 30, 151-164.
- Maita, J. A. (2015). *Dinámica espacio temporal del índice de Vegetación Mejorada (EVI) en los ecosistemas del sur del Ecuador*. Cuenca: Universidad del Azuay (tesis de maestría).
- Martínez, J. (2009). La Historia Cenozoica del Fenómeno del Niño. *Revista Académica Colombiana de Ciencias* 33 (129), 492-511.
- Maturana, J., Bello, M., y Manley, M. (2004). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. En S. Avaria, J. Carrasco, J. Rutllant, & E. (Yáñez, *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile*. (págs. 13-27). Valparaíso: CONA.
- Ministerio de Ambiente del Ecuador. (2013). *Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Segunda Edición*. Quito, Ecuador.
- Ministerio de Ambiente del Ecuador. (2015). *Mapa de cobertura de uso del suelo a escala 1:100000*. Quito: Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo.
- Montealegre, J. E. (2007). *Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.
- Moreira, A., Fontana, D. C., y Kuplich, T. M. (2019). Wavelet approach applied to EVI/MODIS time series and meteorological data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 147, 335-344.
- Ochoa, M., Castellanos, R., Ochoa, Z., y Oliveros, J. L. (2015). Variabilidad y cambio climáticos: su repercusión en la salud. *MEDISAN* 19 (7), 1-13.
- Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). (2005). *Local Climate Estimator*. Obtenido de Local Climate Estimator: <http://itirrigation.thematrix.it/index.php/en/component/phocadownload/category/5-new-locclim?download=9:new-locclim-1-10>
- Park, S., Kang, D., Yoo, C., Im, J., y Lee, M.-I. (2020). Recent ENSO influence on East African drought during rainy seasons through the synergistic use of satellite and reanalysis data. *SPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 162, 17-26.
- Philander, S. (1983). El Niño Southern Oscillation phenomena. *Nature*, 295-301.



- Poveda, G., y Mesa, O. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y la Niña) y su influencia sobre la hidrología en Colombia. *Ingeniería Hidráulica en México XI (1)*, 21-37.
- Poveda, G., y Roldán, P. (2006). Variabilidad espacio-temporal de los índices NDVI y EVI. Aplicación a cinco regiones colombianas. *Meteorología Colombiana*(10), 47-59.
- Propastin, P., Fotso, L., y Kappas, M. (2010). Assessment of vegetation vulnerability to ENSO warm events over Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 125, 583–589.
- Quiroz, M. C. (2011). "Anexo del Informe Técnico: Elaboración de un boletín con información hidroclimática de los mares de México."
- Ramsay, P. (1992). *The páramo vegetation of Ecuador: The community ecology, dynamics and productivity of tropical grasslands in the Andes*. Wales.
- Ramsay, P., y Oxley, E. (. (1997). The growth form composition of plant communities in the ecuadorian páramos. *Plant Ecology*, 131, 173-192.
- Rossel, F. (1997). *Influencia del Niño sobre los regímenes hidro-pluviométricos en Ecuador*. Quito: Cooperación Franco-Ecuatoriana.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., y Deering, D. (1974). Monitoring vegetation system in the Great Plains with ERTS. En S. M. Fraden, *Third ERTS-1 Symposium* (págs. 309-317). Washington: NASA.
- Salazar, G., Ortiz, C., y Suing, A. (2016). Fenómeno de El Niño en Ecuador: su impacto en televisión y redes sociales. *REDES 13 (197)*, 197-215.
- Salinas-Zavala, C., Douglas, A., y Diaz, H. (2002). Interannual variability of NDVI in northwest Mexico. Associated climatic mechanisms and ecological implications. *Remote Sensing of Environment* 82 , 417–430.
- Trenberth, K. (2019). El Niño Southern Oscillation (ENSO). En J. K. Cochran, H. J. Bokuniewicz, y P. Yager, *Encyclopedia of Ocean Sciences* (págs. 1-13). Massachusetts: Academic Press.
- Vijith, H., y Dodge-Wan, D. (2020). Applicability of MODIS land cover and Enhanced Vegetation Index (EVI) for the assessment of spatial and temporal changes in strength of vegetation in tropical rainforest region of Borneo. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, pre-proof.
- Wang, B., Feng, P., Waters, C., Cleverly, J., De Li, L., y Yu, Q. (2020). Quantifying the impacts of pre-occurred ENSO signals on wheat yield variation using machine learning in Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1-13.
- Yang, L., Wylie, B. K., Tieszen, L. L., y Reed, B. C. (1998). An Analysis of Relationships among Climate Forcing and Time-Integrated NDVI of Grasslands over the U.S. Northern and Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment* 65 (1), 25-37.



Aplicación del modelo Fuzzy para la determinación de la Susceptibilidad a Deslizamientos: caso de la Subcuenca del río Mataquí ubicada en la provincia Imbabura-Ecuador

Andrés Escalante¹, Shirley Sandoval¹, Oscar Rosales¹ y Paul Arias Muñoz¹

Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador. Correo de correspondencia: dparias@utn.edu.ec

Resumen

Los deslizamientos representan el 9% de los desastres ocurridos en la década de 1990s a nivel mundial. En el cantón Pimampiro, límite administrativo donde se ubica la subcuenca del río Mataquí, entre el año 2011 y 2019 se registraron 23 movimientos de remoción de masa, entre deslizamientos, deslaves y flujos de lodo. En la presente investigación se determinó el peligro a deslizamientos en la subcuenca del río Mataquí. Se analizó la susceptibilidad a deslizamientos de ladera, mediante la aplicación de la metodología Fuzzy, para lo cual se consideraron las siguientes variables: precipitación, cobertura vegetal, litología, pendientes, distancia a ríos, distancias a vías, y distancias a fallas geológicas. Los resultados mostraron que alrededor del 98% de la superficie de la subcuenca presenta una susceptibilidad alta y muy alta a deslizamientos.

Palabras clave: deslizamiento, Fuzzy, susceptibilidad.

Introducción

Los desastres naturales son una amenaza a la vida humana y a la economía global. En países en vías de desarrollo las consecuencias de los desastres naturales llegan a ser catastróficas, debido a la falta de inversión social en la población, lo cual genera vulnerabilidad en la población (Alcántara-Ayala, 2002). Se estima que los impactos de los desastres naturales aumentan la brecha entre países ricos y pobres (Khan et al., 2020). Por ejemplo, en el periodo 1970-2002 se produjeron 6436 desastres naturales, de los cuales el 77% ocurrieron en países en vías de desarrollo ocasionando impactos económicos que condicionan el desarrollo (Strobl, 2012). Entre los desastres por fenómenos naturales ocasionados por el movimiento de grandes masas de tierra, están los corrimientos de tierra o deslizamientos causados por la inestabilidad de ladera o pendiente (Varnes, 1984). De hecho, los deslizamientos representan el 9% de los desastres ocurridos en la década de 1990s a nivel mundial (Gómez y Kavzoglu, 2005).

El origen del término movimiento de remoción en masa (*mass movement*) partió como una diferenciación de términos realizado por Penck (1894) entre movimiento de masa (*mass movement*) y transporte de una masa (*mass transport*). El primer término hace referencia al movimiento de un cuerpo por influencia de la gravedad mientras el segundo hace alusión al transporte de un cuerpo efectuado por un agente como el agua. El término deslizamiento de tierra (*landslide*) fue acuñado primero por Sharpe (1938) con el fin de definir el movimiento de masa de tierra ladera abajo por influencia de la gravedad. Varnes (1958) incluyó al término el desplazamiento por la ladera tanto de masa de tierra como de elementos artificiales producto del fenómeno. Sin embargo, fue Coates (1977) quien incluyó a los deslizamientos como una categoría dentro de los movimientos de remoción en masa.

Es decir, se define como el deslizamiento como el movimiento y desprendimiento de una parte del material superficial (suelos, agregados, rocas) de una ladera., por la acción directa

de la fuerza de la gravedad, hasta encontrar un nuevo punto de reposo (Alcántara-Ayala, 1999). Mientras que, el concepto de remoción en masa engloba más procesos geofísicos, conocidos como: flujos (de barro, de detritos, lahares, reptación y solifluxión), deslizamientos (bloques rocosos, detritos), desprendimientos y aludes (Cruden, 1991). El peligro o amenaza de deslizamiento es considerado como la probabilidad de ocurrencia del desplazamiento de tierra ladera abajo, en un tiempo y espacio determinado (Varnes 1984; Fell, 1994).

La probabilidad espacial de deslizamiento corresponde a la susceptibilidad que se relaciona con factores estáticos o intrínsecos como: pendiente, litología, distancia a las vías, cobertura y uso de suelo (Chowdhury, 1976). En cambio, la probabilidad temporal se relaciona con factores dinámicos o externos como: lluvia, terremotos o erupciones volcánicas (Van Westen et al., 2005). A estos últimos factores se los considera como detonantes de susceptibilidad (Dahal et al., 2008). Se ha modelado la susceptibilidad a deslizamientos a través del uso de dos tipos de metodologías: cualitativas y cuantitativas. En el enfoque cuantitativo se utiliza, generalmente, el juicio de expertos (Zare et al., 2013).

El enfoque cuantitativo se basa en modelos y aplicaciones matemáticas (Neaupane y Achet, 2004). En ambos enfoques, el uso del sistema de información geográfica (SIG) para el modelado de susceptibilidad a deslizamientos se ha utilizado cada vez más (Zare et al., 2013), porque incluso ha permitido automatizar los procesos y reducir el trabajo en campo sin perder la confiabilidad de los resultados (Yalcin, 2008).

Los modelos de deslizamientos de predicción cuantitativa generalmente se basan en tres marcos metodológicos: a) teoría de probabilidad; 2) teoría de conjuntos difusos; 3) teoría de la evidencia Dempster-Shafter (D-S). Todas estas teorías buscan predecir deslizamientos futuros y se basan en dos premisas: la evidencia pasada y la representación espacial (Tangestani, 2009). La primera premisa señala que los deslizamientos futuros ocurrirán bajo las mismas circunstancias que los deslizamientos pasados ocurridos, ya sean en el área de estudio o en áreas similares de las cuales los expertos han obtenido información. La segunda señala que los datos espaciales que representan los factores detonantes o causas pueden ser almacenados en base de datos GIS.

Se han desarrollado varios estudios que cartografían la susceptibilidad a deslizamientos utilizando GIS y modelos de probabilidad (Guzzetti et al., 1999; Castellanos-Abella y Van Westen, 2008; Althuwaynee et al., 2012; Zare et al., 2013; Althuwaynee et al., 2014; Demir, 2019; Berhan et al., 2020) pero son limitados los estudios que utilizan la metodología Fuzzy (Pradhan, 2010, 2013; Chen et al., 2019; Leonardi et al., 2020).

La idea de la lógica difusa es considerar los objetos espaciales en un mapa como miembros de un conjunto (Zadeh, 1965). En la teoría de conjuntos difusa, la pertenencia puede tomar cualquier valor entre 0 y 1, lo cual refleja el grado de pertenencia. Al trabajar en SIG con capas temáticas, generalmente el atributo de interés se mide en intervalos discretos, y la función de pertenencia se puede expresar como una tabla que relaciona las clases temáticas con los valores de la pertenencia.

En Ecuador durante el período 1970 - 2019 se han registrado 7836 casos de movimientos de remoción en masa, incluyendo deslizamientos, deslaves y flujos de lodo (Desinventar, 2020). De acuerdo con la misma base de datos, normalmente, el factor detonante fue las fuertes precipitaciones presentadas en las diversas zonas afectadas. Los daños en Ecuador son comúnmente en las redes viales del país, lo cual ocasiona problemas de comunicación y pérdidas económicas para el país (Ortiz, 2013). Debido a la frecuencia de eventos de deslizamientos, en el Ecuador se han realizado estudios de evaluación tanto de la amenaza o

peligro generalmente utilizando metodologías cualitativas (Demoraes y D'Ercole, 2001; D'Ercole y Trujillo, 2003) y de la vulnerabilidad por exposición (D'Ercole y Metzger, 2004).

En el cantón Pimampiro, límite administrativo donde se ubica la subcuenca del río Mataquí únicamente se reportan deslizamientos a partir del año 2011, donde para el periodo 2011-2019 ocurrieron 23 movimientos de remoción de masa, entre deslizamientos, deslaves y flujos de lodo (Desinventar, 2020). Sin embargo, esto no significaría que en años anteriores no ocurrieron deslizamientos, sino que no existió una cultura de registrar la ocurrencia de los eventos. Esto sin duda ocasiona una falta de desconocimiento de los efectos de los deslizamientos en el sector y no ha permitido que se implementen herramientas de prevención. Porque únicamente los 23 deslizamientos identificados han ocasionado pérdidas materiales, pérdidas humanas y han afectado de forma recurrente tramos de la vía San Francisco de Sigsipamba-Pimampiro, y la cabecera cantonal de Pimampiro (Desinventar, 2020). Debido a que, en áreas, como la subcuenca del río Mataquí, donde existen asentamientos humanos en zonas montañosas, el riesgo es mayor para las personas e implica costos sociales y económicos.

No cabe duda, que los deslizamientos son la consecuencia más común de la inestabilidad de ladera debido a condiciones estáticas como la cobertura de suelo y factores dinámicos como la actividad sísmica y precipitación. Por ese motivo, el objetivo principal del presente estudio fue evaluar el peligro de deslizamiento en la subcuenca del río Mataquí, mediante el uso del método lógica difusa. Debido a que en el sector se registra de forma recurrente deslizamientos y presenta cercanía a fallas geológicas y alta precipitación por zonas. Se planteó operaciones entre variables estáticas y dinámicas bajo el marco metodológico del conjunto difuso. Entre las variables dinámicas se incluyó la presencia de precipitación e inestabilidad sísmica. De esta manera, se obtuvo un modelo cuantitativo de probabilidad-deslizamiento para el área de estudio además se identificó los lugares que presentan mayor susceptibilidad. Con los resultados obtenidos, se espera representar el peligro a deslizamiento en diferentes sectores de la subcuenca del río Mataquí y la generación de conciencia en la comunidad sobre el peligro al cual se está expuesto.

Área de estudio

La subcuenca del río Mataquí está ubicada en el sector sur oriental de la cuenca del río Mira y ocupa el 6,69% de la cuenca. En la subcuenca se incluye las parroquias Mariano Acosta y San Francisco de Sigsipamba, y parte de las parroquias de Pimampiro y Chuga pertenecientes al cantón Pimampiro en la provincia Imbabura (Figura 8).

La subcuenca tiene un área de 356,16 km² y un perímetro de 91,14 km, la longitud del río principal es de 8,12 km y la altitud media es de 2254, 76 m s. n. m. Su precipitación promedio fluctúa entre 500 y 1000 mm. Se encuentra entre los climas Ecuatorial Mesotérmico Semi-húmedo con temperaturas anuales que oscilan entre 12 y 20 °C. Mientras que la parte alta de la cuenca cuenta con un clima Ecuatorial Frío de Alta Montaña, con temperaturas inferiores a 8 °C (Pourrut, 1983). La geología del área de estudio está conformada por: andesitas, brechas, granodioritas, pegmatitas, anfibolitas, depósitos aluviales, coluviales, y rocas metamórficas no diferenciadas.

En lo que concierne a los asentamientos humanos de acuerdo al V Censo de Población y VI Censo de Vivienda se estima que un 7% se auto identifica como indígena, mientras que el 4% de la población en la cuenca se auto identifica como afrodescendiente (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2010). La principal actividad económica es la agricultura, donde el 20% de la población se dedica a esta actividad. Seguido por el comercio, siendo esta la segunda actividad a la que se dedica la población en un 17%. Finalmente se estima que para

el año 2020 alrededor de 5000000 personas habitan la cuenca (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2020).



Figura 8. Mapa de Ubicación de la Subcuenca del Río Mataquí en la Cuenca del Río Mira.

Métodos

El estudio se dividió en dos etapas: en la primera, se determinó la susceptibilidad mediante el método la Lógica de Fuzzy; y en la segunda se validó el modelo de susceptibilidad mediante la aplicación de la Curva ROC.

En la Etapa I se zonificó el grado de susceptibilidad a deslizamientos mediante el uso de la metodología Fuzzy. Se identificó y cartografió variables estáticas y dinámicas. Las variables predictoras estáticas fueron: litología, pendientes, uso y cobertura de suelo, geología, distancia a vías de comunicación, distancia a ríos. Las variables predictoras dinámicas fueron: distancia a las fallas geológicas y precipitación. En total siete variables se representaron con cartografía temática, a través del uso de archivos SIG tipo raster. Con el fin de aplicar la metodología Fuzzy primero se normalizó los datos (Ecuación 1) y se convirtió a radianes cada variable normalizada (Ecuación 2).

$$N = \frac{V_o - V_m}{VM - V_m} \quad (3)$$

Donde:

N= Normalización

V_o= Variable original

VM= Valor máximo

V_m= Valor mínimo

$$R = N * 1,570769326 \quad (4)$$

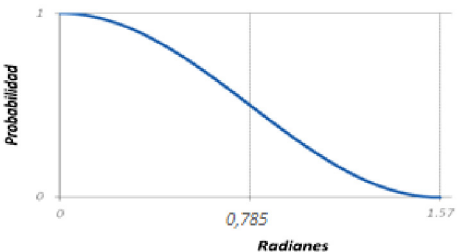
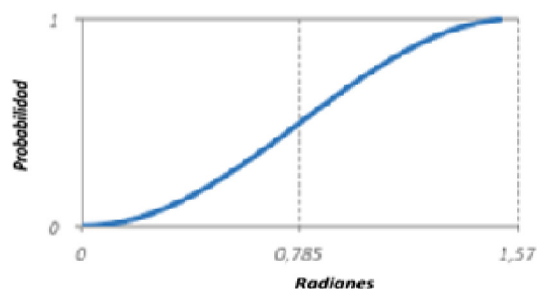
Donde:

R= Radianes

Posteriormente, se obtuvo la probabilidad del modelo mediante la aplicación de la función Fuzzy que corresponda en cada variable (Tabla 3)

Tabla 3.

Función de probabilidad por Caso Fuzzy.

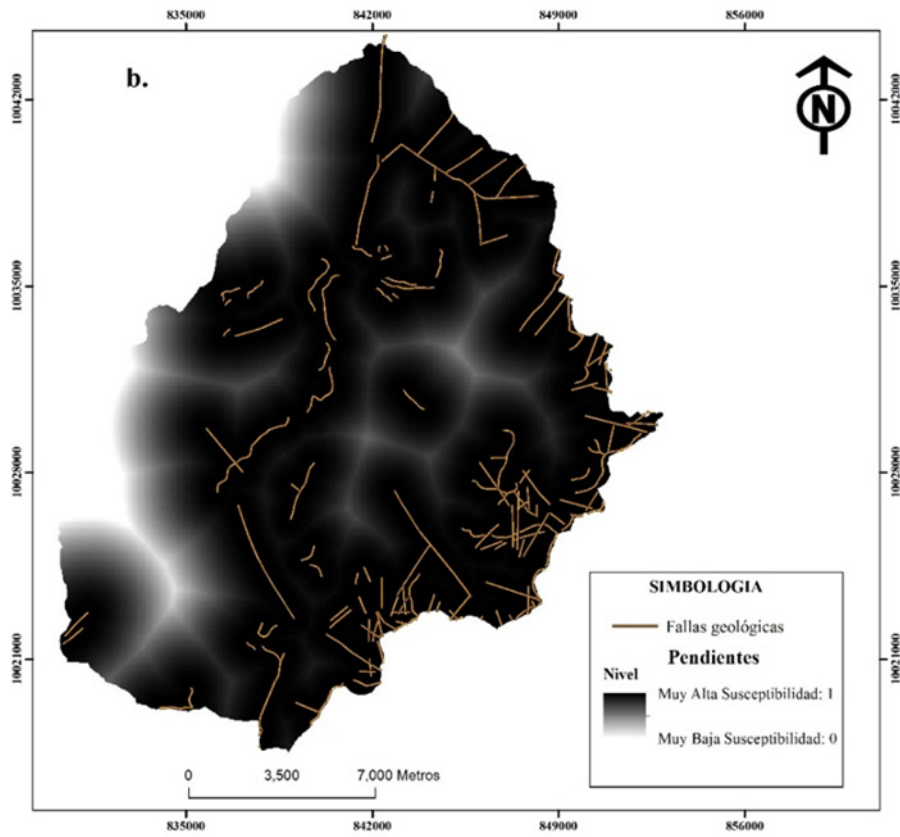
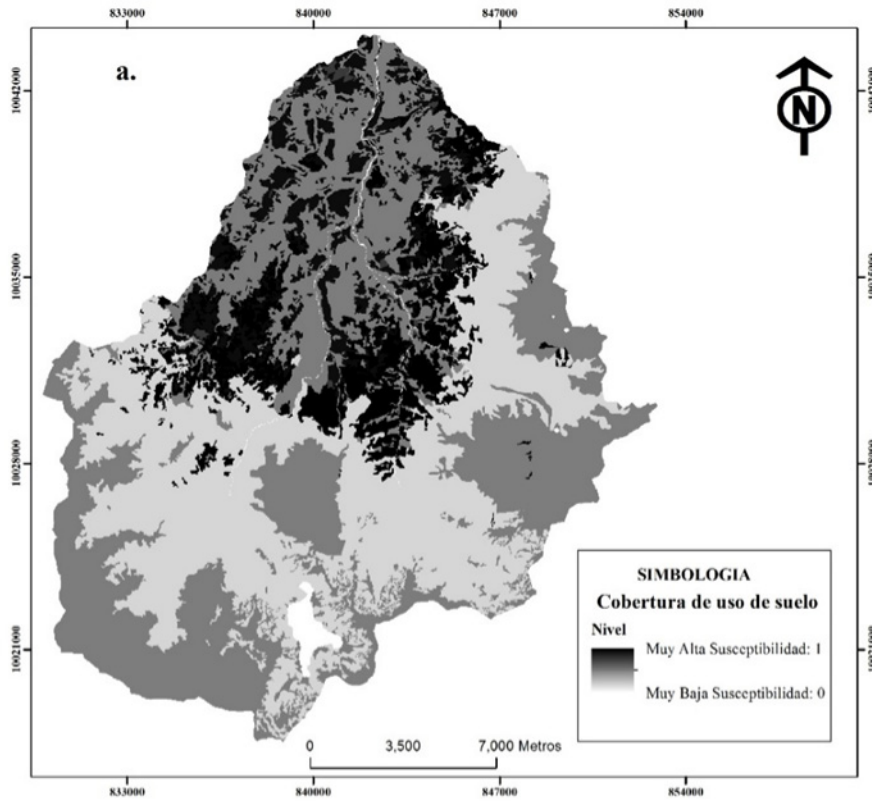
Casos FUZZY	Rango	Función
	0° a 180° En radianes: 0 a $\frac{\pi}{2}$	$P = \cos(R)$ * Función Coseno
	0° a 180° En radianes: 0 a $\frac{\pi}{2}$	$P = \sin(R)$ * Función Seno

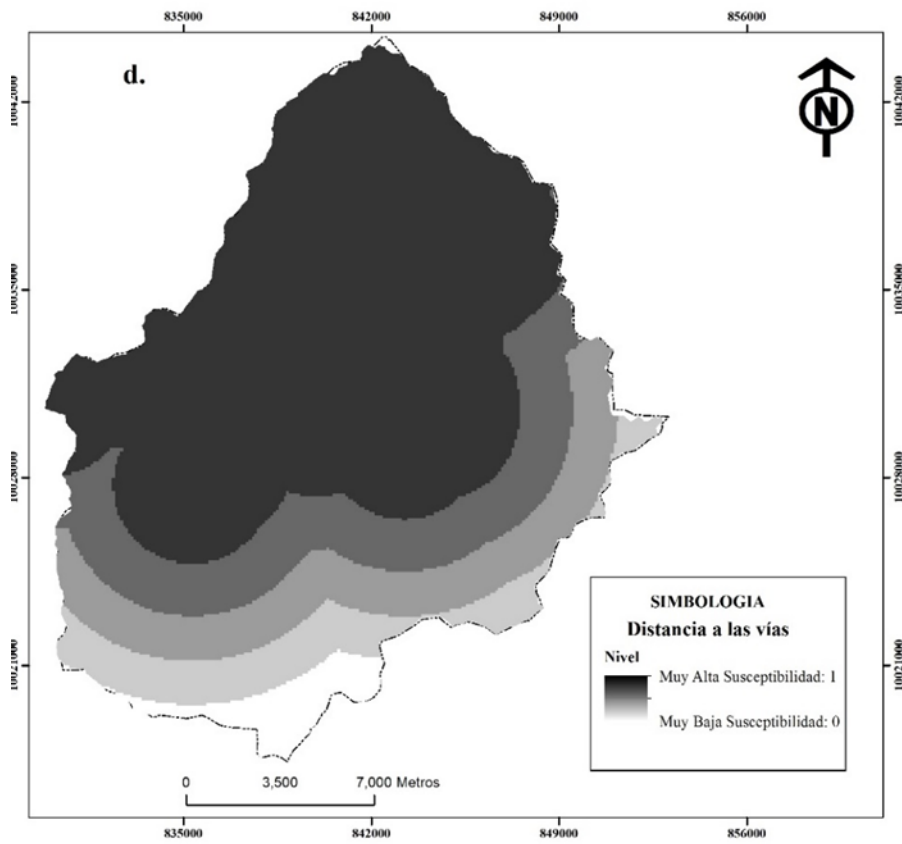
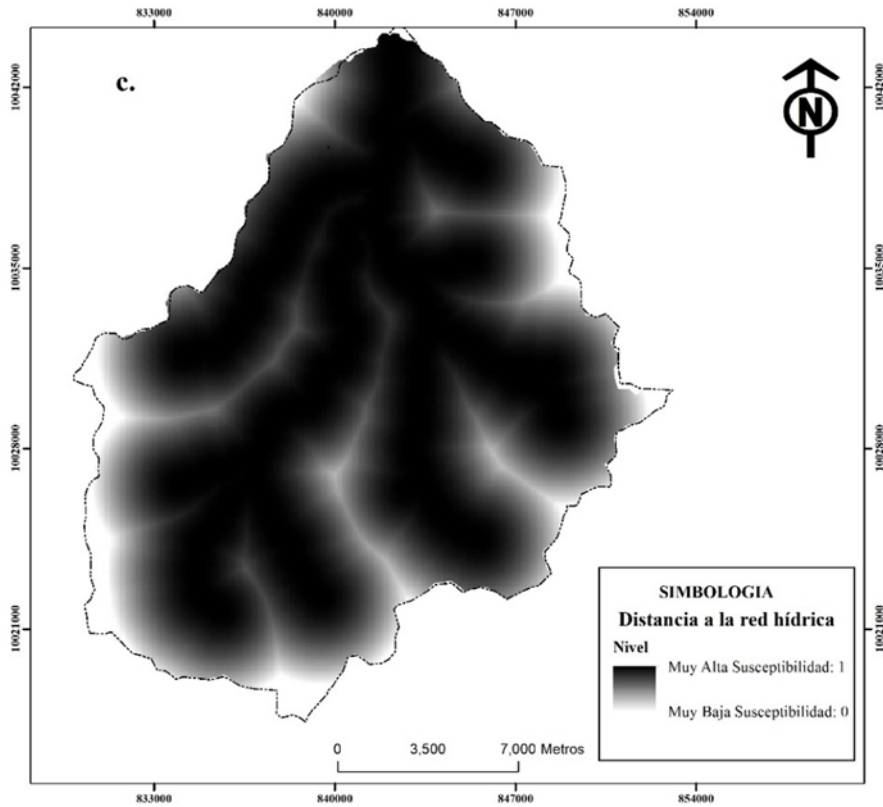
I caso de análisis Fuzzy

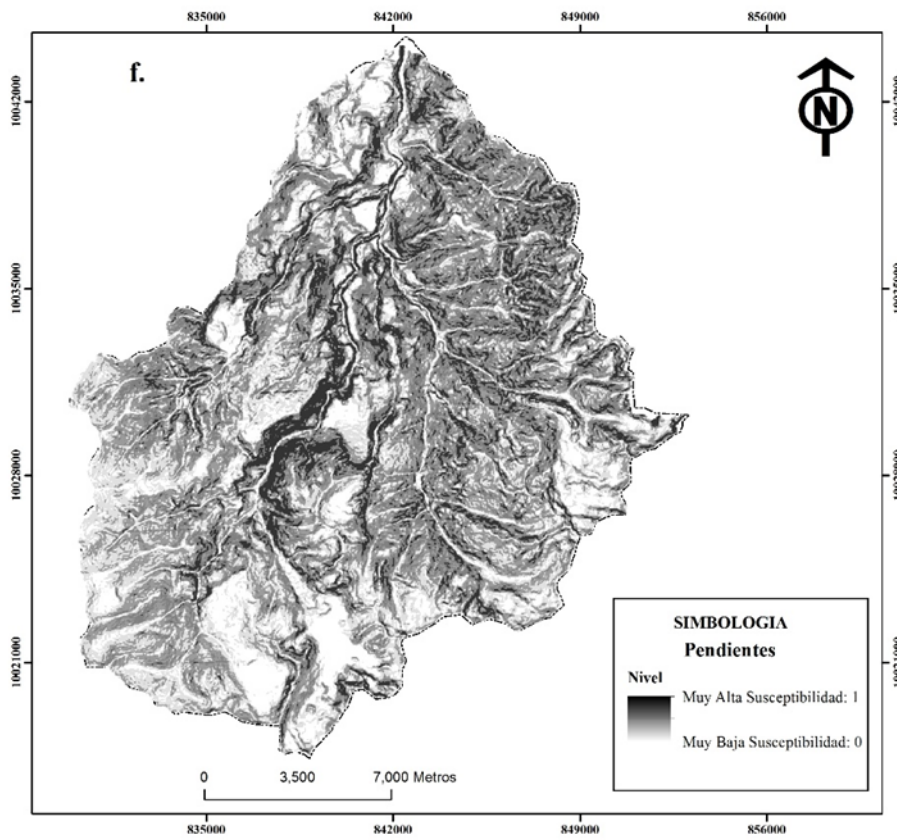
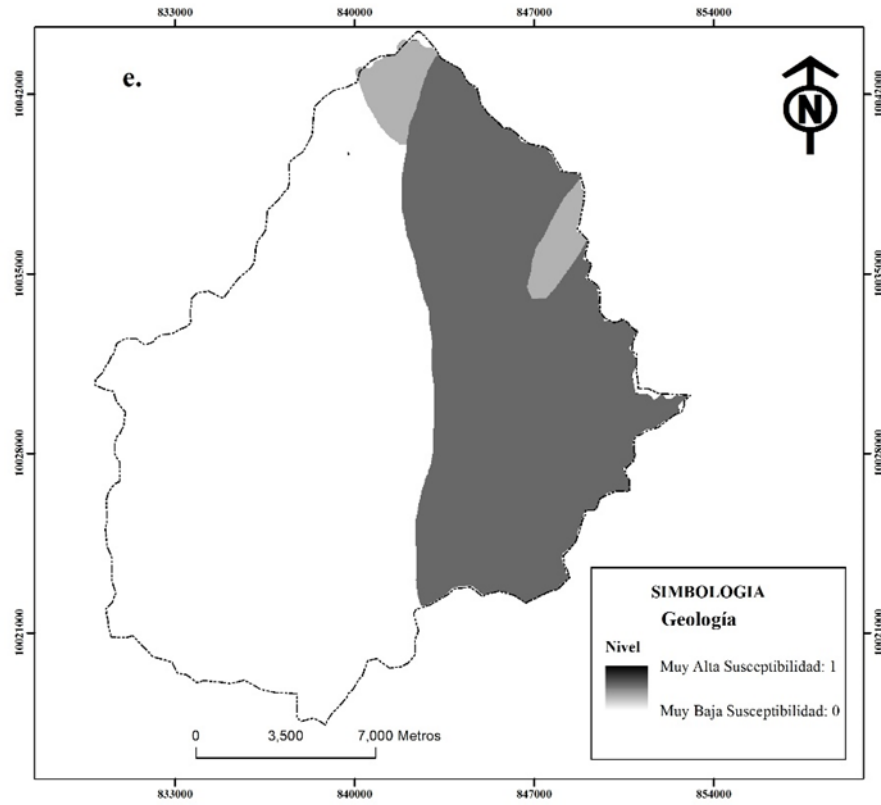
II caso de análisis Fuzzy

*P= Probabilidad; cos=coseno, sin=seno y R= valor en radianes

Después se cartografió la probabilidad de cada una de las siete variables y se dividió en cuatro intervalos: 1) 0 – 0,25; 2) 0,26 – 0,50; 3) 0,51 - 0,75; 4) 0,76-1. El primer intervalo corresponde a baja probabilidad, el segundo a media probabilidad, el tercero a alta probabilidad y el cuarto a muy alta probabilidad (Figura 9).







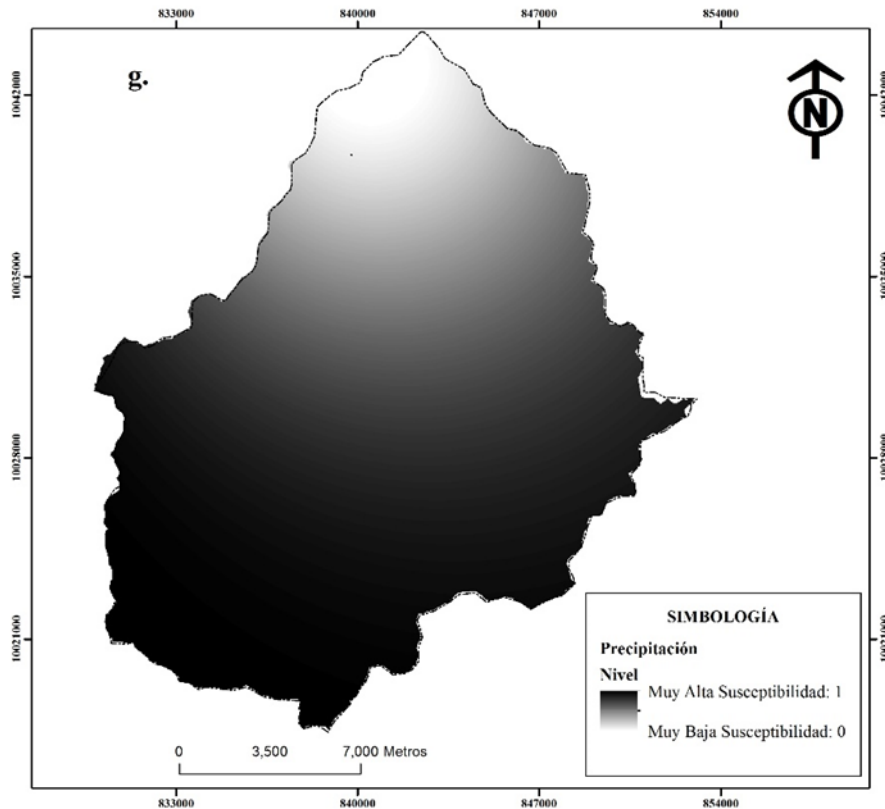


Figura 9. Variables Normalizadas según el Modelo Fuzzy.

Nota: Las variables normalizadas de acuerdo al método Fuzzy son: a) cobertura de suelo b) distancia a fallas geológicas c) distancia a red hídrica d) distancia a vías e) geología f) pendientes y g) precipitación.

Finalmente, se aplicó la Ecuación (3) mediante el uso de álgebra de mapas y así se obtuvo el modelo de susceptibilidad, al cual se lo dividió en cinco categorías, muy baja, baja, media, alta y muy alta.

$$Y = (\text{cobertura de suelo} + \text{distancia fallas geológicas} + \text{distancia red hídrica} + \text{distancia vías} + \text{geología} + \text{pendientes} + \text{precipitación})/7 \quad (5)$$

En la Etapa II se validó el modelo de susceptibilidad mediante la aplicación de la Curva ROC (Chung y Fabbri 2003). La hipótesis partió en que existe asociación entre eventos de deslizamientos registrados y el modelo de susceptibilidad. La comprobación de la hipótesis se realizó mediante el cálculo del área bajo la curva (Figura 10). En la curva un valor menor a 0,5 indica que el modelo no tiene capacidad predictiva, pero un valor de 1 indica que el modelo tiene máxima capacidad predictiva (Gutiérrez et al., 2018). Bajo este marco metodológico se evaluó la validez o confianza del modelo. Es decir, se consideró al modelo válido siempre que supere el área teórica, igual a 0,5 ($p < 0,05$ y/o intervalo de confianza que no contiene al 0,5).

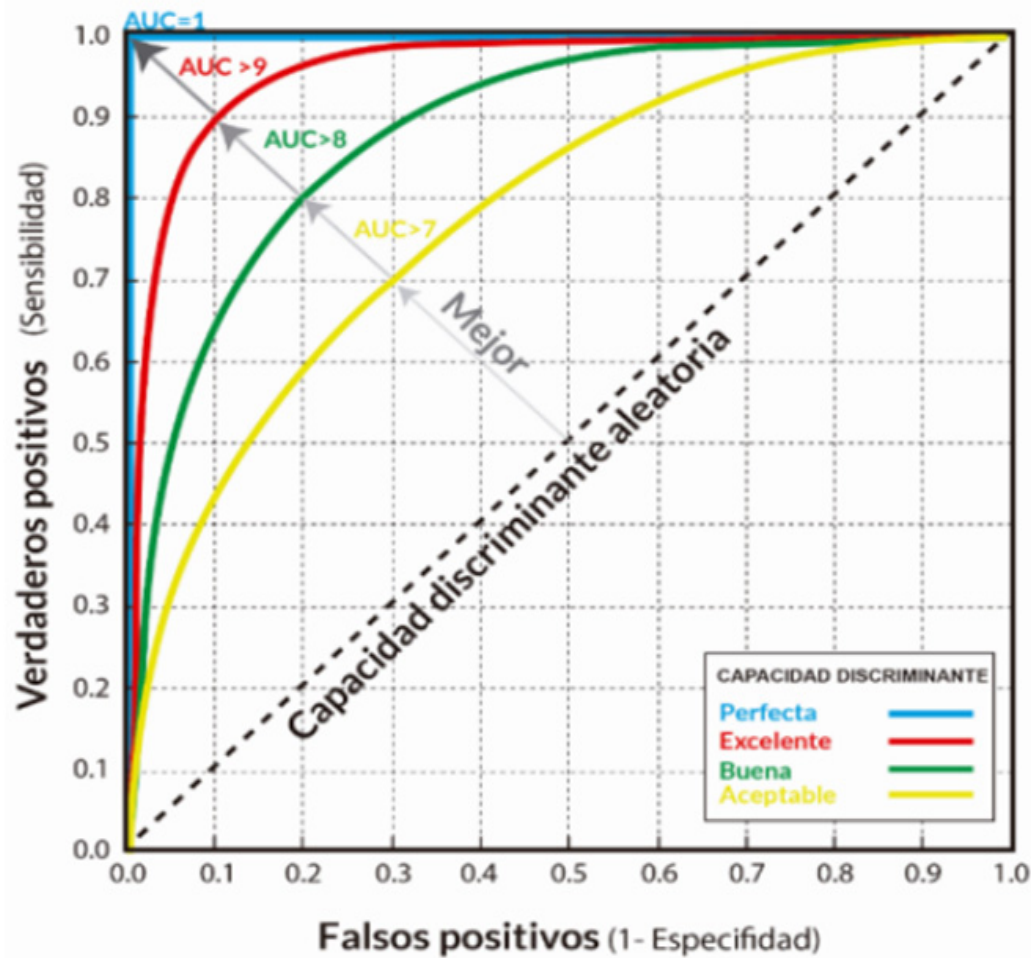


Figura 10. Curva ROC (Receiver Operating Characteristic).
Fuente: Gutiérrez et al., (2018)

El proceso consistió en utilizar 16 puntos o coordenadas, donde se evidenció la manifestación de deslizamientos pasados. A estos se los categorizó como verdaderos positivos (VP). También se utilizó 16 coordenadas de sectores en donde no se evidenciaron deslizamientos, a los cuales se los categorizó como verdaderos negativos, VN. Después se calculó la sensibilidad (Ecuación 4) y especificidad (Ecuación 5) del modelo (Amorim et al., 2009).

$$\text{Sensibilidad} = FVP = \frac{VP}{(VP+FN)} \quad (6)$$

Donde:

FVP= Fracción de verdaderos positivos

VP= Verdadero positivo

FN= Falso negativo

(7)

$$\text{Especificidad} = FVN = 1 - FFP = \frac{VN}{N} = \frac{VN}{VN+FP}$$

Donde:

FVN= Fracción de verdaderos negativos

FFP= Fracción de falsos positivos

VN= Verdadero negativo

FP= Falso positivo

Ambas etapas siguieron una secuencia de procesos que incluyó la aplicación de las funciones seno y coseno del modelo Fuzzy y la validación del mapa de susceptibilidad con la aplicación del área bajo la curva (Figura 11).

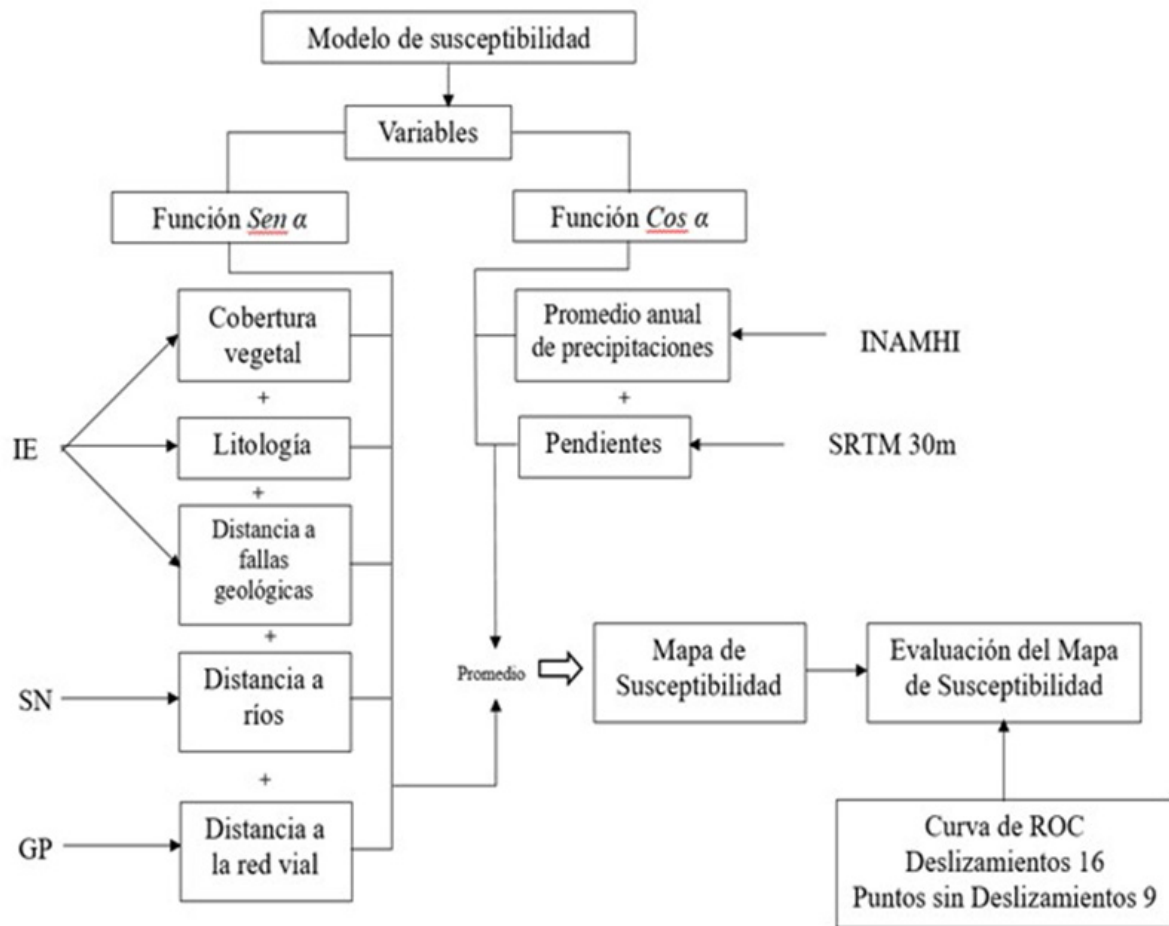


Figura 11. Esquema Metodológico para Determinar y Validar el Modelo de Susceptibilidad.

Resultados y discusión

Ningún sector de la subcuenca del río Mataquí presenta susceptibilidad baja, únicamente el 2% del territorio presenta susceptibilidad moderada y el 98% restante se distribuye entre susceptibilidad alta y muy alta, según se indica en la Figura 12.

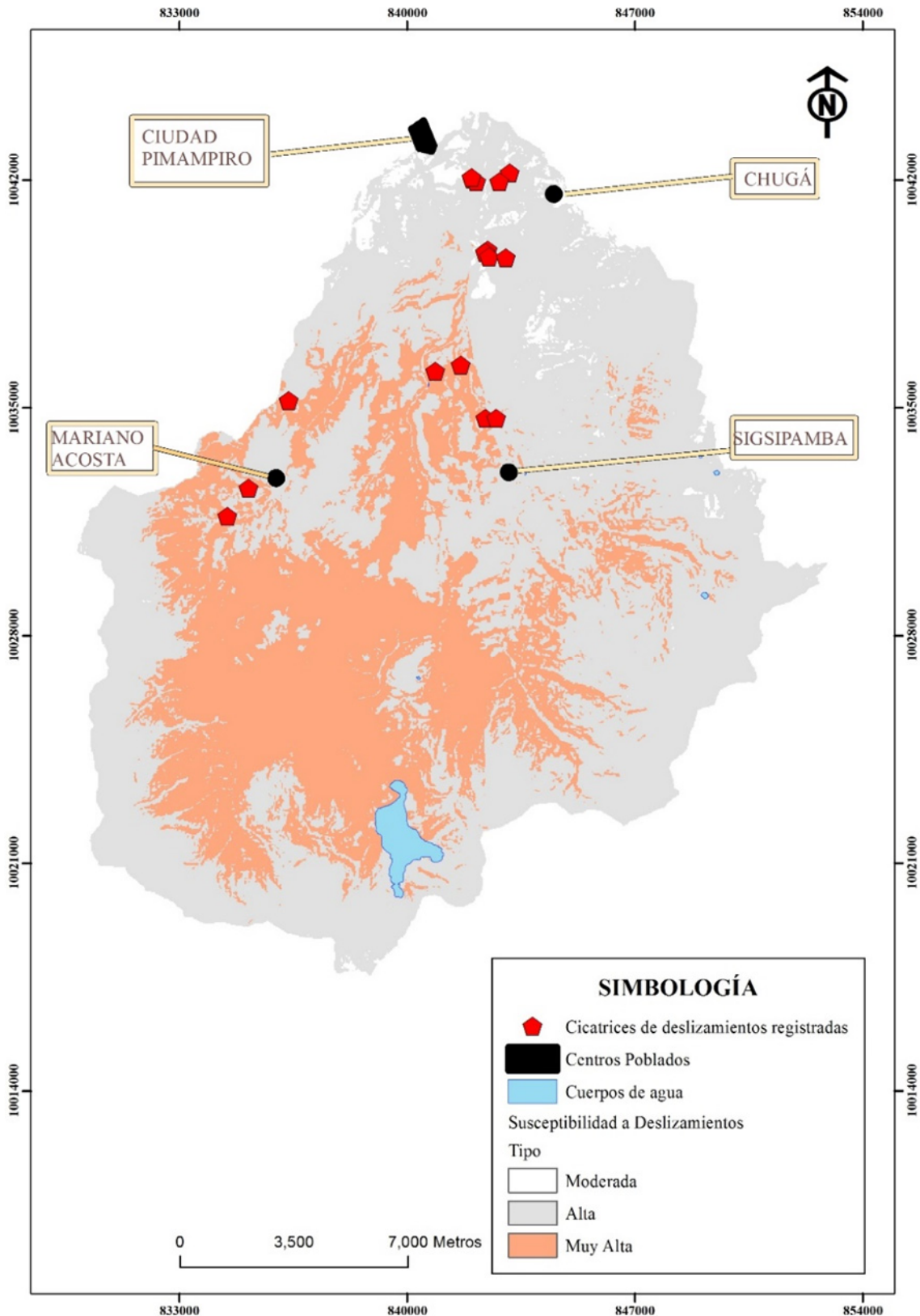


Figura 12. Susceptibilidad a Deslizamientos en la Subcuenca del Río Mataquí.

La susceptibilidad moderada se produciría porque pese a que estas zonas se encuentran sobre zonas planas y sobre geología considerada dura, también se encuentran cerca de vías y fallas geológicas principales. De hecho, estas dos últimas características impedirían que estas zonas presenten susceptibilidad baja.

Otra característica particular del territorio es que el 64% del territorio presenta susceptibilidad alta y el 33% presente susceptibilidad muy alta. La susceptibilidad alta se distribuye alrededor del todo el territorio y la susceptibilidad muy alta se concentra principalmente desde el centro hacia el sur, entre la zona alta y media-alta de la subcuenca hidrográfica. La presencia de altos niveles de susceptibilidad en la cuenca implica que todo del territorio está expuesto de algún modo al peligro de deslizamiento, en consecuencia, todos los centros poblados conviven de forma constante con el riesgo.

La susceptibilidad “alta” y “muy alta” se construyó por la presencia de pendientes onduladas y escarpadas dentro del territorio, geología susceptible por meteorización y acumulación de pluviosidad. Sin embargo, las variables que aumentaron la susceptibilidad fueron: la presencia cercana de vías, fallas geológicas y redes hídricas. La presencia de cobertura vegetal natural, como bosque, páramo y vegetación arbustiva, inciden en la disminución de la susceptibilidad, pero se observa que no jugaron un rol predominante. Sin embargo, la presencia de pendientes escarpadas, geología como: aluviones, coluviones y andesitas, fallas geológicas cercanas, y la alta pluviosidad —sobre los 800 mm— influyeron en la construcción de susceptibilidad. Eso sin olvidar que la red hídrica y las vías agravaron las condiciones de mayor peligro.

El flujo de la red hídrica es uno de los factores más importantes que afectan la estabilidad del terreno. (Pradhan, 2013; Demir, 2019). Sin embargo, la red hídrica no es el factor más importante. El factor considerado más importante para dar origen a deslizamientos es el grado de la pendiente, porque el grado de inclinación influye directamente en los deslizamientos (Demir, 2019). La presencia de fallas geológicas también es reconocida por varios autores como un factor influyente en el origen de deslizamientos (Chunga, 2013; Althuwayne et al., 2014; Demir, 2019). Chunga (2013) señala que su influencia se podría producir a través de planos lístricos. Finalmente, las rocas tipo aluvión o coluvión son muy propensas a erosión y deslizamientos, y a las rocas andesitas son susceptibles a la meteorización porque es fácil su desintegración al humedecerse y secarse (Suárez, 2020).

En esta cuenca la susceptibilidad a deslizamientos es muy alta, se construye principalmente cerca de las terrazas de la red hídrica y cerca de fallas geológicas (Figura 13). La influencia de las terrazas del río, es reconocido por Althuwaynee et al., (2014) quienes señalan que es común que los deslizamientos inicien cerca de las terrazas fluviales por la acción de la corriente hídrica. La acción erosiva de los ríos se completa primero por la geología debido a que las rocas aluviales o coluviales son más susceptibles a fracturación (Suárez, 2020). Los suelos coluviales influyen en gran medida en la susceptibilidad a deslizamientos (Abascal y González-Bonorino, 2015). Después influye la inestabilidad del suelo generada por las pendientes, pero que según Chang y Liu (2004) únicamente generarían estabilidad desde 5° hasta 60° de inclinación. Las fallas geológicas tienen un rol complementario al generar inestabilidad el terreno (Pradhan, 2010) y al incidir en la estabilidad de las rocas andesitas, propensas a deslizamiento por fracturación sísmica (Suárez, 2020). Finalmente, el último factor de susceptibilidad es la precipitación, al ser considerada como el principal factor detonante y culminante en la generación de susceptibilidad (Althuwaynee et al., 2012).

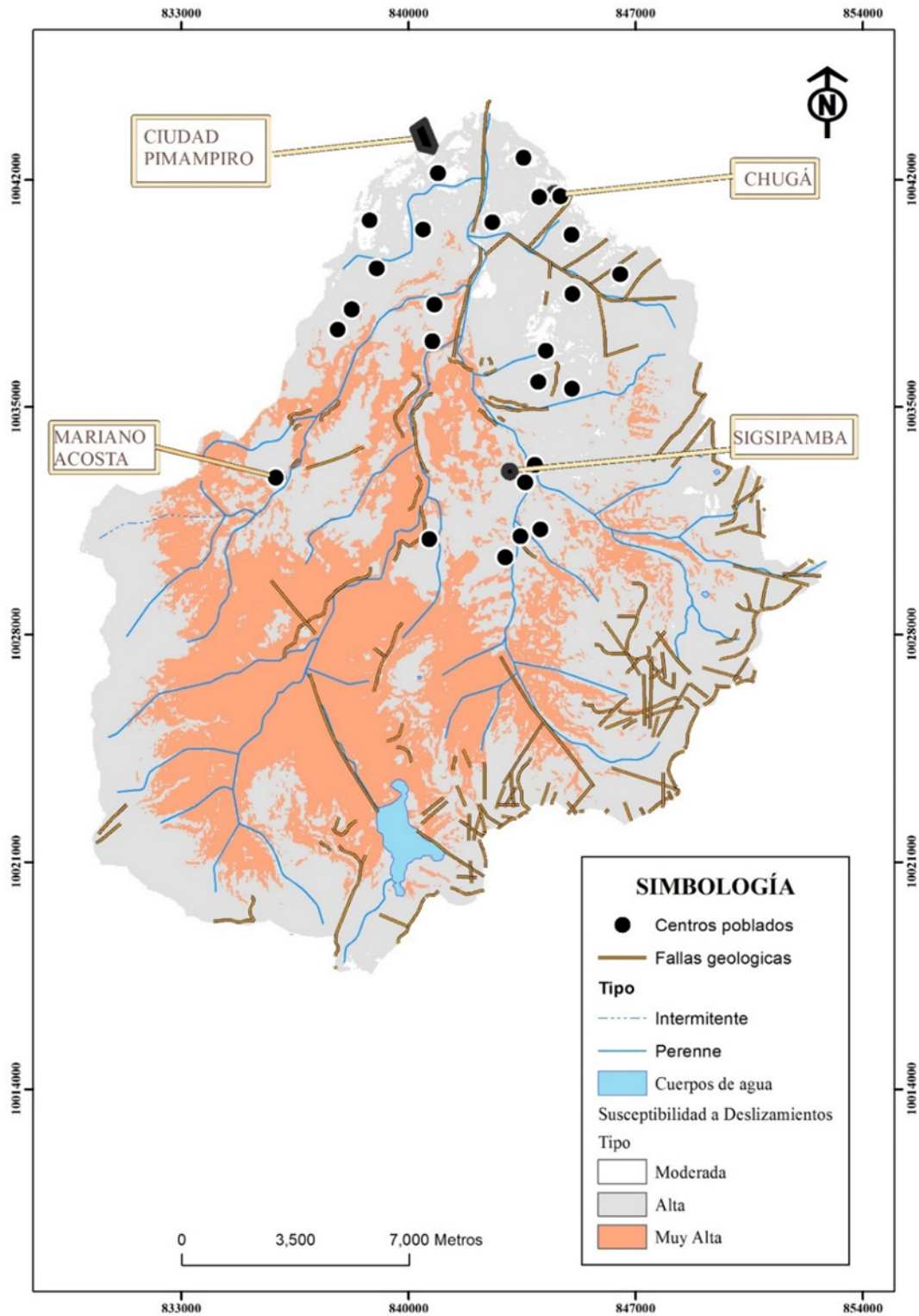


Figura 13. Ubicación de red hídrica, fallas geológicas y centros poblados sobre el modelo de susceptibilidad.

Validación del modelo

El modelo de susceptibilidad de deslizamientos se considera válido o confiable porque el valor obtenido del área bajo la curva ROC fue de 0,97 (Figura 14). De este modo se comprobó que las variables: cobertura vegetal, litología, distancias a fallas geológicas, distancia a ríos, distancia a la red vial, precipitación y pendiente son variables predictoras de

futuros deslizamientos. Sin duda, con estos resultados se ratifican el rol de las variables estáticas y dinámicas en la predicción de modelos cuantitativos de deslizamientos.

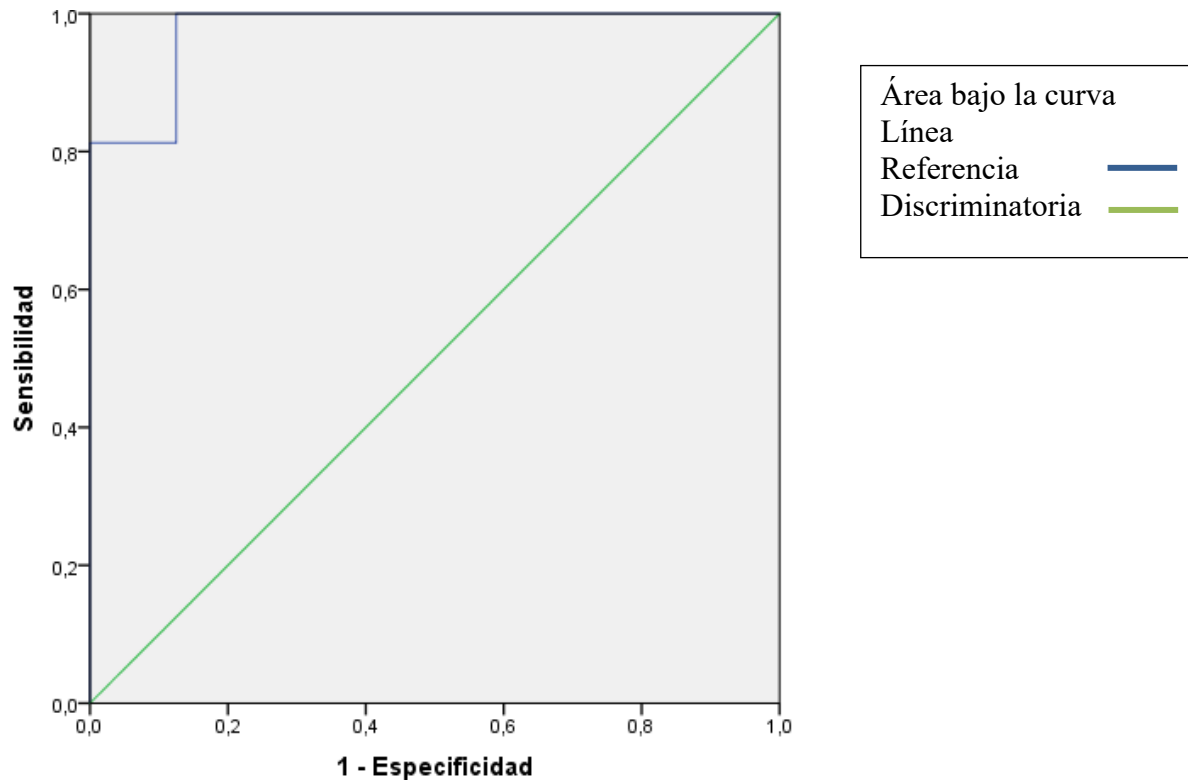


Figura 14. Curva ROC (Receiver Operating Characteristic).

Conclusiones

El modelo de susceptibilidad obtuvo un área bajo la curva de 0,97 por lo que se lo considera aceptable. Por ese motivo el enfoque de lógica difusa aplicado con herramientas SIG proporciona un método flexible en el desarrollo de una red de inferencia cuantitativa.

Se concluye que la susceptibilidad a deslizamientos se construye sobre zonas con pendientes escarpadas, rocas tipo aluvión o coluvión y que cada vez que se acerca a la red hídrica, fallas geológicas y vías va incremento la susceptibilidad a muy alta. Otros factores que inciden en el aumento de susceptibilidad es la pluviosidad anual sobre 800 mm. La presencia de cobertura vegetal natural como bosque y vegetación arbustiva disminuye la susceptibilidad, pero se observó que no es un factor determinante en este territorio. Finalmente debido a la incidencia de las vías en el peligro se recomienda realizar obras de infraestructura en las vías de comunicación, como: terrazas, revestimientos de hormigón, muros de gaviones para la estabilización de taludes.

Referencias

Abascal, L. d., y González-Bonorino, G. (2015). SEDIMENTACION COLUVIAL E INESTABILIDAD DE LADERAS EN LOS ANDES DE TIERRA DEL FUEGO. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72 (4), 470 - 481 .

Alcántara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology* 47 , 107-124.

Alcántara-Ayala, I. (1999). Landslides: ideslizamientos o movimientos del terreno? Definicion, clasificaciones y terminologia. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 41, 7-25.



- Althuwaynee, O. F., Pradhan, B., y Lee, S. (2012). Application of an evidential belief function model in landslide susceptibility mapping. *Computer and Geosciences*, 120-135.
- Althuwaynee, O. F., Pradhan, B., Park, H.-J., y Lee, J. H. (2014). A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical hierarchy process and multivariate statistical logistic regression for landslide susceptibility mapping. *Catena 114*, 21-36.
- Berhan, G., Kebede, M., Alfarah, N., Hagos, E., Grum, B., Giday, A., y Abera, T. (2020). Landslide susceptibility zonation mapping using GIS-based frequency ratio model with multi-class spatial data-sets in the Adwa-Adigrat mountain chains, northern Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 1-15.
- Castellanos-Abella, E., y Van Westen, E. (2008). Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. *Geomorphology 94*, 453–466.
- Chang, K. T., y Liu, J. K. (2004). Landslide features interpreted by neural network method using a high-resolution satellite image and digital topographic data. *In Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey*.
- Chen, W., Panahi, M., Tsangaratos, P., Shahabi, H., Ilia, I., Panahi, S., . . . y Ahmad, B. (2019). Applying population-based evolutionary algorithms and a neuro-fuzzy system for modeling landslide susceptibility. *Catena 172*, 212-231.
- Chowdhury, R. (1976). Initial stresses in natural slope analysis, rock engineering for foundations and slopes. En A. S. Engineers, *Rock engineering for foundations and slopes*. (págs. 404-414). Colorado: ASCE Geotechnical Engineering Division, University of Colorado, pp 404–414.
- Chunga, K. (2013). Análisis estructural de fallas geológicas y potenciales deslizamientos en Anconcito, provincia de Santa Elena. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 1-8.
- Coates, D. (1977). Landslides perspectives. En D. (. Coates, *Landslides*, (págs. 3-28). Geological Society of America.
- Cruden, D. M. (1991). A Simple Definition of a Landslide. *Bull IAEG 43*, 27-29.
- D'Ercole, R., y Metzger, P. (2004). *Vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito*. . Quito: IRD / MDMQ.
- Dahal, R., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Masuda, T., y Nishino, K. (2008). GIS-based weights-of evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology 54 (2)*, 311–324.
- Demir, G. (2019). GIS-based landslide susceptibility mapping for a part of the North Anatolian Fault Zone between Reşadiye and Koyulhisar (Turkey). *CATENA 183*, 1-12.
- Demoraes, F., y D'Ercole, R. (2001). *Cartografía de las amenazas de origen natural por cantón en Ecuador*. Quito: Oxfam Internacional.
- D'Ercole, R., y Trujillo, M. (2003). *Amenazas, vulnerabilidad, capacidades y riesgos en el Ecuador. Los desastres un riesgo post desarrollo*. Quito: Ekseption Editorial.



- Desinventar. (25 de Julio de 2020). *Sistema de inventario de efectos de desastres*. Obtenido de Ecuador-Sistemas de Información de Desastres de Emergencias: <http://www.desinventar.org/es/database>
- Fell, R. (1994). Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal* 31(2), 261-272 .
- Gómez, H., y Kavzoglu, T. (2005). Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology* 78, 11-27.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., y Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. . *Geomorphology* 31, 181-216.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., y Reichenbach, P. (1999). Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy. *Geomorphology*, 31, 181-216.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos . (2010). *Censo de Población y vivienda*.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2010). *VII Censo de Población y VI de Vivienda*. Quito-Ecuador: INEC.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (05 de Marzo de 2020). *Proyecciones Poblacionales*. Obtenido de Proyecciones Poblacionales: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>
- Khan, A., Chenggang, Y., Khan, G., y Muhammad, F. (2020). The dilemma of natural disasters: Impact on economy, fiscal position, and foreign direct investment alongside Belt and Road. Initiative countries. *Science of the Total Environment* (2018), pre-proof.
- Lavell, A. (15 de 08 de 2015). *Desastres y Desarrollo: Hacia un Entendimiento de las Formas de Construcción Social de un Desastre: El Caso del Huracán Mitch en Centroamérica*. Obtenido de Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina: <http://www.desenredando.org/public/articulos/2003/rmhcvr/>
- Leonardi, G., Palamara, R., y Suraci, F. (2020). A fuzzy methodology to evaluate the landslide risk in road lifelines. *Transportation Research Procedia* 45, 732-739.
- Neaupane, K., y Achet, S. (2004). Use of backpropagation neural network for landslide monitoring: a case study in the higher Himalaya. *Engineering Geology* 74 , 213-226.
- Ortiz, Ó. (2013). *Sismotectónica y peligrosidad sísmica en Ecuador. (Tesis de postgrado) Universidad Complutense de Madrid*. Madrid, España: Facultad de Ciencias Geológicas.
- Penck, A. (1894). *Morphologie der Erdoberfläche, 2 vols.* 471-696.: J. Engelhorn.
- Pourrut, P. (1983). *Los climas del Ecuador*. Quito, Ecuador: Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Pradhan, B. (2010). Application of an advanced fuzzy logic model for landslide susceptibility analysis. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 370-381.
- Pradhan, B. (2013). A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computer and Geosciences* 51, 350-365.



- Sharpe, C. F. (1938). *Landslides and related phenomena: A Study of Mass-movements of Soil and Rock*. New York: Columbia University Press.
- Strobl, E. (2012). The economic growth impact of natural disasters in developing countries: Evidence from hurricane strikes in the Central American and Caribbean regions. *Journal of Development Economics* 97, 130-141.
- Suárez, J. (2020). *Deslizamientos. Tomo I. Análisis Geotécnico*. Obtenido de GEOTOCNOLOGIA SAS: <http://www.erosion.com.co/>
- Tangestani, M. H. (2009). A comparative study of Dempster–Shafer and fuzzy models for landslide susceptibility mapping using a GIS: An experience from Zagros Mountains, SW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 35, 66-73.
- Van-Westen, C., Van-Asch, T., y Soeters, R. (2005). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65, 167–184.
- Varnes, D. J. (1958). Landslides types and processes. En E. B. Eckel, *Landslides and Engineering Practice*. (págs. 20-47). Washington D.C: Highway Research. Board Special Report 29.
- Varnes, D. J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Natural hazards*, 3. Paris: UNESCO.
- Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. *Catena* 72, 1-12.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control* 8, 338-353.
- Zare, M., Pourghasemi, H. R., Vafakhah, M., y Pradhan, B. (2013). Landslide susceptibility mapping at Vaz Watershed (Iran) using an artificial neural network model: a comparison between multilayer perceptron (MLP) and radial basic function (RBF) algorithms. *Arabian Journal of Geosciences*, 2873-2888.



Zonificación de Áreas Propensas a Incendios de Cobertura Vegetal en la Subcuenca del Río Mataquí ubicada en la Provincia Imbabura

Paúl Arias Muñoz¹, Gabriela Encarnación¹, Angélica Díaz¹ y Fernanda Herrera¹

Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador. Correo de correspondencia: dparias@utn.edu.ec

Resumen

El fuego es un elemento natural importante en la evolución y desarrollo de la humanidad. No obstante, cuando tiene un manejo inadecuado y se torna incontrolable, se producen los incendios, los que ocasionan pérdidas ambientales, sociales y económicas. En el presente estudio se zonificó las áreas susceptibles a incendios de cobertura vegetal en la subcuenca del río Mataquí, en el cantón Pimampiro. Se identificaron nueve factores biofísicos que intervienen en la generación de incendios: temperatura, precipitación, déficit hídrico, evapotranspiración, cobertura de suelo, cercanía a vías, pendiente, orientación del terreno y altitud, a través de la aplicación de la metodología multicriterio. Estos factores fueron ponderados y aplicados en una ecuación de susceptibilidad mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. Los resultados mostraron que la subcuenca del río Mataquí presenta 5 rangos de susceptibilidad: nula o muy baja, baja, moderada, alta y extrema. Las categorías extrema y alta ocupan el 26% del área de estudio, siendo las coberturas de cultivos y pastos las más susceptibles.

Palabras clave: cobertura vegetal, incendios, multicriterio, susceptibilidad

Introducción

El fuego ha sido una de las principales fuerzas evolutivas que han moldeado la estructura, la composición y la distribución geográfica de los ecosistemas con coberturas vegetales del mundo, al impactar sobre sus componentes estructurales, sus dinámicas, sus interrelaciones y sus procesos (Bond y Keeley, 2005). Los ecosistemas han desarrollado un complejo sistema de interrelaciones entre el clima, el suelo y la vegetación el cual hace posible la presencia o ausencia natural del fuego (Parra-Lara y Bernal-Toro, 2011).

La propagación del fuego sin control se lo conoce como un incendio (FOPAE, 2002). Su origen puede tener causas naturales como: temperatura, viento, humedad; sin embargo, desde hace algunos años las causas antrópicas han aumentado en las estadísticas (Oliveira, 2002). En ecosistemas terrestres los incendios provocan desastres ecológicos y daños materiales inmensurables, pues afectan principalmente a recursos como el suelo, fuentes de agua, aire, biodiversidad, e incluso los servicios ambientales (Julio y Bosnich, 2005; Riberiro et al., 2007).

En los últimos años, los incendios de cobertura vegetal son un tema que ha preocupado a diversas instituciones en diferentes regiones del mundo, por el incremento exponencial en el número de sucesos, debido al cambio de temperaturas y negligencia en las actividades humanas (Díaz-Hormazábal y González, 2016). Autores como Parra-Lara y Bernal-Toro (2011) y Jiménez et al., (2016) consideran que los incendios de coberturas vegetales son una problemática multicausal, aunque pueden tener un origen natural o antrópico, en ambos casos su ocurrencia depende de la confluencia de varios factores determinantes como: condiciones climáticas, topografía, actividades humanas como las agrícolas y ganaderas, y el tipo de vegetación que es la fuente de combustible.

Según reportes de la FAO (2006), en el año 2000, la superficie mundial afectada por el fuego fue de 350 millones de hectáreas, de los cuales 2,9 millones fueron en América Latina, donde el 85% de los incendios fueron de origen antrópico. En Ecuador, para octubre del año 2019, los incendios forestales ocasionaron una pérdida de cobertura vegetal de 18768,70 hectáreas a nivel nacional, como resultado de 1799 eventos registrados. Las provincias mayormente afectadas fueron Loja, Imbabura, Pichincha, Guayas, Carchi y El Oro. En el caso de Imbabura, se registraron 325 incendios, los cuales dejaron como resultado 3296,86 hectáreas de cobertura vegetal quemada (Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, 2019).

En el territorio ecuatoriano, los estudios sobre incendios de cobertura vegetal son escasos, siendo los más relevantes dos que se realizaron en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). En el primero, se aplicó una metodología combinada que consistió en realizar un registro visual del incendio y el tratamiento digital de imágenes para determinar los niveles digitales de reflectancia, con el fin de mejorar los programas de emergencia y planificación, y como resultado se determinó la recurrencia de los incendios forestales (Estacio y Narváez, 2012). En el segundo caso, Columba y Quisilema (2013) establecieron las áreas vulnerables a incendios forestales, mediante la Lógica Fuzzy aplicando herramientas geoinformáticas, a través del procesamiento de imágenes satelitales, en la que se determinó varios modelos, definiendo cual tiene mejor ajuste a la realidad del DMQ.

A nivel de Imbabura, no existe evidencia de estudios sobre áreas propensas a incendios de cobertura vegetal en el cantón Pimampiro, y menos en la subcuenca del río Mataquí; a pensar que, en el año 2019, en esta zona se reportaron pérdidas anuales entre 5 y 180 hectáreas de vegetación por incendios. Además, se estima que el 95% de los incendios reportados dentro de la subcuenca fueron por causas antrópicas y que el mayor número de incendios se registran en época de verano (Corporación OSSO, 2016). Por lo que, el objetivo de este estudio fue determinar las áreas de susceptibilidad a incendios de la cobertura vegetal en la subcuenca del río Mataquí, mediante un modelo de susceptibilidad de incendios generado por técnicas multicriterio. Como hipótesis se plantea que el modelo de susceptibilidad es confiable para el área de estudio.

Área de estudio

La subcuenca del río Mataquí se localiza en el cantón Pimampiro, entre las parroquias rurales Pimampiro, Chugá, Mariano Acosta y San Francisco de Sigsipamaba, al este de la provincia de Imbabura, en el norte de Ecuador. Sus límites geográficos son: al norte el cantón Bolívar, al sur los cantones Cayambe y Gonzalo Pizarro, al este el cantón Sucumbíos y al oeste el cantón Ibarra. La subcuenca tiene una superficie de 356,16 km² y se encuentra dentro de la cuenca del río Mira, en la cual ocupa el 6,69% de su superficie total, como se indica en la Figura 15.

Los tipos de climas que se presentan en el área de estudio son tres, en la parte baja de la subcuenca se encuentra el clima ecuatorial mesotérmico seco (EMS), el cual está asociado a los valles interandinos abrigados; en la parte media de la subcuenca el ecuatorial mesotérmico semi-húmedo (EMSH) característico de la zona interandina, y en la parte alta domina el clima ecuatorial de frío de alta montaña (EFAM) situado en los rangos 2000 a 3000 m s.n.m. (Pourrut, 1983).

De acuerdo con la clasificación de Holdridge (1987), las formaciones ecológicas presentes en la subcuenca son: bosque húmedo montano (bhM), bosque húmedo montano bajo (bhMB), bosque muy húmedo montano bajo (bmhMB), bosque seco montano bajo (bsMB), y estepa

espinosa montano bajo (eeMB). Por su ubicación en la región Andina su temperatura media es 12,94 °C y precipitaciones promedio de hasta 730 mm/anales.



Figura 15. Mapa de Ubicación de la Subcuenca del Río Mataquí en la Cuenca del Río Mira.

Según datos del Instituto Nacional de estadística y Censos (2020), la población proyectada para este año es de 13269 habitantes que representa el 1,5% de la población total de la cuenca del río Mira. De acuerdo con datos de CEPAL (2011) el 77,32% de la población en su mayoría son mestizos, el 14,16% son indígenas, el 4,03% son blancos, el 3,62% son afroecuatorianos y el 0,87% se autodenominan mulatos. Esto debido al desarrollo de la agricultura, ganadería, y silvicultura como principales actividades y fuentes de ingresos de la población.

Métodos

El método no experimental transversal se utilizó para el desarrollo del presente estudio. Se desarrolló modelos espacialmente explícitos con el fin de obtener el mapa de susceptibilidad de incendios a través de un proceso metodológico dividido en dos etapas.

Etapas I: Zonificación de áreas propensas a incendios de cobertura vegetal en la subcuenca del Río Mataquí

En esta etapa, primero, se realizaron entrevistas a once expertos, los cuales fueron clasificados en dos grupos: cuatro profesionales investigadores y 7 técnicos implicados en la toma de decisiones. A los expertos se les hizo un cuestionario de seis preguntas para evaluar la probabilidad de ignición y propagación del fuego de las coberturas vegetales en base a la problemática del área de estudio. Las preguntas fueron de tipo no estructuradas o abiertas (Murillo, 2011) y estructuradas, y la calificación rigió bajo la escala de Likert (Alaminos-Chica y Castejón-Costa, 2006; Murillo, 2011). La selección de expertos se hizo mediante la metodología Snow Ball, técnica que utiliza cadenas de referencia para conformar una red y seleccionar a los participantes, la cual finaliza cuando uno de los expertos da como referencia a otro participante que ya fue entrevistado (Baldin y Munhoz, 2011).

A los expertos se les planteó las nueve variables que influyen en la ignición y propagación de incendios propuestas por Coelho et al., (2016): precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, déficit hídrico, pendientes, orientación del terreno, cercanía a las vías, altitud y cobertura del suelo. Para alcanzar el consenso entre los expertos se empleó la metodología Delphi, la cual consiste en recolectar simultáneamente juicios de expertos sobre un problema de interés, para luego procesar la información y mediante técnicas estadísticas, construir un acuerdo general del grupo de expertos, es decir, permite la transformación de apreciaciones individuales en un juicio colectivo (García-Valdés y Suárez-Marín, 2013). De acuerdo a la experticia se confirmaron los nueve factores y se los dividió entre climáticos y físicos. Los climáticos son: precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, déficit hídrico y los físicos los cuatro factores restantes.

Por cada factor se realizó cartografía temática y de acuerdo su contribución en la ocurrencia de incendios se establecieron cinco niveles de susceptibilidad: muy bajo, bajo, moderado, alto y extremo; excepto en cobertura de suelo donde también se estableció la categoría nula. La calificación de los nueve factores predictores se detalla a continuación.

Factores climáticos

Precipitación: A menor presencia de lluvias, mayor es la probabilidad de que ocurra un incendio (Pabón-Caicedo, 2011; Muñoz- Robles y Santana-Arias, 2018; Coelho et al., 2016). La precipitación media anual se determinó con información de pluviosidad para el periodo 1986-2017, de 11 estaciones meteorológicas, Inguincho (distancia 53,19 km), Izobamba (distancia 176,64 km), La Concordia (distancia 163,36 km), San Gabriel (distancia 35,72 km), Otavalo (distancia 35,24 km), Cahuasquí-FAO (distancia 31,20 km), FF Carchi (distancia 39,77 km), Tufiño (distancia 55,71 km), Julio Andrade (distancia 41,94 km), Pablo Arenas (distancia 35,62 km), Cotacachi (distancia 32,71 km) y Pimampiro dentro del área de estudio.

Para interpolar la pluviosidad se usó en tecnología SIG el método determinístico Inverse Distance Weight (IDW). Un método que permite validar la interpolación, al comparar los valores observados con los calculados (Andrade y Moreano, 2013). Finalmente, se utilizó la media y la desviación estándar para la categorización de los cinco niveles de susceptibilidad (Tabla 4). La suma y resta de una desviación estándar en la media estableció los rangos máximo y mínimo. Los valores intermedios se generaron mediante intervalos.

Tabla 4.
Susceptibilidad a Incendios por rangos de precipitación.

Valor	Rangos de precipitación (mm)	Susceptibilidad
1	>827,17	Baja
2	827,17 – 756,58	Moderada
3	756,58 – 686	Alta
4	686 – 615,43	Muy alta
5	< 615,43	Extrema

Temperatura: Este factor influye directa e indirectamente en la combustión y propagación de los incendios, porque incide en el incremento de la combustibilidad de las coberturas vegetales (Villares-Ruíz y López-Blanco., 2004). Se determinó la distribución espacial de la temperatura para un periodo de 30 años (1986-2015) mediante la interpolación de la información meteorológica de seis estaciones meteorológicas del INAMHI. Las estaciones fueron Inguincho (distancia 53,19 km), Izobamba (distancia 176,64 km), La Concordia (163,36 km), San Gabriel (35,72 km), Otavalo (distancia 35,24 km), Cahuasquí-FAO (31, 20 KM). La interpolación de la temperatura se la realizó a través de la ecuación (1) para calcular la temperatura determinada y con la ecuación (2) para calcular la temperatura real del área de estudio.

$$T_{Det} = T_{mensual} + (\Gamma(Z_{Det} - Z_{estación})) \quad (8)$$

Donde:

T_{Det} = Temperatura determinada a un nivel de referencia,

$T_{mensual}$ = es el valor de la temperatura mensual de la estación

Γ = es el valor de n_x de la ecuación de la recta

Z_{Det} = altitud referencial a 1000 m.

$Z_{estación}$ = altitud de la estación.

$$T_{x,y} = T_{Det} + (\Gamma(Z^{DEM} - Z_{Det})) \quad (9)$$

Donde,

$T_{x,y}$ = Temperatura real

T_{Det} = corresponde a la temperatura determinada

Γ = valor de n_x de la ecuación

Z^{DEM} = es el DEM del área de estudio

Z_{Det} = valor de altitud referencial.

Finalmente, se utilizó la media y la desviación estándar para la categorización de los cinco niveles de susceptibilidad (Tabla 5). La suma y resta de dos desviaciones estándar en la media estableció los rangos máximo y mínimo. Los valores intermedios se generaron mediante intervalos.

Tabla 5.
Susceptibilidad a incendios por rangos de temperatura.

Valor	Rangos de temperatura (°C)	Susceptibilidad
1	<11,87	Baja
2	11,87 – 12,54	Moderada
3	12,55 – 12,93	Alta
4	12,94 – 13,46	Muy alta
5	>14, 01	Extrema

Evapotranspiración potencial (ETP): La evapotranspiración potencial representa la pérdida de humedad de la cobertura vegetal (Soares y Batista, 2007; Coelho et al., 2016). El cálculo de



la ETP se realizó por medio del método Thorntwaite (1948), con la aplicación de las ecuaciones (3) (4) (5) y (6).

$$e = 16 * (10 * tm / I)^a \quad (10)$$

Donde:

e = evapotranspiración mensual sin ajustar (mm/mes),

tm = temperatura media mensual (°C),

I = índice de calor anual

a = variable establecida

$$ij = \left(\frac{tm}{5}\right)^{1.514} \quad (11)$$

Donde:

ij = Índice de calor mensual

tm = Temperatura mensual en °C

$$a = 0,000000675 * I^3 - 0,0000771 * I^2 + 0,01792 * I + 0,49239 \quad (12)$$

$$ETP_{THO} = e * L \quad (13)$$

Donde:

e = evapotranspiración mensual

L = factor de corrección, establecido para latitud 0°

Finalmente, se utilizó la media y la desviación estándar para la categorización de los cinco niveles de susceptibilidad (Tabla 6). La suma y resta de una desviación estándar en la media estableció los rangos máximo y mínimo. Los valores intermedios se generaron mediante intervalos.

Tabla 6.

Susceptibilidad a Incendios por rangos de Evapotranspiración potencial.

Valor	Rangos de ETP (mm)	Susceptibilidad
1	>632,78	Baja
2	632,79 – 693,48	Moderada
3	693,49 – 754,18	Alta
4	754,19 – 814,88	Muy alta
5	< 814,89	Extrema

Déficit hídrico: Este factor está relacionado con los incendios como consecuencia de un periodo continuo o transitorio de sequía, de esta forma cuanto mayor es la deficiencia hídrica, mayor es la susceptibilidad a la generación de incendios. Para el cálculo del déficit hídrico se aplicó la ecuación (7) establecida por Thornthwaite y Mather (1955), donde se tomó en cuenta como la entrada de agua a la precipitación y como salida la evapotranspiración potencial. Al obtener valores negativos existe déficit hídrico.

$$DEF = Prec - ETP \quad (14)$$

Donde:

Def = es el valor del déficit hídrico

Prec = es la precipitación

ETP = es la evapotranspiración potencial.

La pérdida de humedad de la vegetación aumenta la probabilidad de incendiarse. Finalmente se utilizó la media y la desviación estándar para la categorización de los cinco niveles de susceptibilidad (Tabla 7). La suma y resta de una desviación estándar en la media estableció los rangos máximo y mínimo. Los valores intermedios se generaron mediante intervalos.

Tabla 7.
Susceptibilidad a Incendios por rangos de Déficit Hídrico.

Valor	Rangos de Déficit hídrico (mm)	Susceptibilidad
1	< 0	Baja
2	0,01 – 63,28	Moderada
3	63,29 – 126,56	Alta
4	126,57 – 189,84	Muy alta
5	>189,84	Extrema

Factores físicos

Altitud: Está relacionada directamente a las relaciones climáticas del área de estudio, en altas elevaciones las temperaturas son más bajas, con lo cual se disminuye la susceptibilidad a incendios (Soares y Batista, 2007). La altitud se generó a través del uso del ASTER-DEM georreferenciado para la subcuenca. El ASTER DEM contiene píxeles con resolución espacial de 30 m basada en el modelo digital de elevación global (GEDM) de ASTER, que ha sido proporcionado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

El DEM se reclasificó para asignar susceptibilidades con base a los rangos utilizados en la metodología de Coelho et al., (2016) adaptándola al estudio. Se asignó cinco categorías mediante el uso del valor promedio y la desviación estándar. La suma y resta de una desviación estándar en la media estableció los rangos máximo y mínimo. Los valores intermedios se generaron mediante intervalos (Tabla 8).

Tabla 8.
Rangos de Altitud de Susceptibilidad a Incendios.

Valor	Rangos de altitud	Susceptibilidad
1	>3460,01	Baja
2	3460,01 – 3020	Moderada
3	3020, 01 - 2580	Alta
4	2580, 01 - 2140	Muy alta
5	< 2140, 01	Extremo

Pendientes: La velocidad de propagación de los incendios aumenta debido al incremento de las pendientes. En terrenos escarpados el tiempo de propagación la velocidad de propagación es mayor (Villares-Ruíz y López-Blanco, 2004; Soares y Batista, 2007)

Se generaron las pendientes mediante la aplicación de tecnología SIG en el DEM. Las pendientes fueron reclasificadas en cinco rangos, desde menores a 5% hasta superiores a 45%. Los rangos de susceptibilidad de la subcuenca son cinco y el nivel asciende al igual que el porcentaje de pendientes (Tabla 9).

Tabla 9.
Susceptibilidad a Incendios por rangos de pendientes.

Valor	Rangos de pendientes (%)	Susceptibilidad
1	>15	Baja
2	15,01 – 25	Moderada
3	25,01 - 35	Alta
4	35, 01 - 45	Muy alta
5	>45,01	Extrema

Orientación del terreno: La orientación tiene influencia sobre las condiciones de humedad y tipo de material combustible, en función de las condiciones de iluminación solar (Soares y Batista, 2007). Se generó la cartografía de orientaciones mediante la aplicación de tecnología SIG en el DEM. Se clasificó las orientaciones en cinco categorías (Tabla 10). Para su categorización se consideró los números de incendios ocurridos y la dirección del viento.

Tabla 10.
Susceptibilidad a incendios por rangos de Orientación del Terreno.

Valor	Orientación	Susceptibilidad
1	Plano	Baja
2	Norte – Sur	Moderada
3	Suroeste - Oeste	Alta
4	Noroeste – Sureste	Muy alta
5	Noreste - Este	Extrema

Cercanía a las vías: El mayor porcentaje de incendios se asocian a lugares donde existe mayor desarrollo de actividades antrópicas. La proximidad de carreteras y núcleos urbanos son factores que deben propiciar el aumento al riesgo de incendio en áreas de cobertura vegetal (Yang et al., 2007; Tian et al., 2013). Para el cálculo de este factor se utilizó la red vial que se obtuvo a través del Sistema Nacional de Información (SNI) y el historial de incendios del área de estudio (2014-2017) reportado por la Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR).

Se realizó la cartografía de este factor con el cálculo la distancia euclidiana en un SIG. Se determinó la distancia desde cada pixel de la red vial hasta el origen más cercano de conato de incendio registrado. Se determinaron cinco niveles de susceptibilidad para lo cual se adaptó la metodología de Coelho et al. (2016) y se sumó un valor de 20 (m) al valor mínimo (6m), hasta obtener los cinco niveles. Las distancias superiores a 66 m son la quinta categoría de susceptibilidad baja. Finalmente, las cinco categorías muestran que mientras más alejado de las vías se encuentren las áreas, existe menos probabilidad de generarse un incendio (Tabla 11).

Tabla 11.
Susceptibilidad a incendios por rangos de proximidad a las vías.

Valor	Rangos de proximidad a las vías (m)	Susceptibilidad
1	>66	Baja
2	66, 01 – 46	Moderada
3	46,01 – 21	Alta
4	21,01 – 6	Muy alta
5	< 6,01	Extrema

Cobertura del suelo: Para el estudio se utilizó una imagen satelital LANDSAT 8 para el año 2017, a la cual se hizo un pre-tratamiento para realizar las correcciones radiométricas y

geométricas. Se realizó una clasificación supervisada de la imagen mediante el uso de 420 puntos de control, repartidos entre los ocho tipos de coberturas de suelo presentes en el cantón: bosque, páramo, vegetación arbustiva, cuerpo de agua, frutales, cultivos y zona urbana.

La clasificación supervisada se validó mediante el uso de coordenadas de control de las ocho coberturas de suelo. Se aplicó el índice Kappa, cuyo valor fue de 0.7. Según las categorías de fuerzas de concordancia utilizadas por Landis y Koch (1977) esta clasificación se “considerable”. Las categorías de susceptibilidad a incendios se asignaron en base a información recopilada después de consulta a los once expertos antes señalados (Tabla 12).

La clasificación de los rangos de susceptibilidad de las diferentes coberturas vegetales se realizó después de aplicar una entrevista a los 11 expertos previamente mencionados. La moda permitió establecer de forma preliminar el nivel de susceptibilidad. Estos valores fueron socializados y mediante la metodología Delphi se alcanzó el consenso entre los expertos y se definió las cinco categorías (Tabla 12).

Tabla 12.

Susceptibilidad a incendios por cobertura de suelo.

Valor	Coberturas del suelo	Susceptibilidad
1	Cuerpo de agua	Baja
2	Zona urbana	Moderada
3	Frutales	Alta
4	Bosque	Muy alta
4	Pastizal	Muy alta
4	Vegetación arbustiva	Muy alta
5	Cultivos	Extrema
5	Páramo	Extrema

Generación de ecuación la susceptibilidad a incendios de la cobertura vegetal

El primer paso hacia la generación de incendios fue generar coeficientes ponderados por cada factor. Se usaron dos métodos el multicriterio Análisis de Proceso Jerárquico (AHP) desarrollado por Saaty (1992). Se usó el método Delphi y se alcanzó el consenso de cuáles son los factores influyen en la ocurrencia de incendios. La escala fue de (1) a (9) donde el valor más alto representa mayor influencia (Tabla 13)

Tabla 13.

Influencia de los factores en la susceptibilidad a incendios.

Factores biofísicos	Ponderación
Cobertura vegetal	1
Temperatura	2
Pendientes	3
Orientación del terreno	4
Evapotranspiración	5
Déficit hídrico	6
Altitud	7
Precipitación	8
Cercanía a las vías	9

Después se adaptó el Análisis de Proceso Jerárquico, y se fijaron los valores de importancia mediante el uso de una escala de comparación pareada. Los coeficientes determinados

representan la ponderación por cada variable y finalmente construyen la ecuación de susceptibilidad de incendios (Tabla 14, Tabla 15 y Ecuación 8).

Tabla 14.

Escala de 9 Puntos para Comparaciones Apareadas.

Importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen idénticamente al objetivo
3	Dominancia débil	La experiencia manifiesta que existe una débil dominancia de un elemento sobre otro
5	Fuerte dominancia	La experiencia manifiesta que existe una fuerte dominancia de un elemento sobre otro
7	Demostrada dominancia	La dominancia de un elemento sobre otro es completamente demostrada
9	Absoluta dominancia	Las evidencias demuestran que un elemento es absolutamente dominado por otro
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Son valores intermedios de decisión

Fuente: García, Noriega, Díaz y De la Riva (2006)

Tabla 15.

Ponderación de Factores Biofísicos que influyen en Incendios.

Factores	Ponderación
Orientación del terreno	0,08
Cercanía de las vías	0,05
Altitud	0,08
Pendientes	0,07
Temperatura	0,08
Cobertura vegetal	0,19
Evapotranspiración	0,17
Déficit hídrico	0,15
Precipitación	0,11

$$\begin{aligned}
 \text{Susceptibilidad} = & 0,19CV + 0,17ETP + 0,15DH + 0,11Prec + 0,08T + 0,08Alt + 0,08OT \\
 & + 0,07Pend + 0,05Vias \quad (15)
 \end{aligned}$$

Donde:

CV=Cobertura de suelo

ETP = Evapotranspiración

DH = Déficit Hídrico

P = Precipitación

T = Temperatura

Alt = Altitud

OT = Orientación del terreno

Pend = Pendiente

Vías = Proximidad a Vías

En base a la ecuación obtenida se aplicó la técnica de álgebra de mapas y se generó el modelo de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal. La susceptibilidad de incendio se dividió en cinco categorías: muy baja, baja, moderada, alta y extrema.



Etapa II. Validación estadística del modelo de susceptibilidad de incendios en la subcuenca del Río Mataquí

Se validó el modelo comparando las zonas de muy alta y extrema susceptibilidad con los incendios registrados por la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos en el año 2018. Se planteó como hipótesis la existencia de asociación entre el modelo obtenido y los incendios registrados. La comprobación estadística se realizó, con la aplicación de la curva ROC.

Resultados y discusión

En la subcuenca del río Mataquí menos del 1% no presenta algún tipo de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal. Una cuarta parte del territorio, alrededor 26%, presenta susceptibilidad alta o extrema a este evento extremo, tal como se observa en la Figura 16.

Las susceptibilidades alta y extrema se concentran en la parte baja de la cuenca. Los espacios territoriales que presentan susceptibilidad extrema ocupan únicamente el 2 % de la subcuenca, se los podría considerar parches de alta peligrosidad, por su forma de distribución. Son espacios pequeños que se observa se localizan dentro de las parroquias urbanas de Pimampiro, Chuga. La susceptibilidad alta se concentra con mayor proporción en los mismos sectores, pero a la vez se presenta al norte de las parroquias San Francisco de Sigsipamba y Mariano Acosta. En la subcuenca el 24% de su territorio presenta susceptibilidad alta.

Tanto en la susceptibilidad alta como extrema se produjeron por las siguientes características: altas temperaturas, baja pluviosidad, déficit hídrico, alta evapotranspiración, poca distancia a las vías, pendientes escarpadas y su ubicación sobre cultivos, pastos y bosques. Sin embargo, la diferencia entre una y otra susceptibilidad en la subcuenca se debió por la presencia de cultivos y pastos, temperaturas superiores a 14°C, pendientes escarpadas superiores a 45% y finalmente la presencia de vías a menos de 66 metros.

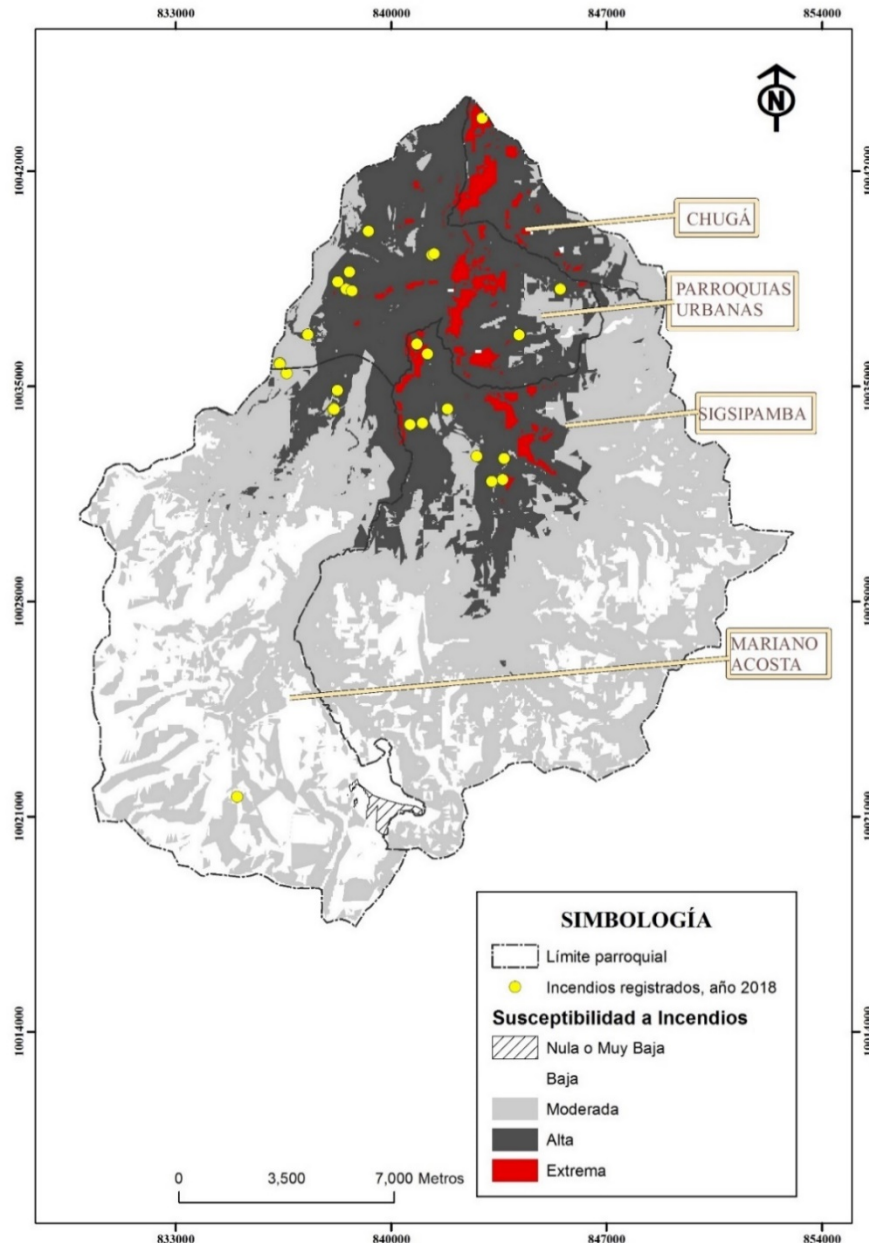


Figura 16. Modelo de Susceptibilidad de Incendios de la Subcuenca del Río Mataquí.

Un resultado particular en la subcuenca es observar que en la parte alta de la subcuenca no se presenta ni alta ni extrema susceptibilidad. Esta condición se produce a pesar de la existencia de coberturas de páramos y bosques. Aunque el páramo es considerado una cobertura muy susceptible, la presencia de bajas temperaturas, alta pluviosidad, excedente hídrico, y su difícil accesibilidad harían que la susceptibilidad en este ecosistema sea entre baja y moderada. Similares condiciones ocasionarían que los bosques de la parte alta de la subcuenca presenten moderada susceptibilidad.

Sin embargo, esto no significa que estas coberturas y sectores estén exentos a la propagación de incendios, porque únicamente son menos susceptibles a la ignición. Hay que recordar, que la cobertura vegetal es el factor que más influye para que un incendio inicie, debido a la capacidad de combustión por fenología vegetal (Millery y Urban, 2000; Rentería-Anima et al., 2005; Jiménez et al., 2016). Además, el fuego puede propagarse sin control por los ecosistemas y aumentar su intensidad a medida que aumenta la inclinación de la pendiente.

En Ecuador, el constante uso del fuego en prácticas agrícolas y ganaderas en el cambio de uso del suelo ocasiona pérdida de coberturas naturales (Estacio y Narváez, 2012).

Validación del modelo

La validación del modelo con los incendios registrados en el año 2018 muestra un área bajo la curva de 0,95% (Figura 17). En ese sentido se acepta al modelo de susceptibilidad como válido, con lo cual se acepta la relación directa entre la susceptibilidad obtenida y las cicatrices de incendios, que evidencian la presencia de incendios en el sector.

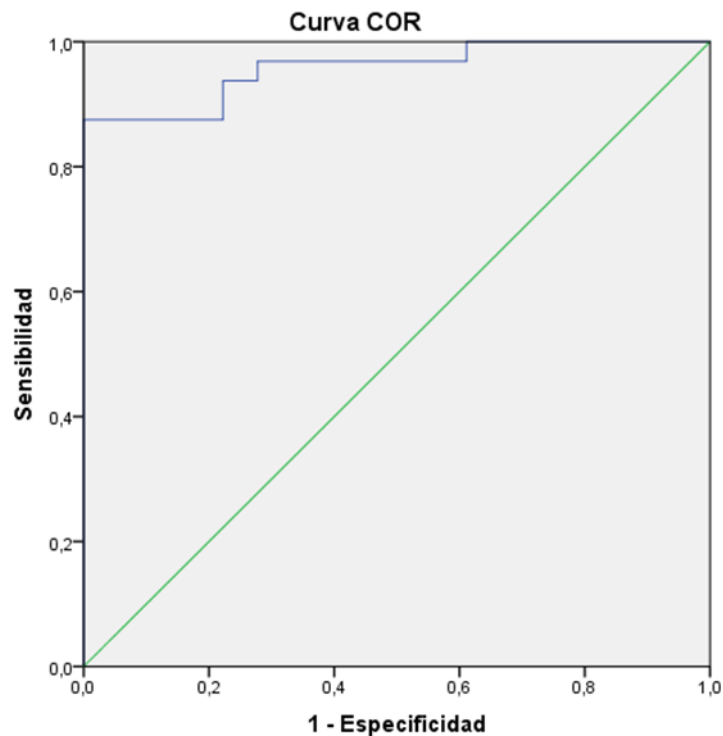


Figura 17. Curva ROC (COR) de validación de modelo de susceptibilidad.

Autores como Pabón-Caicedo (2011), Muñoz-Robles y Santana-Arias (2018) manifiestan que la cobertura vegetal y factores climáticos contribuyen de manera más frecuente en la predicción de patrones espaciales en la ocurrencia de incendios Sin duda, la combinación espacial de factores climáticos (temperatura, precipitación), antrópicos (cercanía a las vías y centros poblados, cobertura vegetal) y topográficos (pendientes, altitud) permite determinar las zonas susceptibles a incendios con mayor exactitud (Yang et al., 2007; Tian et al., 2013; Ajin et al., 2017).

Conclusiones

La subcuenca del río Mataquí presenta un 24% de su territorio presenta susceptibilidad alta a incendios de cobertura vegetal y un 2% presenta susceptibilidad extrema. Ambos tipos de susceptibilidad se concentran en la parte baja de la subcuenca hidrográfica. Tanto en la susceptibilidad alta como extrema se presentaron las siguientes características: altas temperaturas, baja pluviosidad, déficit hídrico, alta evapotranspiración, poca distancia a las vías, pendientes escarpadas y su ubicación sobre cultivos, pastos y bosques. Aunque el páramo fue considerado una cobertura muy susceptible, la presencia de bajas temperaturas, alta pluviosidad, excedente hídrico, y su difícil accesibilidad hicieron que la susceptibilidad en este ecosistema sea entre baja y moderada. Esto implica que este ecosistema no está exento de incendios. Porque si bien son áreas con baja probabilidad de ignición en



comparación a otras coberturas, a la vez son áreas con capacidad de combustión en caso de propagación.

El modelo de susceptibilidad obtenido mediante la aplicación SIG de la metodología multicriterio es confiable. Debido a que entregó información rápida sobre la disposición espacial de los incendios de cobertura vegetal en el territorio. La combinación espacial de factores climáticos, antrópicos y topográficos permitió determinar las zonas susceptibles a incendios con mayor exactitud.

Referencias

- Aguilera-Sánchez, M. (2015). *El Régimen Jurídico de los Incendios Forestales: Especial referencia al contexto jurídico y territorial de Cataluña*. Tarragona, España: Publicacions URV Arola Editors, S. L.
- Ajin, R., Loghin, A., Vinod, P., y Jacob., M. (2017). Mapping of forest fire risk zones in Peechi-Vazahani Wildlife Sanctuary, Thrissur, Kerala, India: A study using geospatial techniques. *Wetlands Biodiversity*, 7(2017), 7-16.
- Alaminos-Chica, A., y Castejón-Costa, J. (2006). *Elaboración, análisis e interpretación de encuestas, cuestionarios y escalas de opinión*. San Vicent de Raspeig. España: Marfil S.A.
- Andrade, L., y Moreano, R. (2013). Sistemas de Información para la interpolación de datos de Temperatura y Precipitación del Ecuador. *Politécnica*, 23(1), 70-75.
- Arcos, G. (2015). *Aplicación de diferentes métodos de evaluación de riesgo de incendios en la acomodación de un buque*. España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Astete, J., y Cárcamo, R. (2015). Estudio comparativo de evaluación de riesgo de incendio aplicado a un edificio habitacional. *ORP Journal*, 3(2), 5-27.
- Bond, W., y Keeley, J. (2005). Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 20(7), 388-394.
- Coelho, F., Dos Santos, A., Fiedler, N., Ribeiro, G., Gomes, A., y Banhos, A. (2016). Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study Espiritu Santo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 173(20), 65-71.
- Columba, M., y Quisilema, W. (2013). *Determinación de áreas vulnerables a incendios forestales y cálculo de probabilidad de ocurrencia mediante lógica Fuzzy aplicando herramientas geoinformáticas, en el Distrito Metropolitano de Quito (Tesis de Pregrado)*. Quito-Ecuador: Universidad de la Fuerzas Armadas.
- Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2011). *REDATAM + SP*. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/temas/redatam>
- Corporación OSSO. (2016). *DesInventar, Sistema de Inventario de efectos de desastre 1994-2016*. Cali-Valle- Colombia: UNISDR.
- De la Riva, J., y Pérez, F. (2005). *El factor humano en el riesgo de incendios forestales a escala Municipal. Aplicación de técnicas SIG para su modelización*. Zaragoza, España: Departamento de Geografía y Ordenamiento del territorio. Universidad de Zaragoza.
- Desinventar. (25 de Julio de 2020). *Sistema de inventario de efectos de desastres*. Obtenido de Ecuador-Sistemas de Información de Desastres de Emergencias: <http://www.desinventar.org/es/database>



- Díaz-Hormazábal, I., y González, M. (2016). Análisis espacio-temporal de incendios forestales en la región del Maule, Chile . *Bosque*, 19(1), 147-158.
- Estacio, J., y Narváez, N. (2012). Incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ): Conocimiento e intervención pública del riesgo. *Letras Verdes* 11, 27-52.
- Fondo de prevención y Atención de Emergencias (FOPAE). (2002). *Zonificación de Riesgo por Incendio Forestal y Diseño de las Medidas Preventivas y Operativas para los Cerros Orientales de Bogotá D.C.* Bogotá, Colombia: Sistema Distrital para la Prevención y Atención de Emergencias.
- Fuertes-Peña, J., Rubio-Romero, J., y Rubio-Gámez, M. (2017). *Método de evaluación del riesgo de incendio, herramientas decisivas en la aplicación de medidas de prevención y protección contraincendios de personas, bienes y actividades.* Barcelona-España: HOSPITECNIA.
- García-Valdés, M., y Suárez-Marín, M. (2013). El método Delphi para la consulta a expertos en la investigación científica. *Cubana de Salud Pública*, 39(2), 253-267.
- Holdridge, L. (1987). *Ecología basada en zonas de vida.* San José, Costa Rica: Agroamérica.
- Ibarra-Montoya, J., y Huerta-Martínez, F. (2017). Modelado espacial de incendios: una herramienta predictiva para el Bosque La Primavera, Jalisco-México. *Ambiente y Agua*, 11(1), 36-49.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (07 de agosto de 2020). *Proyección de la Población Ecuatoriana, por años calendario, según cantones 2010-2020.* . Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/inec-presenta-sus-proyecciones-poblacionales-cantonales/>
- Jiménez, G., Urrego, G., y Toro, R. (2016). Evaluación del comportamiento de incendios de la vegetación en el norte de Antioquia (Colombia): Análisis del paisaje. *Colombia Forestal*, 19(2), 37-55.
- Julio, G., y Bosnich, J. (2005). *Fundamentos del Manejo de Fuego (Tesis de Pregrado).* Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Landis, J., y Koch, G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometric*, 33(1), 159-174.
- Miller, C., y Urban, D. (2000). Connectivity of forest fuels and Surface fire regimes. *Landscape ecology*, 15(2), 145-154.
- Ministerio de Ambiente del Ecuador (MAE). (2014). *Actualización de prioridad del "Programa nacional de reforestación con fines de conservación ambiental.* Quito.
- Muñoz- Robles, C., y Santana-Arias, R. (2018). Puntos de calor en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí: patrones espaciales y factores asociados. *Madera y Bosque*, 24(1), 1-32.
- Murillo, F. (2011). *Cuestionarios y escalas de actitudes.* . Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- Oliveira, D. (2002). *Zoneamento de risco de incêndios em Povoamentos Florestais no Norte de Santa Catarina. (Tesis de Postgrado).* Paraná, Brasil: Universidad Federal de Paraná, Brasil.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2006). *Fire management global assessment 2006.* Obtenido de www.fao.org/docrep/fao/009/A0969E/A0969E00.pdf



- Pabón-Caicedo, J. (2011). *Incendios de la cobertura vegetal en Colombia y su relación con la variabilidad climática y con el cambio climático*. Cali-Colombia: Universidad Autónoma de Occidente.
- Parra-Lara, A., y Bernal-Toro, F. (2011). *Incendios de la cobertura Vegetal*. Cali, Colombia: Dirección de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico.
- Pourrut, P. (1983). *Los climas del Ecuador*. Quito: Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Prado, M. (2014). *Diseño de un modelo SIG para la determinación de zonas en riesgo por incendios forestales en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Rentería-Anima, J., Treviño-Garza, E., Návarena-Chaidez, J., Aguirre-Calderón, O., y Catú-Silva, I. (2005). Caracterización de combustible leñoso en el Ejido Pueblo Nuevo, Durango. *Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 11(1), 51-56.
- Reyes, C. (2013). *Estudio de las causas, ocurrencias y daño por Incendios Forestales en la Región de los Lagos 2003-2013 (Tesis de Pregrado)*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Riberiro, L., Koproski, L., Stolle, L., Lingnau, C., Viana, R., y Batista, A. (2007). Zoneamento de riscos de incêndios florestais para a fazenda experimental do Canguiri, Pinhais (PR). *FLORESTA*, 38(3), 561-572.
- Saaty, T. (1992). *Decision making for leaders*. Pittsburgh, USA: RWS Publication.
- Sarango-Cobos, Johanna, M. J., Muñoz, L., y Aguirre, Z. (2019). Impacto ecológico de un incendio forestal en la flora del páramo antrópico del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”, Loja, Ecuador. *Bosques Latitud Cero* 9 (2), 101-114.
- Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. (2019). *Informe de Situación - Incendios Forestales a nivel nacional*. Samborombón.
- Soares, R., y Batista, A. (2007). *Incêndios Florestais: controle, efeitos e uso do fogo*. Curitiba, Brazil: FUPEF.
- Thornthwaite, C. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- Thornthwaite, C., y Mather, R. (1955). *Ther wáter balance*. Certenton, Estados Unidos: Publications in climatology, laboratory of climatology.
- Tian, X., Zhao, F., Shu, L., y Wang, W. (2013). Distribution characteristics and the influence factors of forest fires in China. *Forest Ecology and Management*, 310(3), 460-467.
- Villanueva, J. (1984). *NTP100: Evaluación del riesgo de incendio: Método Gustav-Purt*. España: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene.
- Villares-Ruíz, L., y López-Blanco. (2004). *Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el volcán Malinche*. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera e Instituto de Geografía, UNAM.
- Yang, J., He, H., Shirfley, S., y Gustafson, E. (2007). Spatial Patterns of Modern Period Human-Caused Fire Occurrence in the Missouri Ozark Highlands. *Forest Science*, 53(1), 1-15.
- Yeguez, M., y Alban, M. (2012). Índice de riesgo de incendio forestal dinámico para la cuenca alta del río Chama. *Forestal Venezolana*, 56(2), 127-134.



Zonificación de Cobertura Vegetal Propensa a Incendios en el Cantón Ibarra: Una Mirada al Centro Poblado Más Grande de la Cuenca del Río Mira

Saúl Anrango¹, Merly Chingal¹ y Paúl Arias Muñoz²

Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador. Correo de correspondencia: dparias@utn.edu.ec

Resumen

La expansión descontrolada del fuego puede ocasionar efectos irreversibles en la vegetación natural. En el Ecuador, en el año 2018 los incendios de cobertura vegetal ocasionaron una pérdida de 13452,6 hectáreas de cobertura. En el cantón Ibarra también se han perdido hectáreas a causa de los incendios de cobertura vegetal. Bajo esos antecedentes, en el presente estudio se realizó una zonificación de cobertura vegetal propensa a incendios en el cantón Ibarra. Se usaron nueve factores que inciden directamente en los incendios de cobertura vegetal: precipitación, temperatura, déficit hídrico, evapotranspiración potencial, pendientes, orientación del terreno, proximidad a las vías, cobertura y uso de suelo y altitud, las cuales fueron reclasificadas mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica y ponderadas a través del proceso multicriterio analítico jerárquico de Saaty. Los resultados mostraron que el cantón Ibarra presenta cinco categorías de susceptibilidad que son: muy bajo, bajo, moderado, alto y extremo. Las zonas con susceptibilidad extrema ocupan 14,55% en el cantón, donde las coberturas con mayor susceptibilidad son cultivos, pastizales, vegetación arbustiva y bosque.

Palabras clave: cobertura vegetal, incendios, multicriterio, susceptibilidad.

Introducción

Existen diferentes perturbaciones que pueden afectar la dinámica de los ecosistemas, entre las cuales se encuentran los incendios (Burel y Baudry, 2002). El fuego es una perturbación que ha impactado con mayor intensidad la estructura, composición y dinámica de los ecosistemas (Bond y Keeley, 2005). Existen incendios que ocasionan pérdida de individuos y biomasa, los cuales pueden producirse de forma súbita o episódica y ocasionar alteraciones en las interrelaciones presentes en el ecosistema (Lloret, 2004). Autores como Parra-Lara y Bernal-Toro (2010) señalan que a este tipo de incendios se los debe categorizar como “incendios de cobertura vegetal”. Porque esta categoría de incendios sobre los ecosistemas es más amplia y no se reduce a una cobertura vegetal, el bosque. De ahí que, hablar de incendios forestales es una forma reducida de concebir un incendio. Debido a que, la naturaleza es un conjunto heterogéneo de coberturas vegetales sobre la cual se puede propagar el incendio.

Los incendios de cobertura vegetal han pasado de un origen generalmente natural a orígenes antrópicos, de forma casi exponencial, lo cual ha ocasionado que los eventos incendiarios vayan en aumento (Ferri, 2003). El origen antrópico puede ser por características como: cambio de uso de suelo (Koutsias et al., 2010), características del sistema agrícola (Rodrigues et al., 2014), densidad y distribución poblacional (Mourão y Martinho, 2014; Gutiérrez et al., 2015) o accesibilidad (Moreno, 2011). En las últimas décadas se ha convertido en uno de los problemas ambientales más importantes, en parte debido a la incidencia del cambio climático, porque con el aumento de la temperatura se aumenta la probabilidad de ignición de la cobertura vegetal (Litscherta et al., 2014).

Existen otros factores que influyen en la ocurrencia de un incendio, los cuales se encuentran asociados al clima tales como: temperatura, viento, humedad (Jaiswal et al., 2002). La topografía también es un factor muy importante que con el viento influyen en la propensión del fuego, el cual se propaga más rápidamente en la pendiente (Parisien et al., 2005). Sin embargo, la causa que aumenta la probabilidad de ignición es la quema de biomasa por incendios de pastizales, bosques y residuos, la cual se la realiza para convertir nuevas tierras a usos agrícola-ganaderos (Mielnicki et al., 2005). Muñoz (2000) reafirma esta hipótesis y señala que la principal causa que origina los incendios es el uso del fuego en agricultura y especialmente en la actividad ganadera.

Las consecuencias directas de esta última actividad es la pérdida de cobertura vegetal natural. El cambio de cobertura incitada por el fuego ocasiona grandes alteraciones en el ecosistema, como aumento de la escorrentía superficial (Anderson, Hoover y Reinhart, 1976; Helvey, 1980; Townsenda y Douglas, 2004; Solera y Cerdá, 2009, Seibert, et. al., 2010; Robinne et. al, 2016), afección en la disponibilidad de agua (DeBano et al., 1998), aumento de la tasa de erosión del suelo (Anderson et al., 1976; Morris y Moses, 1987; Scott, 1993; Lavee et al., 1995; Smith et al., 2011; Nyman et al., 2011) y destrucción del paisaje (Corbi, 2014).

Sin duda, el impacto del hombre es innegable desde la emisión de combustibles fósiles, su contribución al cambio climático (IPCC, 2014), hasta el aumento de asentamientos en zonas propensas a incendios (Madsen, Hayne y McCaffrey, 2018). En consecuencia, cada vez se observa más impactos negativos en la dinámica de los ecosistemas (Hunter & Robles, 2020), y las comunidades humanas (Mhawej et al., 2017; (Madsen et al., 2018). En ese sentido, los efectos de los incendios de cobertura vegetal van desde el nivel local y regional, si se considera los problemas que causan a las comunidades anfitrionas (Thapa et al., 2013), y las pérdidas humanas y económicas manifestadas (Hunter y Robles, 2020).

En el Ecuador, en el año 2018 los incendios de cobertura vegetal ocasionaron una pérdida de 13452,6 hectáreas de cobertura, como consecuencia de 929 eventos registrados. De acuerdo con estos datos las provincias que presentaron un mayor número de incendios fueron: Loja, Pichincha, Chimborazo y Azuay. Imbabura, por su parte, registró un total de 489,6 hectáreas quemadas, como consecuencia de 60 eventos registrados (Secretaria de Gestión de Riesgos, 2018).

El cantón Ibarra al ser la capital de la provincia Imbabura ha estado expuesto a los incendios de cobertura vegetal, por consiguiente, también se han perdido hectáreas de su territorio. Pese a ello, no existen trabajos previos sobre la susceptibilidad de la cobertura vegetal a este tipo de incendios. Por lo cual, el objetivo principal de este estudio fue desarrollar un modelo estadístico con el fin de zonificar la susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Este modelo asigna ponderaciones a variables climáticas y físicas, elegidas por la practicidad de su aplicación y su relación directa con la ocurrencia de incendios de cobertura vegetal. La principal hipótesis que se plantea es que el modelo estadístico de susceptibilidad obtenido se comporta de manera similar que los focos de calor registrados en el área de estudio.

Área de estudio

El cantón Ibarra está ubicado a 115 km al norte de Quito y a 125 km al sur de la ciudad de Tulcán, con una extensión de 1105,56 km² (Figura 18). Está conformado por cinco parroquias urbanas: San Francisco, El Sagrario, Caranqui, Alpachaca y Priorato, y siete parroquias rurales: San Antonio, La Esperanza, Angochagua, Ambuquí, Salinas, La Carolina y Lita. El cantón ocupa el 20,78% de la cuenca del río Mira y es el cantón donde residen más número de habitantes dentro de la cuenca hidrográfica.



De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Censos (2020) la población proyectada para este año es de 221149 habitantes, lo cual representa el 26,53% de la población total existente en la cuenca hidrográfica. Las principales actividades productivas son de tipo: agropecuario, industrial y servicios, de los cuales el más representativo es el sector de servicios con un 58% en actividades de comercio al por mayor y menor. El sector industrial representa el 19, 38% centrado en la industria manufacturera. Finalmente, el sector agropecuario con un 11,61% se da principalmente en las parroquias rurales: Lita, La Carolina y Salinas en actividades ganaderas, agrícolas, silvicultura y pesca (Instituto Nacional de Estadística y Censos , 2010).

De hecho, hasta el año 2018 se estima que el 53% del territorio es ocupado por cultivos y pastos, y únicamente el 2% son espacios urbanos. Por ello, la distribución de cobertura en el cantón es heterogénea y en el cantón se distribuyen 11 tipos de ecosistemas de acuerdo con la clasificación de Holdridge (1967) que van desde páramo pluvial subalpino en las zonas altas hasta bosque muy húmedo premontano en las zonas bajas.

El cantón Ibarra se encuentra en un rango altitudinal de 480 a 4500 m s. n. m., y presenta temperaturas medias anuales desde 5°C hasta 23°C. El clima en el cantón se divide en tres épocas: una seca y dos épocas lluviosas. De acuerdo con el Climograma, la época seca se distribuye entre los meses de julio y agosto con precipitaciones no mayores a 34,69 mm y temperaturas no inferiores a 15,90 °C, y las dos épocas lluviosas están comprendidas entre los meses de enero – junio y septiembre – diciembre, las cuales registraron valores de precipitación de 123,2 mm a 143,3 mm y temperaturas entre 16 °C a 16,29 °C (Figura 19).

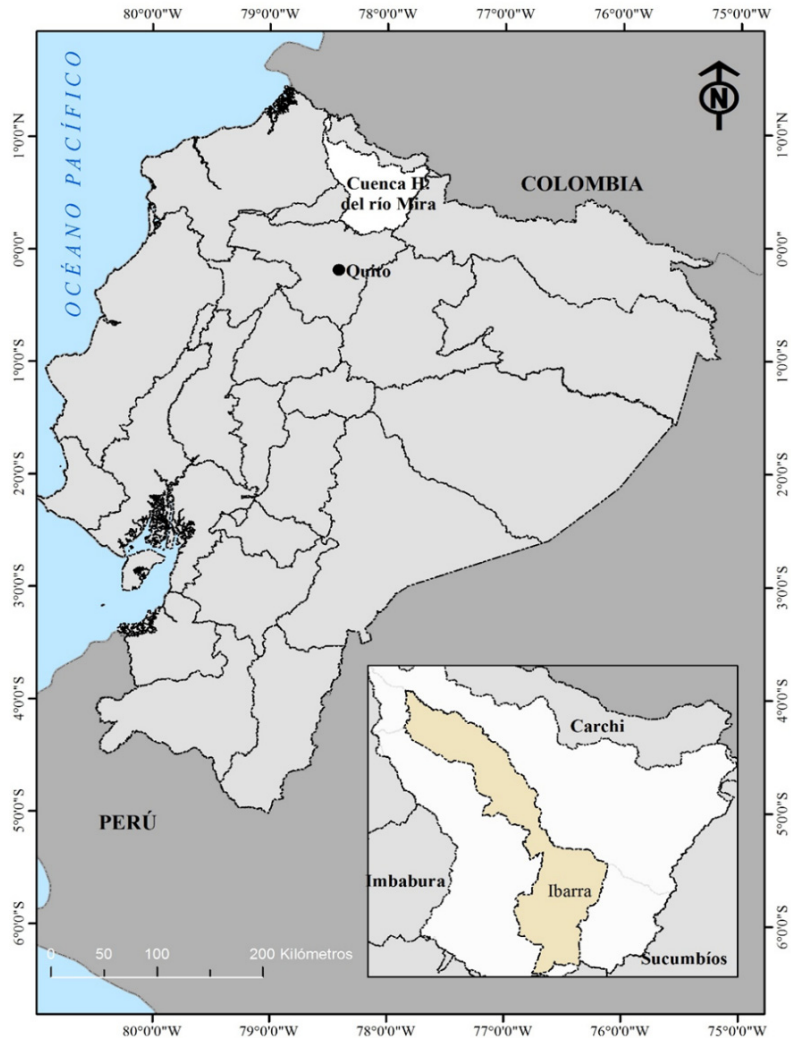


Figura 18. Mapa de ubicación del cantón Ibarra en la cuenca del río Mira.

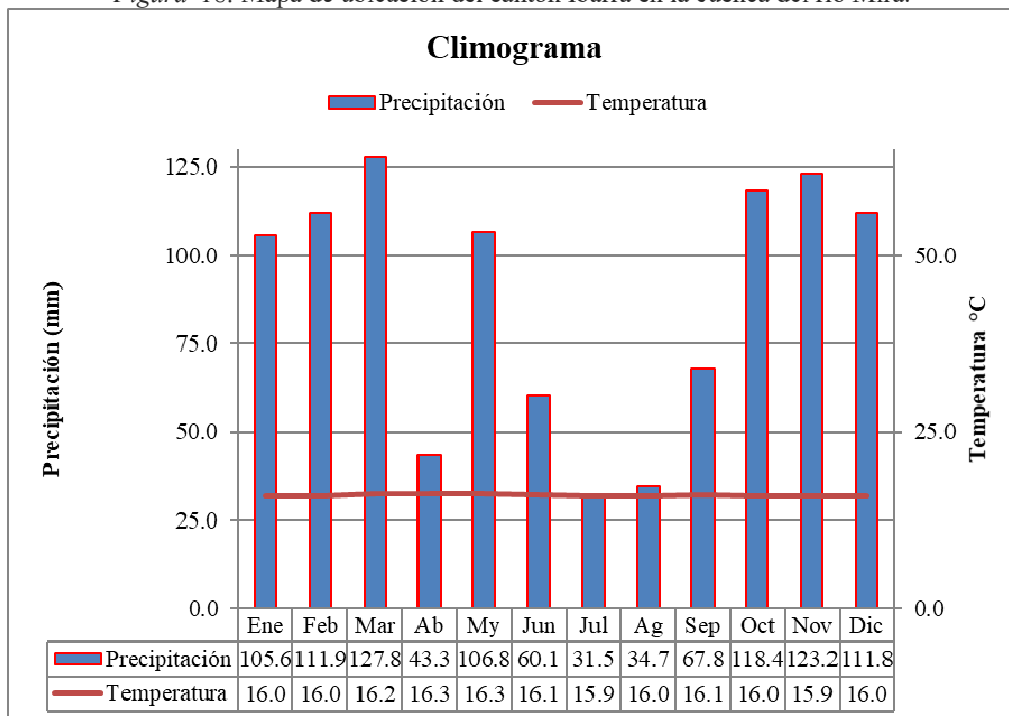


Figura 19. Climograma del cantón Ibarra.

Métodos

El método que se aplicó para la presente investigación fue no experimental transversal, a través del uso de modelos espacialmente explícitos. Para la consecución de los objetivos el proceso metodológico se dividió en dos etapas:

Etapas I: Zonificación de áreas susceptibles a incendios de cobertura vegetal en el Cantón Ibarra

En esta etapa, primero, se realizaron entrevistas a once expertos seleccionados mediante la metodología Snow Ball. Esta metodología permitió la selección de un nuevo experto por recomendación de otro, lo cual hizo fácil su ubicación. Cuando se volvió a repetir el nombre del experto se saturó la información y se finalizó la selección. A cada experto se presentaron las nueve posibles variables, planteadas por Coelho et al. (2016), como predictoras de la susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal. Las respuestas fueron tabuladas y después de aplicar la moda estadística se identificaron respuestas similares en los expertos. De este modo, se identificaron nueve (9) factores que inciden en los incendios de cobertura vegetal que se congregaron en dos grupos: factores físicos y factores climáticos. Los factores físicos son pendientes del terreno, cobertura de suelo, proximidad a las vías, orientación del terreno, altitud. Los factores climáticos son precipitación, temperatura, evapotranspiración y déficit hídrico.

Por cada factor se realizó cartografía temática y según sus características particulares que contribuyen a la ocurrencia de incendios se establecieron cinco niveles de susceptibilidad en cada uno de ellos: muy bajo, bajo, moderado, alto y extremo; excepto en cobertura de suelo donde también se estableció la categoría nula. La calificación de los nueve factores predictores se detalla a continuación.

Factores físicos

Altitud: Se generó a través del uso del ASTER-DEM georreferenciado para el cantón Ibarra. El ASTER DEM está compuesto por una cuadrícula de celdas con una resolución espacial de 30 m basada en el modelo digital de elevación global (GEDM) de ASTER, que ha sido proporcionado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

El DEM se reclasificó para asignar susceptibilidades con base a los rangos utilizados en la metodología de Coelho et al. (2016) adaptándola al estudio. El proceso de asignación de susceptibilidad se lo hizo a través del uso de la *regla práctica del intervalo*, donde la mayoría de los valores (hasta 95%) se encuentran dentro de dos desviaciones estándar de la media (Triola, 2004). Los valores asignados a la susceptibilidad fueron cinco, donde el valor uno es una susceptibilidad muy baja y cinco es extrema (Tabla 16).

Tabla 16.

Determinación de susceptibilidad.

Valor	Susceptibilidad	Regla práctica del intervalo
1	Muy Baja	Media – dos desviaciones estándar
2	Baja	Media – una desviación estándar
3	Moderada	Media
4	Alta	Media + una desviación estándar
5	Extrema	Media + dos desviaciones estándar

Fuente: Modificado de Coelho et al. (2016)

Pendientes: Se estima que mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno y mientras más alto sea el valor de la pendiente, más empinado será el terreno (Burrough y McDonell, 1998). Se obtuvo la calificación de pendientes a partir del uso del

DEM en un Sistema de Información Geográfica. El geodata tipo raster se calculó en unidades de porcentaje (altitud en porcentaje), al cual se realizó una reclasificación asignando rangos entre 5% y 45%. Finalmente se clasificó en cinco niveles de susceptibilidad. (Tabla 17).

Tabla 17.

Clasificación de pendientes para el cantón Ibarra.

Valor	Rangos de pendientes (%)	Susceptibilidad
1	< 5	Muy baja
2	5 - 15	Baja
3	15 - 25	Moderada
4	25 - 45	Alta
5	< 45	Extrema

Orientación del terreno: El cálculo de la orientación del terreno se presenta mediante valores de cada pixel que muestran la dirección de brújula a la que apunta la superficie en esa ubicación (Burrough y McDonell, 1998). Se mide en el sentido de las agujas del reloj en grados de 0 (hacia el norte) a 360 (hacia el norte) y el valor es negativo en las zonas planas (Tabla 18).

Tabla 18.

Orientación del terreno.

Orientación	Grados (°)
Plano	-1
Norte – Noreste	0 – 45
Noroeste – Oeste	45 – 90
Oeste – Suroeste	90 – 135
Suroeste – Sur	135 – 180
Sur – Sureste	180 – 225
Sureste – Este	225 – 270

Se calculó la orientación del terreno utilizando el DEM mediante el uso del SIG con la herramienta *Aspecto*. La susceptibilidad se determinó también en cinco categorías y se la obtuvo combinando información con el historial de incendios y la dirección del viento de las estaciones meteorológicas: Cahuasqui, Mira, Izobamba, Inguincho, Ibarra y Otavalo (Tabla 19).

Tabla 19.

Clasificación de Orientación para el cantón Ibarra.

Valor	Orientación del terreno	Susceptibilidad
1	Plano	Muy Baja
2	Oeste	Baja
3	Sur, Sur Oeste	Moderada
4	Norte, Nordeste, Sureste, Noreste	Alta
5	Este	Extrema

Proximidad a las vías: Se establece que a menor distancia de las vías es mayor la probabilidad de ocurrencia de incendios (Flores et al., 2016). Para calcular este factor se utilizó la red vial que se obtuvo a través del Sistema Nacional de Información (SNI) y el historial de incendios del cantón a través de la Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR).

El proceso inició con el cálculo de la distancia euclidiana en un SIG. Se determinó la distancia desde cada pixel de la red vial hasta el origen más cercano de conato de incendio

registrado. Finalmente, se determinó cinco niveles de susceptibilidad a través de la *regla práctica del intervalo*, donde las distancias más cortas tienen una susceptibilidad extrema y las distancias más lejanas una susceptibilidad muy baja (Tabla 20).

Tabla 20.
Clasificación de proximidad a las vías.

Valor	Rangos de cercanías a las vías (metros)	Susceptibilidad
1	> 75	Muy Baja
2	57 – 75	Baja
3	39 – 57	Moderada
4	24 – 39	Alta
5	< 21	Extrema

Cobertura de suelo: Para el estudio se utilizó una imagen satelital LANDSAT 8 para el año 2017, a la cual se hizo un pre-tratamiento para realizar las correcciones radiométricas y geométricas. Se realizó una clasificación supervisada de la imagen mediante el uso de 296 puntos de control, repartidos entre los ocho tipos de coberturas de suelo presentes en el cantón: cultivos, bosque, vegetación arbustiva, páramo, cuerpos de agua, área urbana, área erosionada y pastizal.

Posteriormente, se validó la clasificación supervisada mediante el uso de 100 coordenadas de control de las ocho coberturas de suelo. Se aplicó el índice Kappa, cuyo valor fue de 0,795. Según las categorías de fuerzas de concordancia utilizadas por (François et al., 2003) esta clasificación es “considerable”. Finalmente, se asignó las categorías de susceptibilidad a incendios, en base a la información recopilada después de consulta a los once expertos antes señalados (Tabla 21).

Tabla 21.
Clasificación de cobertura de suelo.

Valor	Cobertura del suelo	Susceptibilidad
2	Cuerpo de agua	Nula
3	Área erosionada	Baja
4	Bosque, pastizal, vegetación arbustiva	Alta
4	Cultivo, páramo	Extrema

Factores climáticos

Precipitación media: Es un factor que puede ser considerado de influencia directa en la ocurrencia de incendios porque el riesgo extremo se da en zonas con bajas precipitaciones (Pérez et al., 2013). Para su cálculo se obtuvo un geodata tipo raster de los datos medios mensuales del periodo 1970 a 2000 de la plataforma World Clim. Este archivo geoespacial se proyectó a la zona 17 Sur, se hizo un resampleo hasta alcanzar una resolución espacial de 30 metros y fue delimitado para cubrir la superficie del cantón de Ibarra.

Se utilizó esta información debido a la inconsistencia de los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), al no disponer datos consistentes para un periodo de 30 años. Esta información se validó con datos de precipitación media obtenida a través del INAMHI para el mismo periodo de las estaciones: Otavalo, Inguincho e Izobamba. Finalmente, se asignó la susceptibilidad a través del uso de la *regla práctica del intervalo* en los cinco niveles de susceptibilidad, en base a que donde existe menor precipitación existe mayor probabilidad de ocurrencia de incendios (Tabla 22).

Tabla 22.
Clasificación de precipitación.

Valor	Rangos de precipitación	Susceptibilidad
1	>2369,23	Muy baja
2	1758 – 2369,23	Baja
3	1146,77 – 1758	Moderada
4	535,32 – 1146,77	Alta
5	< 535,54	Extrema

Temperatura media: También se obtuvo un geodata tipo raster de los datos medios mensuales del periodo 1970 a 2000 de la plataforma World Clim, con el fin de mantener el mismo periodo de tiempo que la precipitación. Los datos fueron proyectados a la zona 17 Sur, fueron delimitados al área de estudio y se realizaron resamples con el objeto de alcanzar 30 metros de pixel. Se validó información con los datos de las estaciones meteorológicas: Otavalo, Inguincho e Izobamba. Finalmente, se asignó la susceptibilidad a través del uso de la *regla práctica del intervalo* en los cinco niveles de susceptibilidad, en base a que los lugares donde hay mayores temperaturas son los más probables a la ocurrencia de incendios (Tabla 23).

Tabla 23.
Clasificación de temperatura.

Valor	Rangos de temperatura	Susceptibilidad
1	< 8,28	Muy baja
2	8,28 – 12,12	Baja
3	12,12 – 15,97	Moderada
4	15,97 – 19,81	Alta
5	>19,81	Extrema

Potencial de evapotranspiración (ETP): Cuando la evapotranspiración es alta existe una mayor susceptibilidad a incendio por lo propensa que se vuelve la vegetación seca a encenderse (Villabona y Armenteras, 2012). Para su cálculo se utilizó el método de Thornthwaite (1948) mediante la aplicación de la ecuación 1, ecuación 2, ecuación 3, ecuación 4 y la Tabla 24.

$$e = 16 * (10 * tm/I)^a \quad (16)$$

Donde:

e = evapotranspiración mensual sin ajustar (mm/mes),

tm = temperatura media mensual (°C),

I = índice de calor anual

a = variable establecida

$$ij = \left(\frac{tm}{5}\right)^{1.514} \quad (17)$$

Donde:

ij = Índice de calor mensual

tm = Temperatura mensual en °C

$$a = 0,000000675 * I^3 - 0,0000771 * I^2 + 0,01792 * I + 0,49239 \quad (18)$$

$$ETP_{THO} = e * L \quad (19)$$

Donde:

e = evapotranspiración mensual

L = factor de corrección, establecido para latitud 0°

Tabla 24.

Factor de corrección.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Latitud	1,03	0,93	1,03	1,00	1,03	1,00	1,03	1,03	1,00	1,03	1,00	1,03

Fuente: Thornthwaite (1948)

La susceptibilidad de la evapotranspiración potencial se estableció mediante el uso de la regla práctica del intervalo y se determinaron cinco categorías (Tabla 25).

Tabla 25.

Clasificación de evapotranspiración potencial.

Valor	Rangos Evapotranspiración	Susceptibilidad
1	< 6347,24	Muy baja
2	6347,24 – 760,39	Baja
3	760,39 – 883,54	Moderada
4	883,54 – 1006,69	Alta
5	>2006,69	Muy alta

Déficit hídrico: Este factor se determinó en base al cálculo del balance hídrico, que utiliza el método de Thornthwaite y Mather (1955). De esta manera los valores negativos se consideran déficit y los positivos se consideran excedente (Ecuación 5).

$$DH = P - PET \quad (20)$$

Donde:

DH= Déficit hídrico

P= Precipitación media

PET= Evapotranspiración potencial

La susceptibilidad se estableció a través del uso de la *regla práctica del intervalo* y se determinaron cinco categorías (Tabla 26).

Tabla 26.

Clasificación de déficit hídrico.

Valores	Rangos de Déficit Hídrico	Susceptibilidad
1	>1472,64	Muy baja
2	927,57 - 1472,64	Baja
3	39 – 57	Moderada
4	21 – 39	Alta
5	< 21	Extrema

Generación de la ecuación de susceptibilidad

Para la generación de la ecuación de susceptibilidad se utilizó el análisis multicriterio jerárquico (AHP), técnica desarrollada por Saaty (1980), la cual se basa en la técnica

multicriterios para clasificar las diferentes categorías. Los niveles de importancia de los criterios se estiman por medio de comparaciones pareadas entre ellos, por escala (Tabla 27).

Tabla 27.

Escala de importancia del método Saaty.

Importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen idénticamente al objetivo
3	Dominancia débil	La experiencia manifiesta que existe una débil dominancia de un elemento sobre otro.
5	Fuerte dominancia	La experiencia manifiesta que existe una fuerte dominancia de un elemento sobre otro.

Fuente: Modificado de Saaty, (1980)

El método AHP se aplicó para la comparación de las nueve variables seleccionadas. Los promedios verticales y horizontales de la comparación pareada fueron calculados, y finalmente se obtuvo la ponderación multicriterio por factor (Tabla 28).

Tabla 28.

Ponderación de Factores que Intervienen en la Ocurrencia de Incendios.

Factores físicos y climáticos	Ponderación
Altitud	0,05
Proximidad a las vías	0,06
Déficit hídrico	0,07
Temperatura	0,07
Orientación del terreno	0,07
Precipitación	0,11
Pendiente	0,12
Evapotranspiración potencial	0,16
Cobertura del suelo	0,28
Total	

La ecuación de susceptibilidad de incendios fue producto de la suma ponderada de los nueve factores predictores, que incluye los coeficientes ponderados de la Tabla 28, como se observa en la Ecuación 6.

$$S_{incen} = (0,05 * Alt + 0,06 * Prox.Vías + 0,07 * DH + 0,07T + 0,07 * OT + 0,11 * P + 0,12 * Pend + 0,16 * Etp + 0,28 * CUS) \quad (21)$$

Donde:

S_{incen} = Susceptibilidad de incendios

Alt = Altitud

Prox. Vías = Proximidad a Vías

DH = Déficit Hídrico

T = Temperatura

OT = Orientación del terreno

P = Precipitación

Pend = Pendientes

Etp = Evapotranspiración

CUS=Cobertura de suelo.

En base a todo el proceso matricial desarrollado y al modelo matemático obtenido se aplicó la técnica de álgebra de mapas y se generó el mapa preliminar de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal. Una vez que se concluyó el mapeo preliminar de susceptibilidad de

incendio, se realizó un filtrado para eliminar los píxeles aislados que no representaban el análisis en estudio. La susceptibilidad de incendio se dividió en cinco categorías: muy baja, baja, moderada, alta y extrema.

Etapa 2: Validación del modelo de susceptibilidad

La validación del modelo se realizó mediante la utilización de focos de calor, los cuales fueron obtenidos desde el portal del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil (INPE). El INPE cuenta con una base de datos de focos de calor para Sudamérica desde el año 1998, para Ecuador existen datos desde el año 2000. Para el área de estudio se usó información desde 2000 hasta el 2018, la cual corresponde a los satélites AQUA, GOES, NOAA, TERRA, ATSR, TRMM (Figura 20).

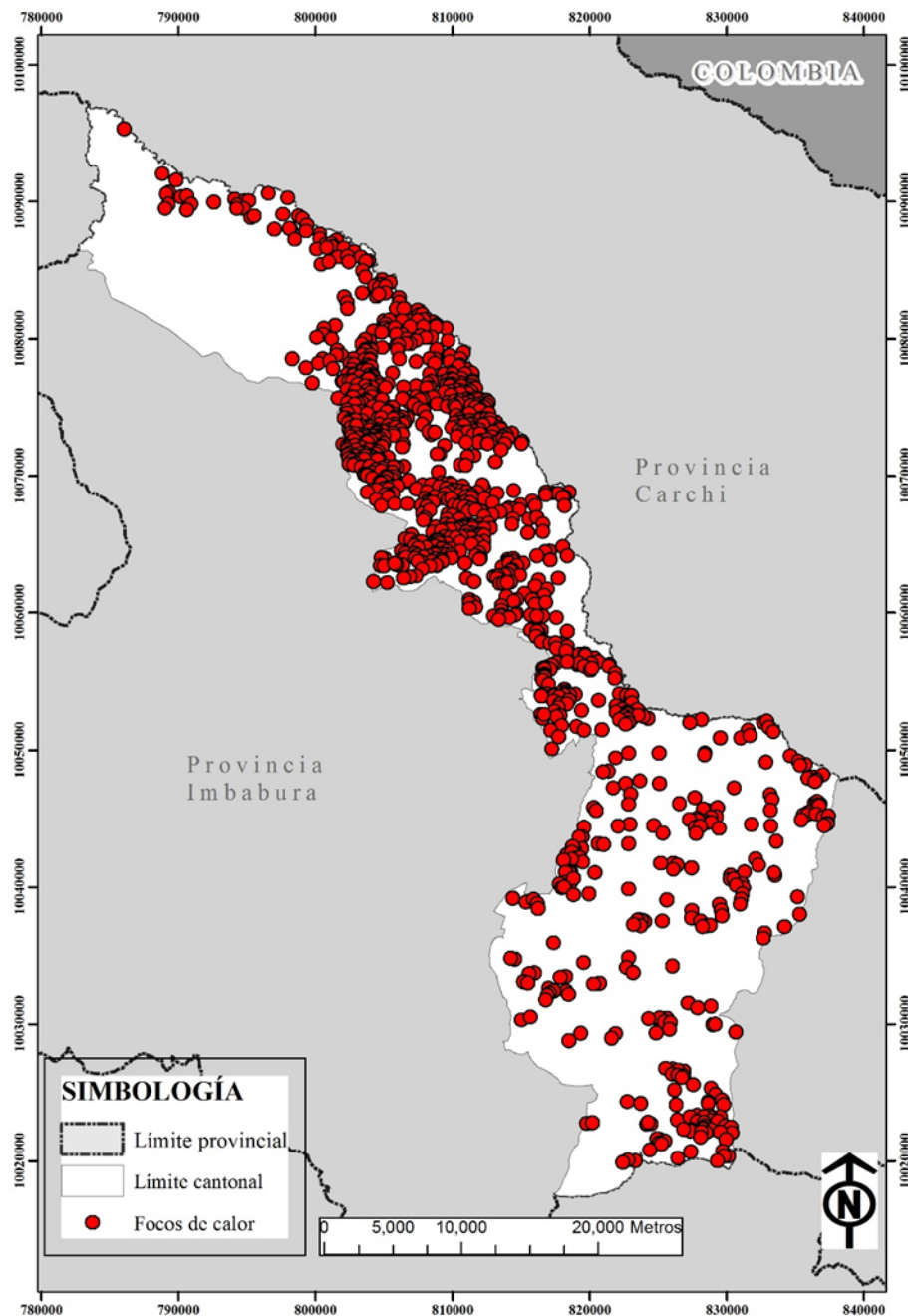


Figura 20. Focos de calor presentados en el catón Ibarra para el periodo 2000-2018.

De esta manera se cruzó espacialmente la información de los focos de calor con las categorías de susceptibilidad alta y extrema y se comprobó la siguiente hipótesis: a) existen semejanzas

o asociación entre el modelo obtenido y los focos de calor (están asociadas). La comprobación se hizo con la aplicación de la prueba Ji cuadrado (X^2) a un nivel de significancia del 5% y con la obtención del área baja de la curva ROC. En este último análisis se consigue la exactitud más alta cuando los valores son más próximos a uno (1) (Burgueño et al., 1995).

Bajo estos antecedentes metodológicos y con el fin de simplificar la comprensión del proceso metodológico se elaboró un Flujoograma del método (Figura 21).

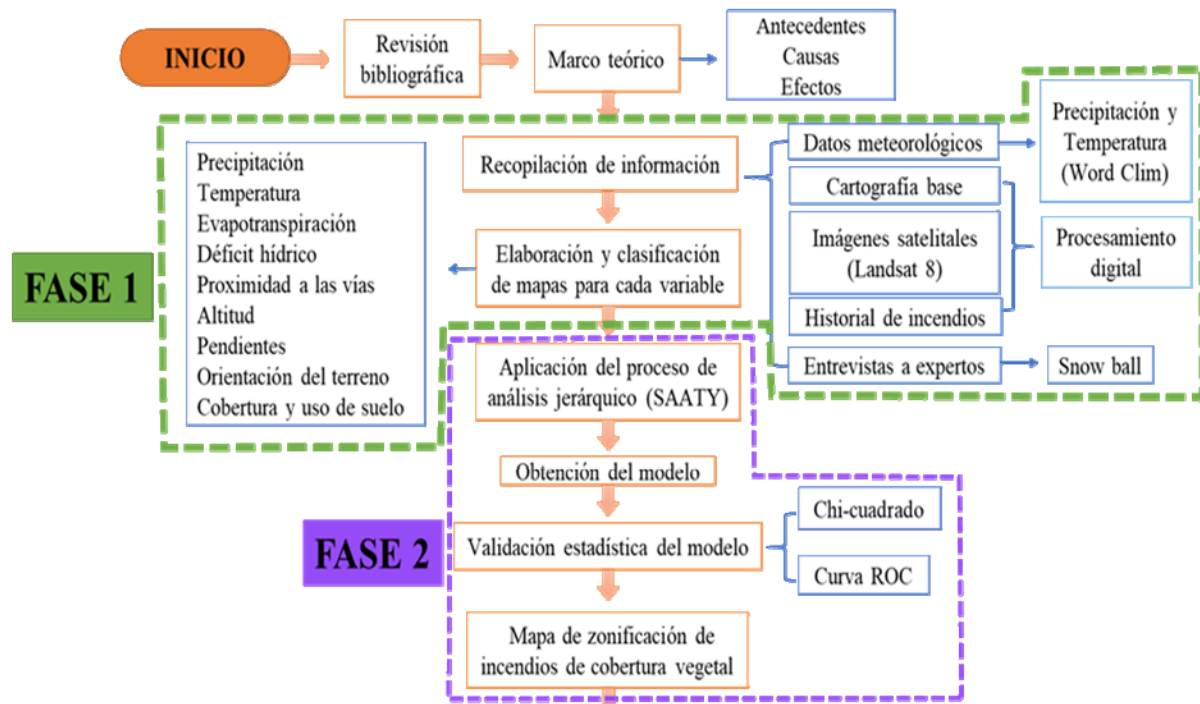


Figura 21. Flujoograma de la Metodología.

Resultados y discusión

En el cantón Ibarra el 40% del territorio presenta susceptibilidad extrema y alrededor de un 14% presenta susceptibilidad muy alta. En ambas susceptibilidades existe una relación directa con la presencia de cultivos y páramos, los cuales ocupan alrededor del 59% del territorio y son consideradas coberturas susceptibles. Debido a que en la primera cobertura generalmente se inician los incendios y en la última llega a expandirse por influencia de la inclinación del terreno.

Se observa que la susceptibilidad extrema se distribuye entre las parroquias de La Carolina y Salinas (Figura 22). El motivo sería porque en estos sectores la temperatura supera los 19,81°C, existe gran presencia de bosques, pastos y cultivos, la orientación del terreno es generalmente hacia el este y es común encontrar pendientes escarpadas superior a 25% e incluso al 45%.

La susceptibilidad alta se distribuye por todo el territorio excepto en las áreas urbanas y al sureste del cantón. Aunque condiciones como la temperatura promedio superior a los 19,81°C, presencia de bosque pastizal y vegetación arbustiva, y pendientes entre 25% y 45% ocasionan este tipo de susceptibilidad; en sectores como Lita, otras condiciones como la precipitación superior a 1146 mm con excedente hídrico, o la existencia de más de 75 metros de distancia a las vías más cercanas, evitan que se alcance la susceptibilidad extrema. Además, la presencia de bosques tropicales pluviales evita que sea en estos sectores donde se

origenen los incendios, porque se los considera ecosistemas aislados del fuego con capacidad adaptativa por presencia de precipitación (Parra-Lara y Bernal-Toro, 2010).

Otros lugares con susceptibilidad alta se encuentran en el sur de la parroquia San Antonio y al norte de las parroquias La Esperanza y Angochagua, cerca al volcán Imbabura. El grado de susceptibilidad identificado se produciría principalmente por la presencia de las coberturas: páramo, bosque y vegetación arbustiva; la presencia de pendientes escarpadas, precipitación entre los 535,32 mm y 1146,77 mm, sectores con déficit hídrico y finalmente una orientación del terreno que propicia la expansión del incendio (hacia norte, norteste, nortoste y sureste).

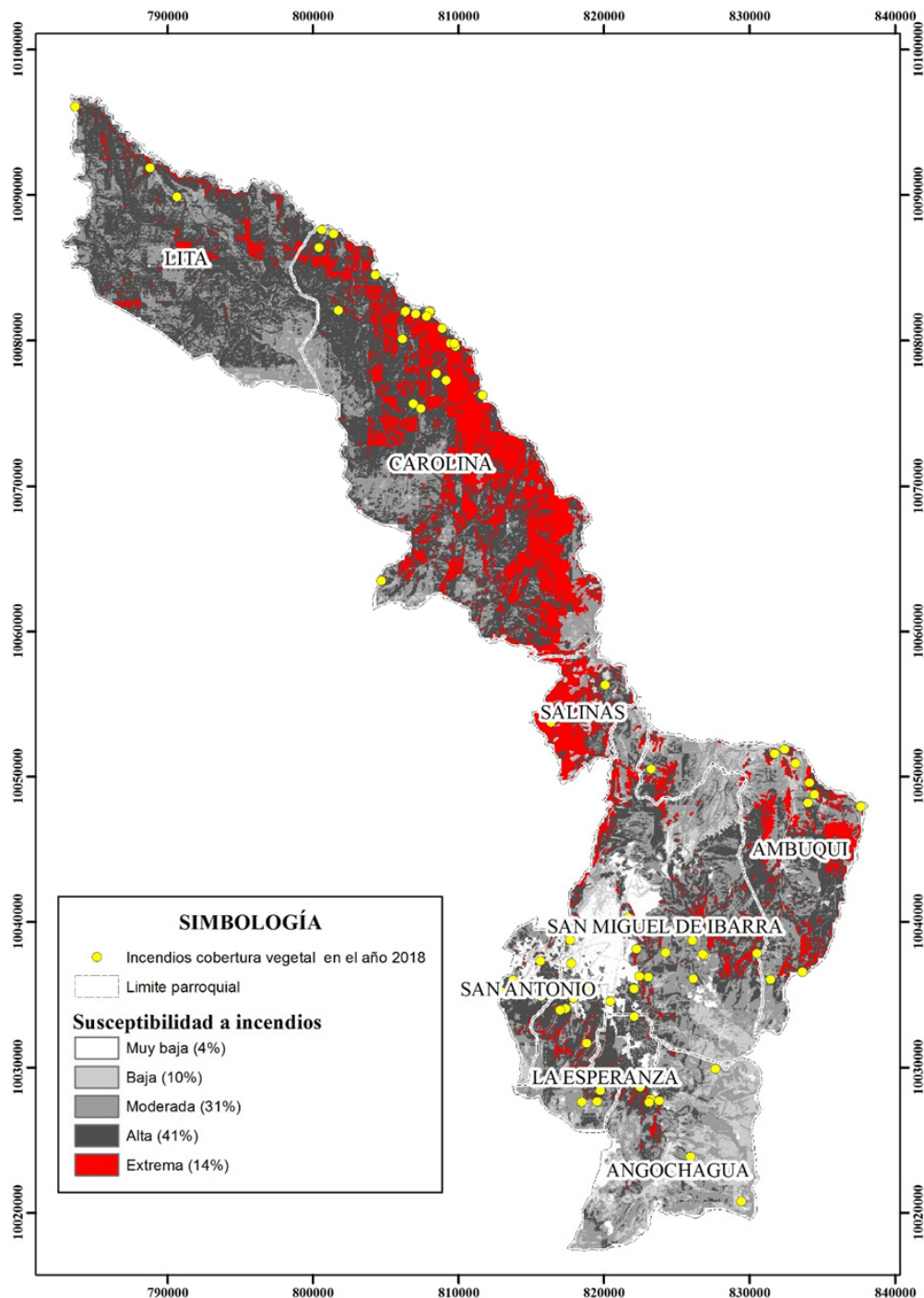


Figura 22. Modelo de Susceptibilidad a Incendios de Cobertura Vegetal del Cantón Ibarra.

El comportamiento de las susceptibilidades alta y extrema coincide con la presencia de temperaturas altas, coberturas naturales, pendientes escarpadas y orientaciones que propician

la expansión del fuego. El motivo sería porque en condiciones de la luz solar, la orientación afecta el contenido de humedad y el tipo de material combustible. Las pendientes escarpadas e inclinadas incrementan proporcionalmente el fuego, debido a que la inclinación favorece el ascenso del aire caliente y en consecuencia el aumento de la combustibilidad en las coberturas presentes por efecto secado (Jaiswal et al., 2002; Ruiz y Blanco, 2004; Parisien et al., 2005),

Las coberturas naturales en general son sensibles al fuego al carecer de estrategias adaptativas a este fenómeno, excepto coberturas como el bosque pluvial porque presenta una condición climática particular (Parra-Lara & Bernal-Toro, 2010). La temperatura, por su parte, regula el contenido de humedad del combustible de tal manera que disminuye la humedad y aumenta la probabilidad de ignición y propagación (Lloret, 2004). Otra variable que influyó directamente sobre la susceptibilidad alta del cantón fue el déficit hídrico, porque según Casado et al. (2007) aumenta la combustibilidad por bajos índices de humedad.

Por otro lado, son pocos los espacios del cantón que concentran susceptibilidad muy baja y se concentran en las zonas urbanas. La ausencia de cobertura vegetal, excepto en parques o avenidas hace que la susceptibilidad sea casi nula. También son pocos los espacios con susceptibilidad baja, los cuales se distribuyen por todo el territorio. Sin embargo, se observa que existe una concentración de esta susceptibilidad al sureste del cantón. Se trata de una zona cubierta por páramo, vegetación arbustiva, relictos de bosque y con pendientes escarpadas. La razón por lo que no alcanzaría un nivel más alto de susceptibilidad es porque aquí se presentan bajas temperaturas, alta pluviosidad, exceso hídrico y poca accesibilidad. El último factor influye puesto que, al no existir vías evita la presencia del hombre y además aleja actividades agrícolas o ganaderas, las cuales son consideradas detonantes (Flores et al., 2016).

Validación del modelo

La validación estadística muestra que el modelo realizado es aceptable porque existe asociación entre la ubicación de los focos de calor y la susceptibilidad alta y extrema a incendios que predice el modelo. Se llegó a esta afirmación porque el nivel de significancia de la prueba chi-cuadrado fue menor a 0,05 alcanzando casi un 99,99% de asociación, y el área bajo la curva ROC fue de 0,862, valor muy cercano a uno (Figura 23).

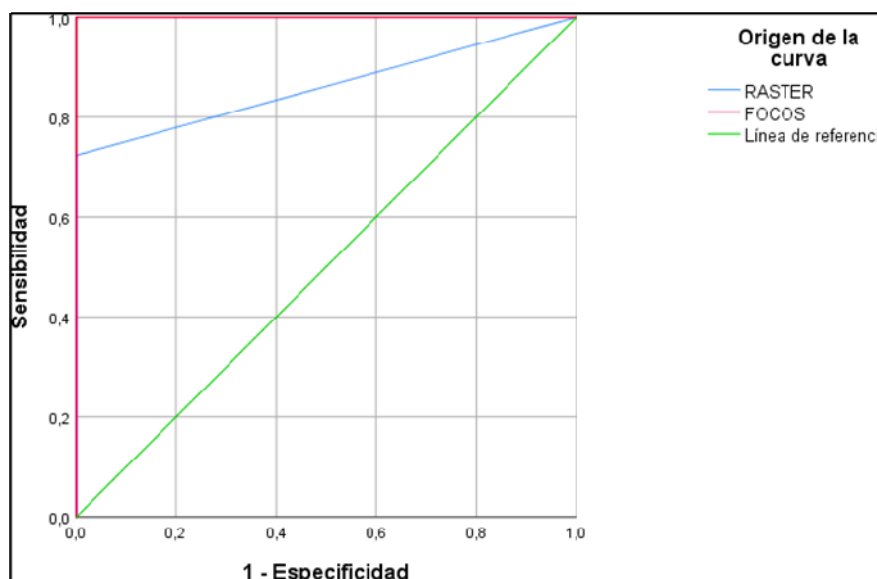


Figura 23. Curva ROC.



Bajo estos números estadísticos se concluye que el modelo de susceptibilidad es válido, y que al igual que Coelho et al. (2016) se recomienda el modelo para ser adaptado en regiones subtropicales, tropicales, mediterráneas, y ecuatoriales, con la única condición de adecuar las variables al clima local.

Conclusiones

En el cantón Ibarra un 14% del territorio presenta susceptibilidad extrema y generalmente se distribuye entre las parroquias La Carolina y Salinas. La susceptibilidad alta ocupa un 41% de la superficie y se concentra en sectores de la parroquia Lita. En ese contexto, las coberturas más susceptibles son: cultivos, pastos, vegetación arbustiva y bosque. En contraparte, la susceptibilidad baja ocupa un 9,72% del cantón y se distribuye al sur del mismo. Mientras que la susceptibilidad muy baja ocupa un 4,19% del área del cantón y se localiza en los centros urbanos, como la ciudad. Los resultados mostraron ser estadísticamente aceptables después de realizar el cruce de datos de las áreas clasificadas con susceptibilidad alta y extrema con los focos de calor. Si bien el páramo dentro de la subcuenca es considerado una cobertura muy susceptible, la presencia de bajas temperaturas, alta pluviosidad, excedente hídrico, y su difícil accesibilidad hacen que la susceptibilidad en este ecosistema sea entre baja y moderada. Sin embargo, esto no significa que aquí no se presentarán incendios, más bien significa que son áreas con baja probabilidad de ignición pero que mantienen su capacidad de combustión en caso de propagación. Bajo este antecedente que confirma la susceptibilidad y propagación a incendios en diferentes tipos de cobertura, se confirma que el término adecuado para este tipo de quemas es, incendios de cobertura vegetal, y no el término común utilizado, incendios forestales.

En los sectores con susceptibilidad alta y extrema se recomienda la implementación de líneas corta fuegos y la instalación de torres de vigilancia entre 15 a 20 metros de altitud, con el fin de cubrir el mayor campo visual posible. La aplicación de estas recomendaciones podría evitar la recurrencia anual de incendios de cobertura vegetal en el cantón Ibarra.

El modelo de susceptibilidad obtenido mediante la aplicación SIG de la metodología multicriterio es confiable. Porque la información entregada de susceptibilidad coincide con los focos de calor presentados. El comportamiento de las susceptibilidades alta y extrema principalmente coincide con la presencia de temperaturas altas, coberturas naturales, pendientes escarpadas y orientaciones que propician la expansión del fuego.

Referencias

- Anderson, H., Hoover, M. y Reinhart, K. (1976). *Forest and water. Effects of forest management on floods, sedimentation and water supply*. California: USDA Forest Service General Technical Report.
- Bond, W. y Keeley, J. (2005). "Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems". *Trends in Ecology and Evolution*, 20(2), 387-394.
- Burel, F. y Baudry, J. (2002). *Ecología del paisaje: conceptos, métodos y aplicaciones*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Burgueño, M., García, J. y González, J. (1995). Las curvas ROC en la evaluación de las pruebas diagnósticas. *Med Clin (Barc)*, 66-70.
- Burrough, P. y McDonell, R. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. New York: Oxford University Press.



- Casado, A., Gil, V. y Campo, A. (2007). Consecuencias de la variación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del arroyo El Belisario, Buenos Aires-Argentina. . *Revista Huellas*, 11, 9-26.
- Coelho, F. E., dos Santos, A. R., Fiedler, N. C., Ribeiro, G. A., Gomes da Silva, A., Banhos dos Santo, A., . . y Schettino, V. R. (2016). Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. *Journal of Environment*, 173, 65-71.
- Corbi, A. (27 de octubre de 2014). *Desarrollo Argentino*. Recuperado el 28 de octubre de 2015, de <http://www.desarrolloargentino.org/desarrollo-sostenible/la-perdida-de-la-biodiversidad-biologica-causas-y-consecuencias>
- DeBano, L., Neary, D. y Ffolliott, P. (1998). *Fire`s effects on Ecosystem*. . New York: John Wiley & Sons.
- Ferri, M. (2003). *Peón de defensa contra incendios forestales de la Xunta de Galicia*. . Sevilla: Editorial MAD, S.L.
- Flores, G., Benavides, S., Valdez, R., Vega, D. y Casillas-Díaz. (2016). *Descripción de variables para definición de riesgo de incendios forestales en México*.
- François, M., Reyes, J. y Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones geográficas*(51), 53-72.
- Gutiérrez, G., Ordóñez, J. A. y Camacho, J. M. (2015). Régimen y distribución de los incendios forestales en el Estado de México (2000 a 2011). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6 (29), 92-107.
- Helvey, J. (1980). Effects of a north central Washington wildfire on runoff and sediment production. . *Water Resources Bulletin*, 16(4), 627–634.
- Holdridge, L. (1967). *Life zone ecology*. San José, Costa Rica: Tropical Science Center.
- Hunter, M. E. y Robles, M. D. (2020). Tamm review: The effects of prescribed fire on wildfire regimes and impacts: A framework for comparison. *Forest Ecology and Management*, 475, 1-13.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos . (2010). *Censo de Población y vivienda*.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (30 de julio de 2020). *Proyección de la Población Ecuatoriana, por años calendario, según cantones 2010-2020*. Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/inec-presenta-sus-proyecciones-poblacionales-cantonales/>
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo*. Ginebra,: IPCC.
- Jaiswal, R., Mukherjee, S., Raju, D. y Saxena, R. (2002). Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(1), 1-10.
- Jaiswal, R., Mukherjee, S., Raju, D. y Saxena, R. (2002). Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(1), 1-10.
- Koutsias, N., Martínez-Fernández, J. y Allgöwer, B. (2010). Do factors causing wildfires vary in space? Evidence from geographically weighted regression. *GIScience & Remote Sensing*, 47(2), 2211–2240.



- Lavee, H., Kutiel, P., Segev, M. y Benyamini, Y. (1995). Effect of surface roughness on runoff and erosion in a Mediterranean ecosystem: the role of fire. *Geomorphology*, 11, 227-234.
- Litscherta, S., Theobald, D. y Brown, T. (2014). Effects of climate change and wildfire on soil loss in the Southern Rockies Ecoregion. *CATENA*, 206-219.
- Lloret, F. (2004). Régimen de incendios y regeneración. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. 101-128.
- Madsen, R. S., Hayne, H. J. y McCaffrey, S. M. (2018). Wildfire risk reduction in the United States: Leadership staff perceptions of local fire department roles and responsibilities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 27, 451-458.
- Madsen, R. S., Hayne, H. J. y McCaffrey, S. M. (2018). Wildfire risk reduction in the United States: Leadership staff perceptions of local fire department roles and responsibilities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 27 (2018), 451-458.
- Mhaweji, M., Faour, G. y Adjizian-Gerard, J. (2017). A novel method to identify likely causes of wildfire. *Climate Risk Management*, 16 ((2017)), 120-132.
- Mielnicki, D., Canziani, P. y Drummond, J. (2005). *Quema de biomasa en el centro-sur de Sudamérica: incendios locales, impactos regionales*. Buenos Aires, Argentina: CONICET.
- Moreno, J. V. (2011). Landscape variables influencing forest fires in Central Spain. *Int. J. Wildland Fire* 20, 678–689. *Journal of the International Association of Wildland Fire*, 678–689.
- Morris, S. y Moses, T. (1987). Forest Fire and the Natural Soil Erosion Regime in the Colorado Front Range. *Annals of the Association of American Geographers*, 77 (2), 245-254.
- Mourão, P. R. y Martinho, V. D. (2014). The choices of the fire—debating socioeconomic determinants of the fires observed at Portuguese municipalities. *Forest Policy and Economics*(43), 29-40.
- Muñoz, R. (2000). Las quemadas incontroladas como causa de incendios forestales. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*(9), 13-26.
- Nyman, P., Sheridan, G. J., Smith, H. y Lane, P. (2011). Evidence of debris flow occurrence after wildfire in upland catchments of south-east Australia. *Geomorphology*, 125, 383-401.
- Parisien, A., Kafka, G., Hirsch, G., Todd, B., Lavoie, G. y Maczek, D. (2005). *Mapping wildfire susceptibility with the BURN-P3 simulation model (Information Report)*. Edmonton: Natural Resources Canada.
- Parra-Lara, A. y Bernal-Toro, F. (2010). Incendios de cobertura vegetal y biodiversidad: una mirada a los impactos y efectos ecológicos potenciales sobre la diversidad vegetal. *El Hombre y la Máquina* 35, 67-81.
- Pérez, G., Márquez, M., Cortés, A. y Salmerón, M. (2013). Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y bosques*, 19(2), 37-58.
- Robinne, F., Miller, C., Parisien, M., Emolko, M., Bladon, K., Silins, U. y Flannigan, M. (2016). A Global Index for Mapping the Exposure of Water Resources to Wildfire. *Forests*, 1-16.



- Rodrigues, M., de la Riva, J. y Fotheringham, S. (2014). Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression. *Applied Geography*(48), 52-63.
- Ruiz, L. y Blanco, J. (2004). *Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el Volcán la Malinche. Incendios forestales en México y métodos de evaluación.* México.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process.* . New York: McGraw-Hill.
- Scott, D. (1993). The hydrological effects of fire in South African mountain catchments. . *Journal of Hydrology*, 150 , 409-432.
- Secretaria de Gestión de Riesgos. (2018). *Informe de Situación - Incendios Forestales.* Samborondón: Secretaria de Gestión de Riesgos.
- Seibert, J., McDonnell, J. y Woodsmith, R. (2010). Effects of wildfire on catchment runoff response: a modelling approach to detect changes in snow-dominated forested catchments. . *Hydrology Research*, 378-390.
- Smith, H. G., Sheridan, G. J., Lane, P. N., Nyman, P. y Haydon, S. (2011). Wildfire effects on water quality in forest catchments: A review with implications for water supply. *Journal of Hydrology*, 396, 170-192.
- Solera, J. y Cerdá, A. (2009). *Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos. Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España. El estado de la cuestión visto por los científicos españoles.* España: FUEGORED, Cátedra Divulgación de la Ciencia, Universidad de Valencia .
- Thornthwaite, C. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- Thornthwaite, C. y Mather, R. (1955). *The water balance: Publications in climatology, laboratory of climatology.*
- Townsenda, S. y Douglas, M. (2004). The effect of a wildfire on stream water quality and catchment water yield in a tropical savanna excluded from fire for 10 years (Kakadu National Park, North Australia). . *Water Research*, 3051–3058.
- Triola, M. (2004). *Probabilidad y estadística.* México: Pearson Education.
- Villabona, D. y Armenteras, D. (2012). Incidencia de incendios sobre la vegetación de Cundinamarca y Bogotá dc, entre 2001 y 2010. . *Acta Biológica Colombiana*, 17(1), 143-158.



Estrategias de Gestión de Riesgos de Incendios en la Reserva Ecológica El Ángel: Un Nuevo Paradigma para la Conservación de las Cuencas Hidrográficas a través de la Reducción de la Vulnerabilidad en las Áreas Protegidas

Erika Angulo¹, Oscar Rosales¹ y Fernanda Herrera¹

Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador

Resumen

La provincia Carchi cada año ha sido afectada por incendios de cobertura vegetal, originados principalmente por el uso no controlado del fuego en las actividades agrícolas y manejo de pastizales, dichos incendios han causado daños a la vegetación arbustiva y vegetación herbácea de la Reserva Ecológica El Ángel. El objetivo de la investigación fue analizar las zonas susceptibles a incendios de cobertura vegetal, empleando la metodología de análisis multicriterio estableciendo pesos a los factores climáticos de precipitación, evapotranspiración, temperatura y velocidad del viento, y a los factores topográficos de pendiente del terreno, uso del suelo, orientación de las laderas y cercanía a las vías, factores que fueron determinados como influyentes en la ocurrencia de incendios, con los que se estableció una ecuación de susceptibilidad que fue procesada a través del uso de Sistemas de Información Geográfica. Los resultados mostraron que el factor cobertura vegetal, es el que mayor valor de ponderación presentó en la ocurrencia de incendios. La Reserva Ecológica El Ángel y zona de amortiguamiento, presentó en la mayor parte de la superficie una susceptibilidad a incendios alta, que ocupó el 39,33% del total del área estudiada; seguido de una susceptibilidad muy alta ocupando un 29,35% de la superficie y con menor porcentaje, presentó una susceptibilidad muy baja con un 2,18% del total. Al existir grandes superficies con susceptibilidades altas y muy altas, se plantearon estrategias para la prevención y/o mitigación de incendios de cobertura vegetal, basadas principalmente en la educación ambiental y el manejo del fuego como herramienta para las actividades agrícolas a través de capacitaciones.

Palabras clave: Factores climáticos, Factores topográficos, Incendios de cobertura vegetal, Susceptibilidad.

Introducción

Históricamente, el fuego ha sido una fuerza evolutiva de la naturaleza, tanto en las especies biológicas, como en los ecosistemas y el paisaje. Sin embargo, los cambios de uso del suelo ocurridos durante los tres últimos siglos en los distintos continentes, combinados con los cambios climáticos de carácter global y regional, han conllevado a la alteración de los patrones naturales de ocurrencia de este fenómeno en la mayor parte de los ecosistemas con coberturas vegetales, transformándolos, disminuyendo su biodiversidad y comprometiendo su capacidad productiva (Parra-Lara, 2011; Bond y Keeley, 2005).

Los incendios de cobertura vegetal se han convertido en un problema ambiental de gran preocupación y gravedad en las últimas décadas, dicho problema se presenta a nivel mundial y sobre todo en los países con grandes extensiones de áreas boscosas (Parra-Lara, 2011) siendo más evidente en las zonas tropicales, las cuales son las más afectadas por acción del calentamiento global (Mejía, 2017). Según la FAO (2012), la mayoría de los incendios

forestales son de origen antrópico y los factores que más influyen en el aumento y la gravedad de los mismos son: el descuido de los turistas al visitar determinada zona, actos de vandalismo, imprudencias como el abandono de residuos combustibles y la falta de medios eficaces para combatirlos en el terreno

Vaersa (2012) considera que un incendio de cobertura vegetal es un fuego que, cualquiera sea su origen, se propaga sin control en terrenos rurales y urbanos, a través de vegetación leñosa, arbustiva o herbácea, viva o muerta. Es decir, es un fuego injustificado y descontrolado, en el cual los combustibles son materiales vegetales y durante su propagación puede destruir ganado, viviendas, como también vidas humanas.

A nivel ecológico, los incendios de cobertura vegetal proporcionan un escenario negativo en los bosques y humedales afectados, ya que se genera una disminución de los recursos hídricos por reducción de la infiltración y significativa alteración del ciclo hidrológico, la reducción de la humedad de los suelos, el incremento de la erosión eólica e hídrica (Rico, 2011). Otras alteraciones significativas son la desertificación, la pérdida de la biodiversidad por muerte y migración de la fauna local, incremento de la temperatura que afecta el microclima, la contaminación del aire por emisiones de CO₂ entre otros gases tóxicos; finalmente, el aumento del efecto de invernadero y la modificación de belleza paisajística (Vera, 2015).

Según la FAO (2006), en el año 2000 los incendios forestales afectaron una superficie de 350 millones de hectáreas a nivel mundial, de los cuales 2,9 millones fueron en América Latina, donde el 85% de los incendios fueron de origen antrópico. En Ecuador, en octubre del año 2019, los incendios forestales ocasionaron una pérdida de cobertura vegetal de 18768,70 hectáreas a nivel nacional, como resultado de 1799 eventos registrados. Las provincias mayormente afectadas fueron Loja, Pichincha, Imbabura, Carchi, Guayas y El Oro. En el caso de Carchi, se registraron 48 incendios, los cuales dejaron como resultado 1502,49 hectáreas de cobertura vegetal quemada (Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, 2019).

En Ecuador, son escasos los estudios sobre incendios de cobertura vegetal, sin embargo, de los existentes, la mayoría se concentran en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Es así que en la provincia de Carchi, no se registra ningún estudio a profundidad sobre esta problemática, a pesar de que en los cantones Espejo, Tulcán y Mira, las parroquias La Libertad, El Ángel, Maldonado y Tufiño cada año han sido afectados por incendios de cobertura vegetal (Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, 2017), los cuales han sido originados principalmente por el uso no controlado del fuego en agricultura y manejo de pastizales, causando graves daños a proyectos agrícolas, pecuarios y agroforestales, así como a plantaciones, zonas boscosas y áreas protegidas principalmente la Reserva Ecológica El Ángel.

La Reserva Ecológica El Ángel fue designada como área protegida por el recurso hídrico que proviene de sus páramos y humedales, que se constituye en una importante fuente de abastecimiento y aporte para varias cuencas hidrográficas (Ministerio del Ambiente, 2008). La mayor superficie de este sitio está conformada por páramos húmedos, razón por la cual, representa una fuente vital de abastecimiento de agua para Carchi, al aportar casi la totalidad de este recurso para la población de la provincia (Ministerio del Ambiente, 2015). Por lo que, el objetivo de este estudio fue zonificar las áreas susceptibles a incendios de cobertura vegetal en la REEA y zona de amortiguamiento, mediante un modelo de susceptibilidad de incendios de cobertura vegetal en función de variables climáticas con un análisis multicriterio. La hipótesis planteada fue que existe relación entre el modelo obtenido y los focos de calor.

Área de estudio

La Reserva Ecológica El Ángel (REEA) se encuentra ubicada en la provincia de Carchi en la Sierra Norte de Ecuador, en la jurisdicción de las parroquias La Libertad y El Ángel del cantón Espejo, Maldonado y Tufiño del cantón Tulcán y La Concepción en el cantón Mira (Figura 24). El área protegida tiene una superficie de 90,18 km² dentro de la cuenca del río Mira que equivale al 1,69% de la superficie total de la cuenca. La REEA se extiende en un rango altitudinal que varía entre 3200 m s. n. m. y 4 200 m s. n. m. de 87,71 km² (Ministerio del Ambiente, 2015).

Según la clasificación climática de Pourrut (1995) la REEA tiene un clima Ecuatorial Frío de Alta Montaña, con temperaturas medias anuales entre los 5 °C a 6° C y un rango de precipitación de 2000 a 3000 mm anuales. La REEA y su zona de influencia, constituyen un importante refugio de biodiversidad de la cordillera occidental de Los Andes, al proteger y conservar ecosistemas de montaña como páramos, turberas, lagunas y bosques. La REEA se encuentra cubierta, casi en un 90% de su superficie total por el ecosistema Rosetal caulescente y herbazal montano alto y montano alto superior de páramo, lo que anteriormente se conocía como páramo de frailejones.

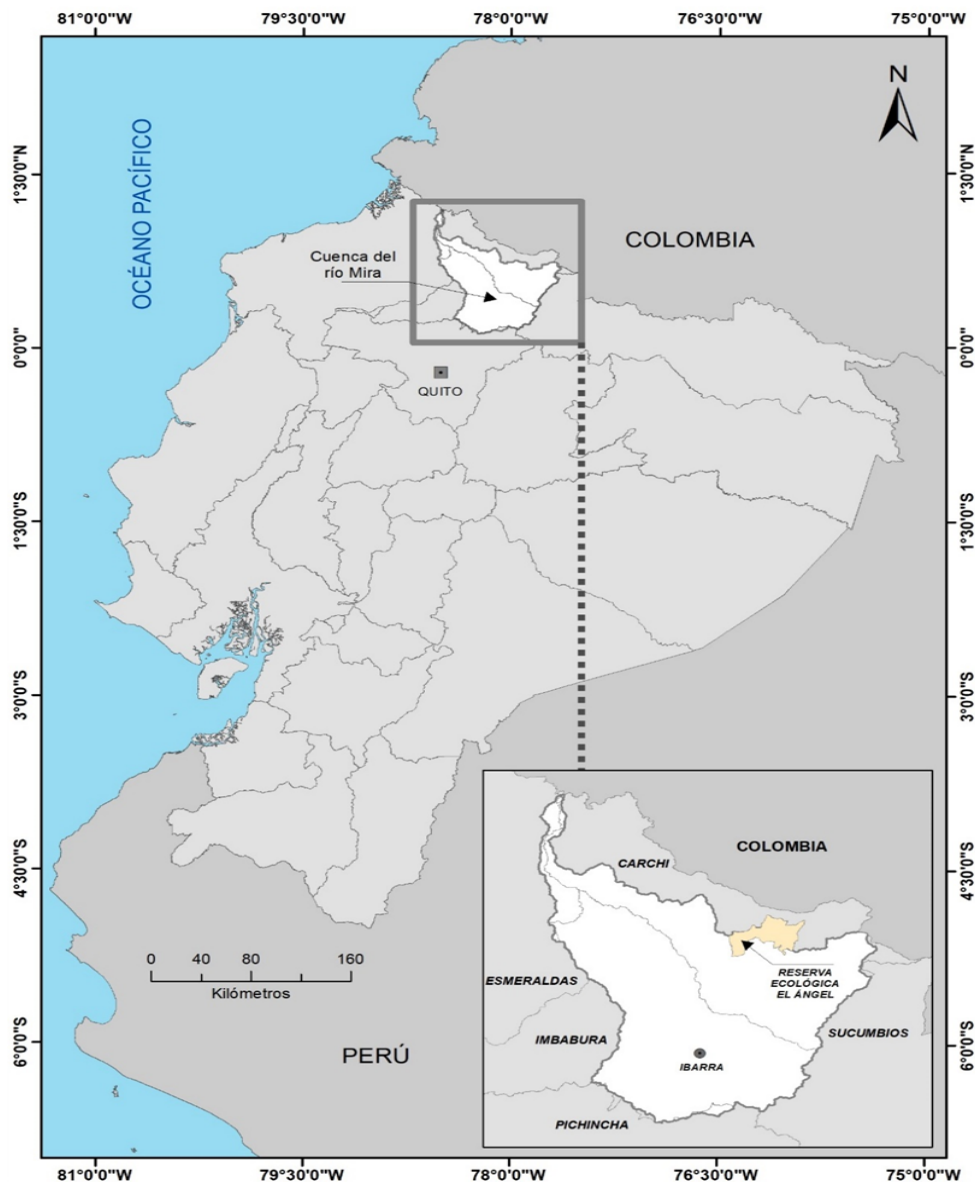


Figura 24. Ubicación de la Reserva Ecológica El Ángel en la cuenca del río Mira.

A nivel provincial, los datos del último censo del INEC, señalan que Carchi tiene una población de 164.524 habitantes, que representa el 1,1% de la población nacional. Las principales actividades socioeconómicas de la provincia del Carchi son agrícolas y pecuarias, esto debido a la potencialidad productiva de la provincia.

La Reserva Ecológica El Ángel es la principal fuente de abastecimiento del recurso hídrico para la provincia del Carchi, debido a que abastece a cuatro cantones de la provincia del Carchi: Bolívar, Espejo, Mira y Tulcán, a las parroquias de El Ángel, La Libertad, San Isidro, La Concepción, Maldonado y Tufiño, las cuales conforman el área de influencia indirecta para la REEA. Con respecto al área de influencia directa, se encuentran a aquellas comunidades que geográficamente intersecan con la zona de conservación del área protegida: La Comuna Indígena Pasto La Libertad, la Comuna Indígena Pasto La Esperanza, la Comunidad Palo Blanco y las asociaciones 23 de Julio y San Luis (Ministerio del Ambiente, 2015).

Métodos

Inicialmente se determinaron los factores topográficos y climáticos que inciden en la ocurrencia de incendios en la reserva ecológica y zona de amortiguamiento mediante la aplicación de una serie de entrevistas, a un grupo de once expertos en la que se plantearon factores considerados como influyentes en la ignición y propagación de incendios dentro del área de estudio.

Para la selección de los expertos se empleó una técnica de muestreo no probabilística denominada “Snow ball” la cual utiliza cadenas de referencia a manera de red (Baldin y Munhoz, 2011). Es decir, cada individuo participante recomienda a otro y finaliza cuando uno de los participantes recomienda a otro que ya fue tomado en cuenta para la entrevista. Se clasificó a los expertos en 2 grupos: 7 profesionales técnicos y 4 profesionales académicos.

Se empleó la metodología Delphi, la misma que se define como un proceso donde convergen una serie de personas considerados expertos con el fin de obtener un consenso frente a una temática o problemática en común. La ventaja de la metodología aplicada consistió en la flexibilidad al captar diversidad de opiniones de los expertos en la temática de incendios, las cuales fueron entregadas de forma anónima y confidencial, obteniendo de esta manera un consenso con alto grado de confiabilidad (Reguant-Álvarez y Torrado-Fonseca, 2016). Una vez seleccionados los factores biofísicos se adaptaron de acuerdo con las características del área de estudio, clasificando la susceptibilidad en 5 rangos para cada uno de los factores identificados.

Factores climáticos

Precipitación: La precipitación media anual se determinó con los datos disponibles de ocho estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología () cercanas al área de estudio, de un periodo de 30 años (1986-2015). Para la interpolación de la precipitación se utilizó el método Spline, autores como Díaz et al. (2008) afirman que es el procedimiento de interpolación más adecuado para eventos de precipitación pluvial ya que crea una superficie de respuesta que corresponde con las características del terreno, la interpolación se realizó mediante el software ArcGIS.

Temperatura: Se trabajó con datos de temperatura media mensual para los años 1986-2015, con los datos obtenidos de 6 estaciones meteorológicas del INAMHI. La interpolación de la temperatura se lo realizó a través de la Ecuación (1) de la temperatura determinada (Espinoza, 2010):



$$T_{Det} = T_{mensual} + (\Gamma(Z_{Det} - Z_{estación})) \quad (22)$$

Donde:

T_{Det} = es el dato de temperatura a determinar

$T_{mensual}$ = es el valor de la temperatura mensual de la estación

Γ = es el valor de Γ de la ecuación de la recta

Z_{Det} = altitud referencial

$Z_{estación}$ = altitud de la estación

A partir del valor (Γ) obtenido del gráfico de dispersión y el valor de homologación o altitud referencial de 1000m, se estableció el valor de la temperatura determinada, la que permitió calcular la temperatura real del área de estudio, a partir de la Ecuación 2:

$$T_{x,y} = T_{Det} + (\Gamma(Z^{DEM} - Z_{Det})) \quad (23)$$

Donde,

T_{Det} = corresponde a la temperatura determinada

Γ = valor de Γ de la ecuación

Z^{DEM} = es el DEM del área de estudio

Z_{Det} = valor de altitud referencial

Evapotranspiración potencial: El cálculo de la evapotranspiración se realizó con la aplicación del método de Turc (Pereyra, Cruz y Pérez, 2010), el cual utiliza como parámetros la precipitación anual y la temperatura media anual (Ecuación 3):

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (24)$$

Donde,

ETR = corresponde al valor de evapotranspiración en mm/ año

P = es la precipitación anual en mm

L = es un parámetro heliotérmico que tiene por expresión:

$$L = 300 + 25 t + 0,005t^3 \quad (25)$$

Donde,

t = Temperatura media anual en °C

Velocidad del viento: Para la obtención de los datos de velocidad del viento se procedió a descargar la información del geoportel Global Wind Atlas, la cual proporciona acceso gratuito a los datos sobre la densidad de la energía eólica y la velocidad del viento en múltiples alturas utilizando los últimos datos históricos del tiempo y el modelado, con una resolución de salida de 250 m; es una herramienta muy útil para obtener datos potenciales de recursos eólicos a nivel provincial y local.

Factores topográficos

Pendiente: Usando el DEM SRTM con resolución de 30 m de píxel y herramientas de ArcGIS 10.5 se generó el ráster reclasificado de pendientes, en el cual se determinaron los rangos y el nivel de susceptibilidad a cada uno de estos.

Orientación del terreno: Se aplicó la herramienta *Aspect* del software ArcGIS 10.5 al DEM SRTM para obtener ráster de orientación del terreno. Posteriormente, se procedió a

determinar los rangos de susceptibilidad tomando en cuenta el histórico de incendios ocurrido en el área de estudio.

Cercanía a las vías: Para realizar el mapa de vías se tomó en cuenta la información de vías a escala 1:250000 del SNI (Sistema Nacional de Información) y con el histórico de incendios del área de estudio (2014-2019).

Cobertura vegetal: Para determinar el nivel de susceptibilidad del suelo se aplicó el siguiente procedimiento de tres etapas: primero, se geo-referenciaron los polígonos de cobertura vegetal, es decir, se geo-referenciaron 632 puntos en campo y en un Sistema de Información Geográfica de acuerdo con los 5 tipos de cobertura vegetal y cuerpos de agua existentes (Tabla 29).

Tabla 29.

Cobertura Vegetal de la REEA.

Categorías de Uso del Suelo/ Cobertura Vegetal
Cuerpos de agua
Páramo de frailejones
Páramo arbustivo
Páramo herbáceo
Páramo de almohadillas
Áreas intervenidas

Segundo, se realizó la clasificación supervisada de la imagen de satélite Landsat 8 del año 2016 con los puntos de la cobertura vegetal previamente geo-referenciados, para comprobar la validez de la clasificación se realizó la matriz de confusión y se calculó el coeficiente Kappa.

Tercero, se clasificó los rangos de susceptibilidad de las diferentes coberturas vegetales, mediante la tabulación de los datos obtenidos en las entrevistas a los expertos; la cual se realizó a través del uso de medidas de tendencia central. La aplicación de la moda permitió establecer el nivel de susceptibilidad de cada una de las coberturas vegetales, clasificando 5 categorías. La zonificación de la susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal se realizó en 5 pasos: primero, se realizó la tabulación de datos, donde la moda fue la medida que se aplicó en el estudio, la cual indica el número que se repite con mayor frecuencia, esto permitió determinar la influencia de cada uno de los factores biofísicos previamente determinados en la generación y propagación de incendios. Segundo, se formuló la ecuación de susceptibilidad. Para plantear los coeficientes de la ecuación se aplicó la metodología de decisión multicriterio desarrollado por Saaty (1992), denominada AHP (Analytic Hierarchy Process) cuyos valores de importancia se obtuvieron usando una escala de comparación pareada (Tabla 30).

Tabla 30.
Escala de 9 Puntos para Comparaciones Apareadas.

Importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen idénticamente al objeto
3	Dominancia débil	La experiencia manifiesta que existe una débil dominancia de un elemento sobre otro
5	Fuerte dominancia	La experiencia manifiesta una fuerte dominancia de un elemento sobre otro
7	Demostrada dominancia	La dominancia de un elemento sobre otro es completamente demostrada
9	Absoluta dominancia	Las evidencias demuestran que un elemento es absolutamente dominado por otro
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Son valores intermedios de decisión

Fuente: Saaty (1992)

El tercer paso, consistió en la aplicación de la ecuación de susceptibilidad (5) en el software ArcGIS, esto permitió obtener el mapa de susceptibilidad para la Reserva Ecológica El Ángel y zona de amortiguamiento.

$$\begin{aligned}
 \text{Susceptibilidad} = & (0,23255 * \text{Uso} + 0,2050 * \text{Pend} + 0,1772 * \text{Prec} + 0,1037 * \text{Temp} \\
 & + 0,0799 * \text{V. viento} + 0,0790 * \text{C. vías} + 0,0640 * \text{ETR} + 0,0587 \\
 & * \text{Aspectos}
 \end{aligned}
 \quad (26)$$

Donde:

Uso = raster reclasificado de Uso del suelo

Pend = raster reclasificado de Pendientes

Prec = raster reclasificado de precipitación

Temp= raster reclasificado de Temperatura

V. viento= raster reclasificado de Velocidad del Viento

C. vías= raster reclasificado de Cercanía a las vías

ETR = raster reclasificado de Evapotranspiración

Asp = raster reclasificado de Orientación del Terreno

En el cuarto paso, fue la validación del modelo de susceptibilidad de incendios de la REEA empleando los datos de los “FOCOS DE CALOR” descargados del servidor INPE (Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales) de Brasil. Finalmente, para comprobar estadísticamente la aceptación del modelo se aplicó la prueba estadística de Chi cuadrado (X^2) y la curva Característica Operativa Relativa (ROC). Las pruebas se realizaron utilizando el software IBM SPSS Statistics.

Definición de estrategias

Para el diseño de la propuesta con estrategias de riesgo de incendio de cobertura vegetal, se aplicó el enfoque Presión Estado Respuesta (PER) que está basado en una lógica de causalidad; es decir, las actividades humanas ejercen presiones sobre el ambiente y cambian la calidad y cantidad de los recursos naturales (estado); asimismo, la sociedad responde a estos cambios a través de políticas ambientales, económicas y sectoriales (respuestas) (Pandía, 2018). En la Figura 25, se indica el enfoque PER.

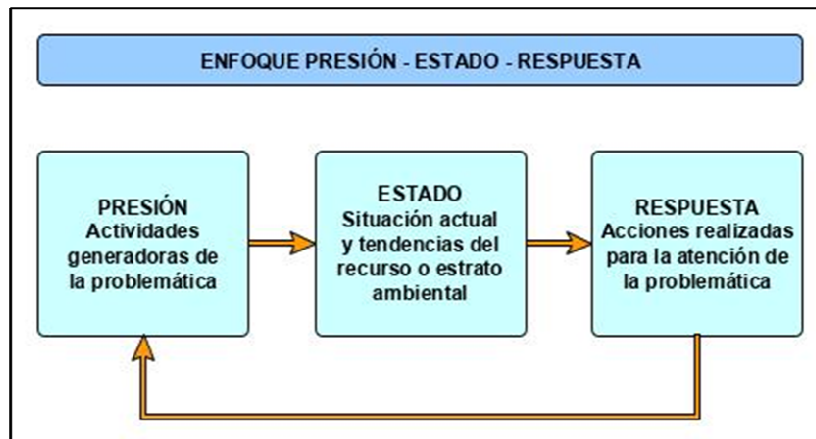


Figura 25. Esquema de Presión, Estado, Respuesta.
Fuente: Elaboración propia con base en Pandia (2018).

Resultados y discusión

Los factores biofísicos que inciden en la ocurrencia de incendios en la reserva ecológica El Ángel y zona de amortiguamiento fueron ubicados de mayor (1) a menor (8) influencia con respecto a la opinión de los expertos ante la ocurrencia de incendios (Tabla 31).

Tabla 31.

Factores que Influyen en la Ocurrencia de Incendios.

Factores	Importancia
Cobertura vegetal	1
Temperatura	2
Pendientes	3
Orientación del terreno	4
Precipitación	5
Evapotranspiración	6
Velocidad del viento	7
Cercanía a las vías	8

Factores climáticos

Precipitación: La precipitación multianual dentro del área d estudio oscila entre los 730 hasta 1109,40 mm/anuales. Se estableció los rangos de susceptibilidad en 5 niveles (muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto) (Tabla 32).

Tabla 32.

Rangos de Precipitación de Susceptibilidad a Incendios de la REEA y Zona de Amortiguamiento.

Valor	Rangos de precipitación (mm)	Susceptibilidad
1	>1109,40	Muy Bajo
2	1109,30 – 985,616	Bajo
3	985,60 – 861,82	Moderado
4	861,81 – 738,03	Alto
5	<738,02	Muy Alto

Temperatura: La temperatura es un factor biofísico que influyó en la generación de incendios dentro el cantón, la temperatura media anual es de 11,79 °C. Los niveles de susceptibilidad se clasificaron en 5 niveles (Tabla 33).

Tabla 33.

Rangos de Temperatura de Susceptibilidad a Incendios de la REEA y Zona de Amortiguamiento.

Valor	Rangos de temperatura (°C)	Susceptibilidad
1	<6,05	Muy Bajo
2	6,06 – 7,96	Bajo
3	7,97 – 9,87	Moderado
4	9,88 – 11,78	Alto
5	>11,79	Muy Alto

Evapotranspiración: La evapotranspiración potencial (ETP) es un factor biofísico que influye en la generación de incendios, este factor dentro del área de estudio muestra pérdidas de humedad que van desde los 430 a 480 mm/anuales. La susceptibilidad de la reserva ecológica muestra los 5 niveles de riesgo a incendios que se presentan en el área de estudio (Tabla 34).

Tabla 34.

Rangos de ETP de Susceptibilidad a Incendios de la REEA y Zona de Amortiguamiento.

Valor	Rangos de Evapotranspiración (mm)	Susceptibilidad
1	<430,27	Muy Bajo
2	430,28 – 447,17	Bajo
3	447,28 – 464,07	Moderado
4	464,08 – 480,97	Alto
5	> 480,98	Muy Alto

Velocidad del viento: El viento es un elemento del clima que influye directamente sobre la vegetación, al disminuir significativamente el contenido de humedad favoreciendo la deshidratación de la vegetación la cual incide como combustible vegetal. Para el área de estudio se presentaron valores de velocidad del viento que oscilan entre 3 y 7 m/s (Tabla 35).

Tabla 35.

Rangos de Velocidad del Viento de Susceptibilidad a Incendios de la REEA y Zona de Amortiguamiento.

Valor	Rangos de velocidad del viento (m/s)	Susceptibilidad
1	<3,01	Muy Bajo
2	3,02 – 4,54	Bajo
3	4,55 – 6,07	Moderado
4	6,08 – 7,6	Alto
5	>7,7	Muy alto

Factores topográficos

Pendientes: Las pendientes del terreno son un factor biofísico que influye en los incendios, debido a la facilidad de la propagación que se generan en fuertes pendientes. Dentro de la reserva ecológica El Ángel existen pendientes menores a 10% hasta superiores a 45%. Los rangos de susceptibilidad del área de estudio son 5 (Tabla 36), el nivel asciende al igual que el porcentaje de pendientes.

Tabla 36.

Rangos de Pendiente de Susceptibilidad a Incendios de la REEA y Zona de Amortiguamiento.

Valor	Rangos de pendientes (%)	Susceptibilidad
1	<10	Muy Bajo
2	10,01 - 20	Bajo
3	20,01 - 30	Moderado
4	30,01 - 40	Alto
5	> 40,01	Muy Alto

Orientación del terreno: La orientación del terreno es un factor topográfico del área de estudio que interviene en la generación de incendios. Para clasificar las orientaciones en 5 niveles de susceptibilidad (Tabla 37) se tomó en cuenta el número de incendios ocurridos y la dirección del viento.

Tabla 37.

Rangos de Orientación del Terreno de Susceptibilidad a Incendios de la REEA y Zona de Amortiguamiento.

Valor	Orientación del terreno	Susceptibilidad
1	Plano	Muy Bajo
2	NE, O	Bajo
3	N, NO	Moderado
4	S, E	Alto
5	SO, SE	Muy Alto

Proximidad a las vías: El factor biofísico proximidad a las vías en el área de estudio, muestra que la mayoría del territorio presenta susceptibilidad baja a incendios por la poca red vial existente. Los niveles de susceptibilidad dentro de la reserva y zona de amortiguamiento (Tabla 38), muestra que mientras más alejado de las vías se encuentren las áreas, existe menos probabilidad de generarse un incendio.

Tabla 38.

Rangos de Proximidad a Vías de Susceptibilidad a Incendios de la REEA y Zona de Amortiguamiento.

Valor	Proximidad a las vías (m)	Susceptibilidad
1	>400,1	Muy Bajo
2	300,1 - 400	Bajo
3	200,1 - 300	Moderado
4	100,1 - 200	Alto
5	<100	Muy Alto

Cobertura vegetal: Como resultado de la clasificación de la imagen Landsat, se obtuvo un valor del coeficiente de Kappa de 0,61 el cual representa un grado de concordancia considerable para la clasificación de coberturas vegetales del área de estudio. Las características de propagación e intensidad de los incendios de cobertura vegetal dependen de la disponibilidad del material vegetativo combustible sobre el terreno. Al identificar el tipo de coberturas se determinó cuáles presentan mayor susceptibilidad a incendios (Tabla 39).

Tabla 39.

Susceptibilidad a Incendios de la Cobertura Vegetal de la REEA y Zona de Amortiguamiento.

Valor	Cobertura Vegetal	Susceptibilidad
1	Cuerpos de agua	Muy Bajo
2	Páramo de almohadillas	Bajo
3	Páramo arbustivo	Moderado
4	Páramo de Frailejones	Alto
5	Áreas intervenidas/ Páramo herbáceo	Muy Alto

Para la zonificación de la reserva en zonas susceptibles a incendios, se procedió a calcular los valores de ponderación de cada factor (Tabla 40).

Tabla 40.

Ponderación de Factores Biofísicos Influyentes en Incendios de la REEA.

Factores biofísicos	Ponderación
Cobertura vegetal	0,2325
Pendiente	0,2050
Precipitación	0,1772
Temperatura	0,1037
Velocidad del viento	0,0799
Cercanía a las vías	0,0790
Evapotranspiración	0,0640
Orientación del terreno	0,0587

Tomando en cuenta los valores obtenidos de la ponderación de cada factor, se aplicó la ecuación de susceptibilidad a incendios para el área de estudio. Una vez aplicada la fórmula del Índice de susceptibilidad se clasificó el área de estudio en zonas de susceptibilidad muy alta, alta, moderada, baja y muy baja, teniendo como resultado el mapa de zonas susceptibles a incendios de cobertura vegetal de la reserva ecológica El Ángel y zona de amortiguamiento como se presenta en la Figura 26.

El modelo de susceptibilidad de la reserva ecológica El Ángel permite evidenciar que el área de estudio está dominada por la susceptibilidad alta y muy alta que ocupan el 68% de la superficie, de los cuales el 39,33% corresponde a la susceptibilidad alta, seguido de una susceptibilidad muy alta con un porcentaje de 29,35%.

El valor de significancia de Pearson (0,012) permitió comprobar la asociación de los focos de calor, con el modelo de susceptibilidad propuesto, de este modo la hipótesis alternativa fue aceptada por lo que se afirma que existe una relación entre el modelo obtenido y los focos de calor.

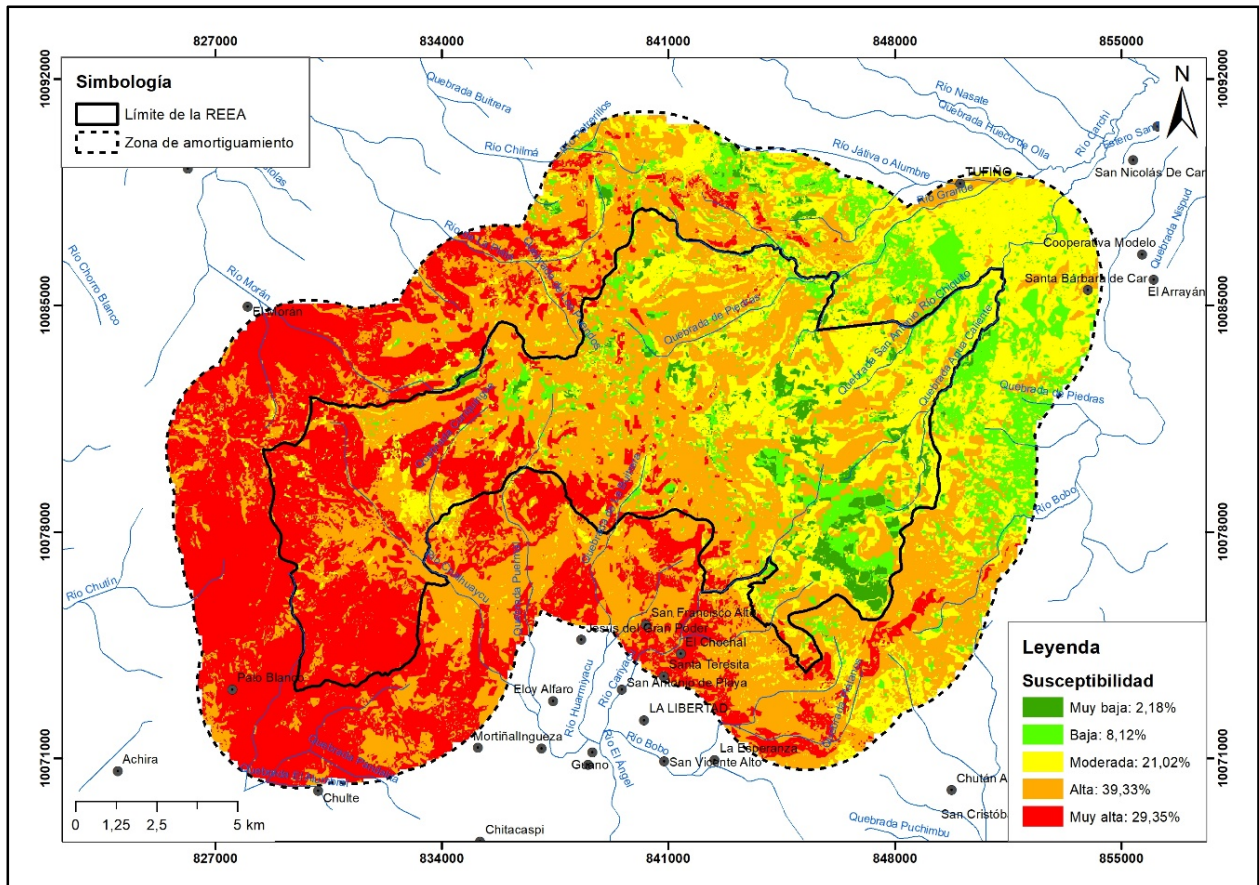


Figura 26. Modelo de Susceptibilidad de Incendios de Cobertura Vegetal de la REEA y Zona de Amortiguamiento.

En la REEA la susceptibilidad de incendios se expresa en los factores relacionados a la presencia humana en el área y a los factores climáticos. Jiménez, Urrego y Toro (2016) señalan que los factores climáticos proporcionan las condiciones óptimas para que un incendio se genere mientras que los factores topográficos son los que determinan la propagación y la magnitud de un incendio. Para el área de estudio, se determinaron como factores climáticos que inciden en la ocurrencia de incendios a la precipitación, evapotranspiración, velocidad del viento y temperatura; y como factores topográficos: la pendiente del terreno, uso del suelo, orientación del terreno y la cercanía a las vías.

Estrategias de prevención y mitigación de incendios en la reserva Ecológica El Ángel

Considerando el Enfoque PER se identificaron los indicadores correspondientes a la Presión, Estado, Respuesta, tal como se indica en la Tabla 41.

Tabla 41.
Enfoque Presión – Estado – Respuesta.

PER	Indicador
Presión	Incremento del número de visitantes al área protegida
Estado	Avance de la frontera agrícola Incendios de cobertura vegetal Áreas degradadas por incendios
Respuesta	Capacitación y conformación de brigadas de emergencias para respuestas oportunas ante eventos de incendios Conformación de brigadas comunitarias debidamente entrenadas para brindar una respuesta oportuna y adecuada ante cualquier emergencia de incendio Establecimiento de brigadas comunitarias organizadas y capacitadas para brindar apoyo en cualquier evento de incendios Implementación de torres de vigilancia en zonas con riesgo alto y muy alto Instalación de torres de control para mantener un monitoreo constante en las zonas de riesgo alto y muy alto Detección y alerta de conatos de incendios en un momento oportuno para obtener una respuesta oportuna y evitar afectaciones mayores al ambiente Identificación de rutas de acceso más rápido para los bomberos y guarda parques

Las estrategias que permitan prevenir y mitigar el riesgo de incendio de cobertura vegetal para la Reserva Ecológica El Ángel, se indican a continuación:

- Estrategia 1: Capacitación y conformación de Brigadas de Emergencia para dar una respuesta oportuna ante eventos de Incendios.
- Estrategia 2. Implementación de torres de vigilancia en zonas con riesgo alto y muy alto.
- Estrategia 3. Identificación de rutas de acceso más rápidas para los bomberos y guardaparques.
- Estrategia 4. Implementar un sistema de monitoreo y alerta de quemas controladas.
- Estrategia 5. Educación ambiental enfocada a los pobladores de la zona de amortiguamiento con énfasis en manejo del fuego como una herramienta.

Para la REEA y la zona de amortiguamiento, la cobertura y uso del suelo que presenta una susceptibilidad alta y muy alta está dada principalmente en la categoría áreas intervenidas, páramo herbáceo y páramo de frailejón que se distribuye en casi el 70% del total del área de estudio. En este sentido, los factores determinantes de la susceptibilidad alta y muy alta están dados principalmente por las características del combustible. La vegetación herbácea es considerada como un combustible de rápida ignición debido a su bajo contenido de humedad y poca área foliar, lo que hace que el control del fuego sea más difícil, ya que la cobertura se incendia rápidamente y el impacto en términos de áreas afectadas es mayor, mientras que el páramo de frailejón por sus características de contenido de humedad alto, su ignición es más lenta por el tiempo que emplea para que el contenido de humedad se equilibre con la humedad del aire como mencionan Carrera-Yandún y Guachi-Arque (2018), Morfín-Ríos et al., (2012) y Parra-Lara (2011).



Conclusiones

Los factores que presentaron mayor ponderación son la cobertura vegetal, la precipitación, temperatura, la pendiente y la velocidad del viento. La cobertura vegetal porque determina la ignición; la precipitación y la temperatura son los factores condicionantes de la fenología y fisiología de la vegetación; la pendiente y la velocidad del viento inciden en la velocidad de propagación e intensidad de los incendios de cobertura vegetal.

La Reserva Ecológica El Ángel y zona de amortiguamiento presentó susceptibilidad al fuego en el 68% de su superficie, de los cuales el 21,02% (8 771,4 ha) corresponde a la susceptibilidad moderada, en la que predominó la cobertura páramo arbustivo; con susceptibilidad alta se presentó en el 39,33% (16 411,6 ha) que está cubierto por páramo de frailejón, y con muy alta susceptibilidad se presentó en el 29,35% (12 244,1 ha) en la que la superficie está cubierta por pajonal y áreas intervenidas.

Las estrategias que permitirán prevenir y mitigar el riesgo de incendio son: Capacitación y conformación de Brigadas de Emergencia para dar una respuesta oportuna ante eventos de incendios, Implementación de torres de vigilancia en zonas con riesgo alto muy alto, Identificación de rutas de acceso más rápidas para los bomberos y guarda parques, Implementación de un sistema de monitoreo y alerta de quemas controladas; y Educación ambiental. Esta aplicación conjunta permitirá que una superficie de 87,71 km² de páramo y vegetación arbustiva de la REEA que se encuentra dentro de la cuenca del río Mira sea preservada.

Referencias

- Baldin, N., y Munhoz, E. (2011). *Snowball (Bola de Neve): Uma Técnica Metodológica para Pesquisa em Educação Ambiental Comunitária*. Curitiba, Brasil: Pontificia Universidad Católica Do Paraná.
- Bond, W., y Keeley, J. (2005). Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 20(7), 388-394.
- Carrera-Yandún, A., y Guachi-Arque, S. (2018). *Evaluación de carbono fijo en páramo andino mediante la estimación de biomasa en la reserva Sabia Esperanza (Tesis de pregrado)*. Ibarra, Ecuador: Universidad Técnica del Norte.
- Díaz, G., Sánchez, I., Quiroz, R., Garatuza, J., Watts, C., y Cruz, I. (2008). Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México. *Agricultura Técnica en México*, 34(3), 279-287.
- Espinoza, J. (2010). Qué modelo de clima utilizar en la región tropical de Sudamérica para estudios de impacto ambiental. *Documentos Seminario Taller Internacional de Climatología*. Quito - Ecuador.
- Mejía, C. (2017). *Zonificación de riesgos a incendios forestales en la cuenca del río Coello en el departamento del Tolima. (Tesis doctoral)*. Universidad de Manizales. Manizales.
- Ministerio del Ambiente. (2008). *Plan de manejo de la Reserva Ecológica El Ángel*. Quito-Ecuador.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Plan de Manejo de la Reserva Ecológica El Ángel*. Quito-Ecuador.
- Morfin-Ríos, J., Jardel, E., Alvarado, E., y Michel-Fuentes, J. (2012). *Morfin-Ríos, J.E, E.J. Jardel P., E. Alvarado C. y J.M. Michel-Fuentes. Caracterización y cuantificación de*



- combustibles forestales*. Jalisco, México: Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara. Guadalajara.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). (2006). Fire management global assessment 2006. Obtenido de www.fao.org/docrep/fao/009/A0969E/A0969E00.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). (2012). *Manejo del fuego. Estrategias de manejo del fuego*. Obtenido de <http://www.fao.org/forestry/firemanagement/es/>.
- Pandia, E. (2018). Modelo presión, estado, respuesta (PER), para la clasificación de indicadores ambientales y gestión de la calidad del agua caso: cuenca del río Puyango Tumbes. *Revista del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, 19(37), 39-46.
- Parra-Lara, A. (2011). *Incendios de la cobertura vegetal en Colombia*. . Valle del Cauca, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente.
- Pazmiño, D. (2019). Peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos en Ecuador. *FIGEMPA: Investigación Y Desarrollo*, 1(1), 10-18.
- Pereyra, D., Cruz, D., y Pérez, J. (2010). *La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático*. Veracruz: Investigaciones geográficas, versión Online ISSN 2448-7279.
- Pourrut, P. (1995). *El agua en Ecuador, clima precipitaciones, escorrentía*. Orstom.
- Reguant-Álvarez, M., y Torrado-Fonseca, M. (2016). *El método Delphi*. Barcelona: Universitat de Barcelona. Institut de Ciències de l'Educació.
- Rico, R. (2011). *Cuerpo oficial de Bomberos de Ibagué. Plan de contingencia para incendios forestales municipio de Ibagué – Tolima*. Obtenido de <https://cortolima.gov.co>
- Saaty, T. (1992). *Decision making for leaders*. Pittsburgh, USA: RWS Publication.
- Secretaria Nacional de Gestión de Riesgos (SGR/ECHO/UNISDR). (2017). *Referencias Básicas para la Gestión de Riesgos 2013 - 2014*.
- Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. (2019). *Informe de Situación - Incendios Forestales a nivel nacional* . Samborondón.
- Vaersa. (2012). *Manual de buenas prácticas, en prevención de incendios forestales* . Valencia, España: Servicio de prevención y extinción.
- Vera, T. (2015). *Estudio integral de riesgos en una zona sujeta a amenazas, para generar escenarios de riesgo usando herramientas SIG e información técnica (Tesis de postgrado)*. Quito, Ecuador: Universidad San Francisco



Análisis de la Vulnerabilidad Volcánica en Sectores Rurales: el caso de la Microcuenca Alta del Río Tahuando-Ecuador

Diego Guerrero¹ y Paul Arias Muñoz¹

Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador. Correo de correspondencia: dparias@utn.edu.ec

Resumen

La vulnerabilidad que provocan las erupciones volcánicas en territorios expuestos también es producto de comportamientos humanos, deficientes estructuras políticas-institucionales y respuestas institucionales a las amenazas inmediatas. El presente estudio tuvo por objeto determinar la vulnerabilidad volcánica en cuenca alta del río Tahuando, ubicada en la parroquia Angochagua, en el cantón Ibarra, en Ecuador. Se determinó la exposición del territorio mediante el uso de información secundaria de Geodatabase de la distribución de ceniza, lahares y flujos piroclásticos del volcán Imbabura. Después se realizaron 63 encuestas mediante un muestreo no probabilístico intencionado, con el fin de identificar causas subyacentes de progresión de vulnerabilidad. Los resultados mostraron que el 76% de la parroquia está expuesta a los peligros del volcán Imbabura. También se encontró que existen factores sociales, económicos, político-institucionales sobre los cuales subyacen las condiciones inseguras de vulnerabilidad. Finalmente, se propuso un modelo para el análisis de la vulnerabilidad en sectores rurales.

Palabras clave: vulnerabilidad subyacente, peligro volcánico, sectores rurales

Introducción

El impacto económico, social y ambiental de las catástrofes supone un tema de prioridad máxima en muchos países, especialmente en los más afectados en cuanto a número de eventos y coste de los mismos (Ruiz, 2012). La sociedad humana enfrenta una situación alarmante en relación con el creciente número de eventos y escenarios que pueden ser calificados como “desastres y/o catástrofes” (Maturana, 2011). Gran parte de la responsabilidad de los daños en grandes desastres se debe al crecimiento de la población, sin considerar las restricciones del medio natural (Rojas y Reyes, 2011).

En los lugares donde las condiciones socioeconómicas son desiguales y generan pobreza, los efectos de las amenazas naturales pueden agravarse. Desde el punto de vista de la Ecología Política, la confluencia de los elementos de la Economía Política, los Estudios Culturales, la Geografía, la Antropología y la Sociología Ambiental resaltan que los conflictos entre naturaleza y sociedad nacen desde las transformaciones ambientales que se generan en el territorio y los problemas sociales que se generan por la distribución del poder (Romero y Romero, 2015).

Los efectos de los desastres naturales muestran en gran parte toda la magnitud, intensidad y duración del área afectada. La zonificación de riesgos es uno de los pilares en el ordenamiento del territorio, porque regula el uso del suelo y ofrece lineamientos para los planes estratégicos de desarrollo (Smith et al., 2004). Sin embargo, una correcta zonificación se alcanza entendiendo los antecedentes físico-estructurales de eventos catastróficos anteriores (Mardones y Vidal, 2001), e incorporando las zonas vulnerables producto de condiciones pre-existentes (Kelly & Adger, 2000).



La vulnerabilidad comúnmente es definida como “el grado al cual un sistema, o un subsistema es susceptible e incapaz de afrontar probables efectos adversos producto de perturbaciones, factores estresantes o exposiciones a amenazas” (Turner II et al., 2003, p.8074). El estudio de la vulnerabilidad ha sido abordado desde distintas áreas temáticas y enfoques, donde los principales incluyen: amenazas naturales (Burton et al., 1993), ecología humana (Hewitt, 1983; Cutter, 2003), y ecología política (Wisner et al., 2004). Históricamente, la vulnerabilidad ha sido analizada desde el enfoque de las amenazas, es decir, entendida como una combinación de exposición al peligro y susceptibilidad a sus impactos (Few et al., 2017). La vulnerabilidad debe ser entendida como la construcción de condiciones sociales diferenciadas por estructuras sociales y aspectos del comportamiento humano. En esta perspectiva intervienen los enfoques de Ecología Humana y Ecología Política.

El análisis de vulnerabilidad volcánica es complejo, debido a la multiplicidad de fenómenos, que causan susceptibilidad como: caída de piroclastos, dispersión de cenizas, lava, deslizamiento de laderas, deformación de terreno y sismos (Pérez, 2012). La caída de cenizas y lahares pueden cambiar características físicas y químicas del suelo, y las nubes de polvo pueden mantenerse durante décadas y modificar la estructura atmosférica, al generar un intercambio térmico (Ferrado, 2003). Aunque el riesgo volcánico parte desde la exposición al peligro, incluye también la vulnerabilidad construida en los territorios (Lara y Calderón, 2015).

Los estudios de vulnerabilidad volcánica, a menudo se limitan al análisis de exposición del territorio a caída de cenizas o flujos volcánicos (Alberico et al., 2011; Jenkins et al., 2014). Este tipo de vulnerabilidad es física y se considera binaria, es decir, se resume a la presencia o ausencia de daño. Normalmente bajo este enfoque, la vulnerabilidad volcánica se ha evaluado considerando las variables de población, víctimas fatales y posible infraestructura afectada (Lara et al., 2006). Desde esta perspectiva se considera que vulnerabilidad y exposición son similares. Este enfoque da una lectura simplista del territorio y no considera que la vulnerabilidad volcánica se construye socialmente producto de condiciones sociales y económicas (Michellier et al., 2020).

La vulnerabilidad que provocan las erupciones volcánicas en territorios expuestos también es producto de comportamientos humanos, deficientes estructuras políticas-institucionales y respuestas institucionales a las amenazas inmediatas (Few et al., 2017). Por ejemplo, D’Ercole et al. (2009) demuestran en su estudio realizado en Quito, que después de la erupción volcánica del volcán Pichincha, existió problemas en la toma de decisiones, coordinación institucional y en la acción pública en la gestión de la crisis.

Bajo ese contexto, hay que entender la vulnerabilidad volcánica tanto desde el comportamiento social, la estructura administrativa, y la estructura física de cada elemento expuesto. Puesto que se evitaría que los peligros provoquen daños en cuanto a magnitud, intensidad y duración. Sin embargo, se ha prestado poca atención a las implicaciones de la actividad volcánica, en el medio de vida y el bienestar de las personas. Incluso son pocos los autores que consideran a la actividad volcánica como catalizador potencial del cambio social (Bachri et al., 2015; Dove, 2008).

Entonces, la vulnerabilidad volcánica es producto de la exposición, así como de las condiciones internas de los territorios. Cuando se habla de condiciones internas también es necesario pensar en percepción (Dove, 2008). Debido a que mientras los vulcanólogos, sismólogos o hidrólogos tienen su propia percepción basada en criterios científicos, la población cimienta su percepción en criterios propios relacionados con la cultura, la religión, las características socioeconómicas y de educación, el tiempo de residencia en un lugar, las

experiencias anteriores, la edad, el género, etc. Por ese motivo, existen divergencias entre criterios de la población y científicos (Salazar y D'Ercole, 2009). La población actúa bajo sus propias percepciones lo que se convierte en una dificultad mayor que las autoridades deben resolver en escenarios normales, de crisis y emergencia (Pizarro, 2001; D'Ercole y Metzger, 2015).

Este artículo tiene como objeto analizar la vulnerabilidad de la población frente a los impactos de las erupciones volcánicas en la cuenca alta del río Tahuando, con el fin de contribuir a la prevención y gestión de riesgos volcánicos a nivel local. Esta investigación va más allá de un enfoque de amenazas o “paradigma fiscalista”, el cual exclusivamente mira al peligro volcánico como sinónimo vulnerabilidad. Al contrario, la vulnerabilidad volcánica fue analizada como una construcción social progresiva frente a una exposición de un evento volcánico (Hewitt, 1983). Finalmente, los resultados encontrados permitieron repensar un modelo para el análisis de la vulnerabilidad en sectores rurales.

Área de estudio

La cuenca alta del río Tahuando está localizada en la parroquia Angochagua. Esta es una parroquia rural que pertenece al cantón Ibarra en la provincia Imbabura (Figura 27). El relieve es irregular y comprende un territorio de pisos climáticos con rangos altitudinales entre los 2800 m s. n. m y los 3800 m s. n. m. La temperatura varía entre los 10°C y 16°C con una precipitación promedio anual de 700 y 1.500 mm (Caicedo y Casanova, 2007). La geología del lugar es esencialmente volcánica, entre las rocas más importantes están: andesitas, brechas, tobas andesíticas, aglomerados, lavas y arenas, donde la formación volcánica Angochagua es la más importante.

La cuenca se encuentra aproximadamente a 7 km de distancia del volcán Imbabura y a 18 km de distancia del volcán Cayambe. El Imbabura presenta una cumbre máxima 4621 m s. n. m. y es un tipo de edificio volcánico conocido como “estrato-volcán compuesto”. Se caracteriza por presentar un gran edificio principal de forma cónica alrededor del cual han ido desarrollándose otros edificios más pequeños (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2020). El volcán Cayambe, por su parte, presenta una cumbre máxima de 5790 m s. n. m, y sobre los 4800 metros el volcán está cubierto por un casquete glaciar (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2020).

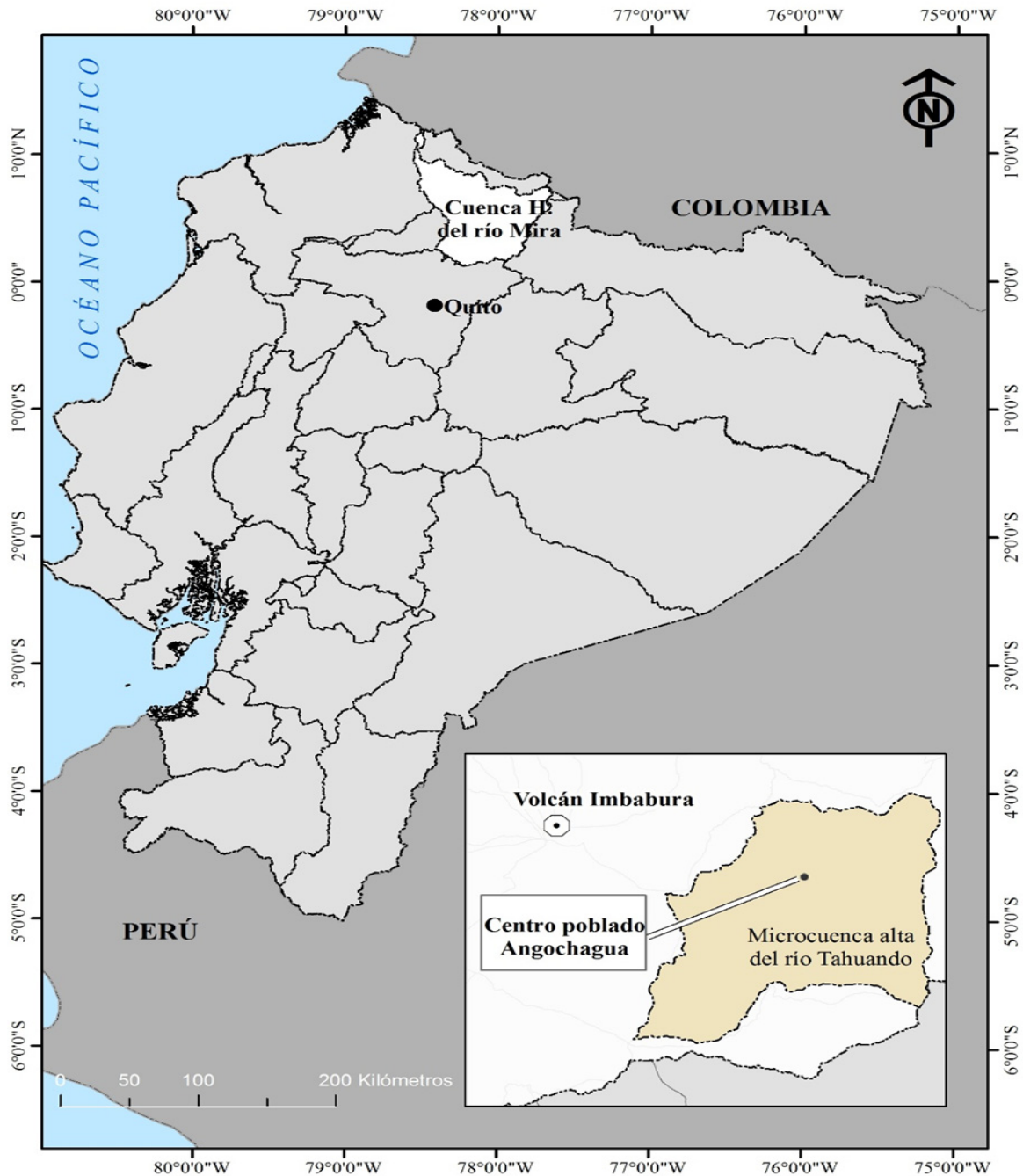


Figura 27. Ubicación de la Microcuenca Alta del río Tahuando.

Métodos

Primero se identificaron los volcanes con influencia alrededor del área de estudio, con el fin de identificar los sectores expuestos ante amenazas volcánicas utilizando herramientas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se utilizó información secundaria de geodatabase obtenidos del Instituto Geográfico Militar de Ecuador (IGM) a escala de trabajo 1:50000 para los peligros volcánicos. De esta manera se zonificó la exposición en el territorio a materiales como: ceniza, lahares y flujos piroclásticos.

Después se determinó los factores de vulnerabilidad volcánica mediante la aplicación de encuestas no probabilística intencionada a 63 hogares y el uso del Modelo de Progresión de la Vulnerabilidad, modelo PAR, para su análisis (Figura 28). La información recopilada se

dividió en tres grupos: Causas Sociales, Presiones Dinámicas y Condiciones Inseguras. En base a las Condiciones Inseguras se determinó factores de vulnerabilidad: Ambiente-Físico, Económico, Social y Político-Institucional. En cada grupo y factor se identificaron los porcentajes afirmativos y su rol dentro del modelo PAR.

La implementación del modelo PAR, responde a las relaciones directas que existen cuando se crean escenarios que ayudan a entender la progresión de la vulnerabilidad. Es así que se estableció las distintas conexiones entre las variables del modelo para definir y entender los principales problemas que se generan cuando existe vulnerabilidad. Ese análisis sirvió para el desarrollo de un modelo de análisis de vulnerabilidad en sectores rurales.



Figura 28. Modelo PAR (Prepressure and Release) de Progresión de Vulnerabilidad.
Fuente: Wisner et. al. (2004)

Resultados y discusión

El volcán Imbabura es el único con radio de incidencia en la parroquia de Angochagua y en consecuencia en la cuenca hidrográfica. Se encontró que el volcán expone a la microcuenca a caída de cenizas y flujos de piroclastos (Figura 29). En mayor peligro al 29,07% y en menor peligro al 46,93% de la microcuenca.

EXPOSICIÓN A PELIGROS VOLCÁNICOS DEL VOLCÁN IMBABURA

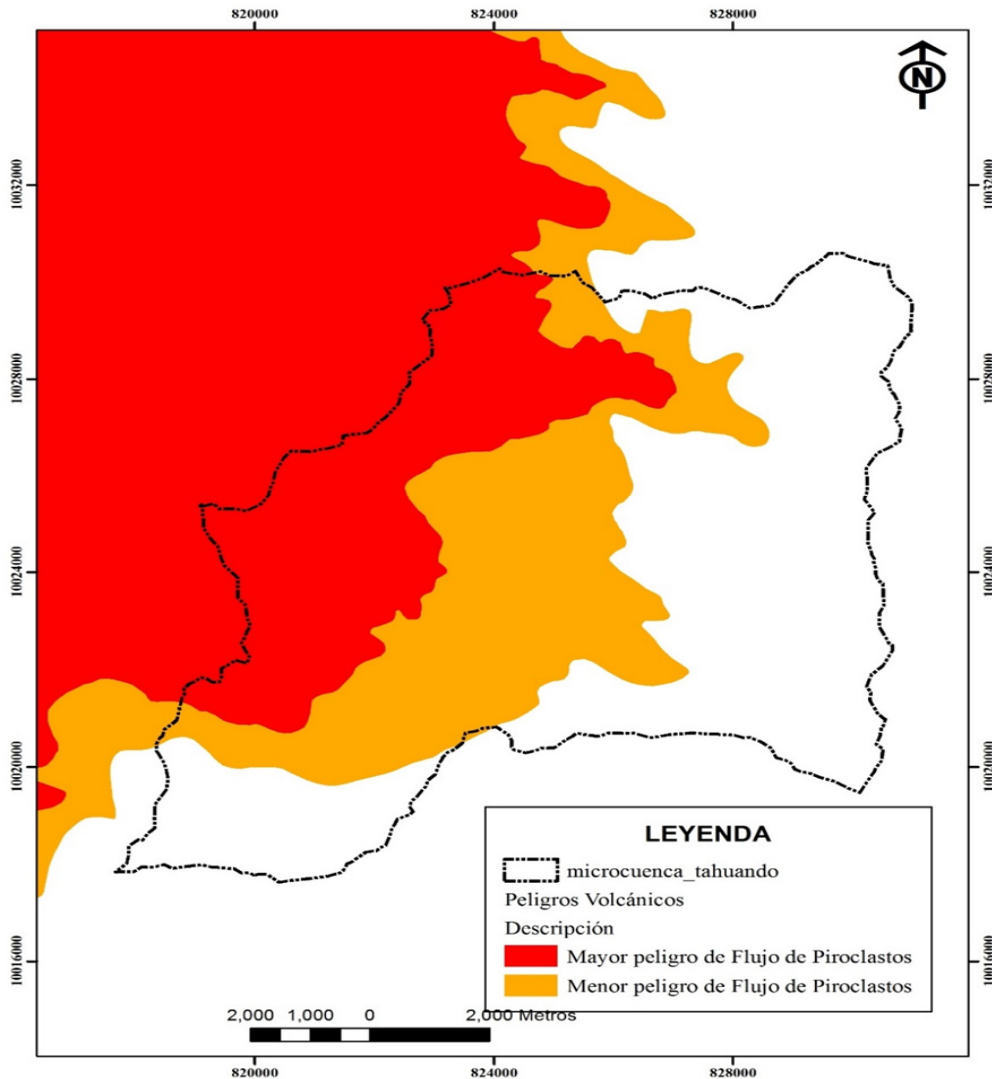


Figura 29. Exposiciones de Cenizas y Flujos Piroclásticos del Volcán Imbabura.

Factores de Vulnerabilidad

Factor Social: Se obtuvo que la participación de hogares en organizaciones es baja, considerando que el 80,85% de familias encuestadas no pertenece a ninguna organización. El nivel de analfabetismo o educación básica primaria alcanza el 77,5% de la población en la parroquia, y existe el 23,7% de personas que presentan alguna discapacidad.

Factor físico: Se evidenció que el 91% de las edificaciones en las comunidades no cuentan con planos de construcción. Esto determina que los habitantes se asientan en lugares inseguros, modificando la estructura socio ambiental de los territorios. Por otro lado, el consumo de agua en la población generalmente no es tratada (91%) lo que dificultaría su uso en caso de una erupción volcánica.

Factor político-institucional: Se encontró que existe el 82,3% de los hogares desconocen el peligro volcánico en el que se encuentran. Es decir, el 90,2% de la población no cuenta con capacitaciones con relación a peligros volcánicos y a esto se suma la ausencia total de planes de emergencia o acciones de prevención ante erupciones volcánicas forjando debilidades e incrementando la vulnerabilidad en toda la parroquia.

Factor económico: El componente económico en los procesos de vulnerabilidad es el encargado de estimular los medios de vida de las poblaciones rurales. Debido a que bien, debilita o bien fortalece la dinámica económica en los sectores más vulnerables. La ausencia o desconocimiento de inversión local en la parroquia (39,5%) por parte de autoridades perjudica las relaciones económicas en las comunidades y no propicia un presupuesto participativo.

Por otra parte, la falta de mercados locales (80,9%) estimula a las familias a depender de una sola actividad económica (76%) en toda la parroquia, en este caso la agricultura. Esto provoca que la mayoría de las familias dependan también de otros ingresos económicos para la subsistencia de los hogares. En este contexto los bonos de desarrollo humano permiten a los hogares “resistir” de cierta manera las crisis económicas que puedan suscitarse. Sin embargo, la mayoría de las familias (69,6%) no perciben de esta ayuda económica.

Análisis de progresión de vulnerabilidad del modelo PAR

En la microcuenca alta del río Tahuando existe una construcción progresiva de la vulnerabilidad. Falencias estructurales como, un sistema económico primario, limitado acceso a educación, baja participación social y un bajo presupuesto económico comunitario participativo construyen progresivamente la vulnerabilidad territorial. Debido a estas condiciones existe una presión dinámicamente el territorio a través la pérdida de productividad agrícola por sobreexplotación, falta de inversión local, aumento poblacional, y deficiente educación para prevenir el riesgo. El producto final son las condiciones inseguras en las que habita la población, las cuales se traduce principalmente en desconocimiento del riesgo, baja economía, servicios básicos deficientes y ubicación en zonas peligrosas (Tabla 42).

Tabla 42.

Análisis del Modelo PAR.

Causas de fondo	Presiones dinámicas	Condiciones inseguras
Sistema económico agrícola-primario	Falta de inversión local y falta de mercados. Pérdida de productividad del suelo.	Provocan bajos niveles de ingresos económicos
Limitado acceso de educación Limitada participación social Bajo presupuesto participativo	Falta de capacitación ante riesgo volcánico Aumento de la población	Provocan que el 82,3% desconoce el peligro volcánico al que están expuestos. Provoca que el 91% de la población no cuente con planos de construcción de viviendas. Desconocimiento total sobre la existencia de planes de emergencia ante erupciones volcánicas. Provoca que el 96, 21% de edificaciones se encuentran ubicados en topografía con pendientes >15%. Desatención a grupos especiales de riesgo.
	Falta de inversión local en servicios básicos	Provoca consumo de agua no tratada y el 81% de la población no tiene acceso al alcantarillado.

Los presentes resultados ayudan a comprender que la vulnerabilidad, y no solo la volcánica se construye socialmente. Debido a que es producto de condiciones prevalentes tanto sociales, económicas, políticas y ambientales. Sin duda la vulnerabilidad tiene un origen prevalente. Es decir, la vulnerabilidad se construye progresivamente desde los modelos de desarrollo excluyentes que crean condiciones pre-existentes, tal como lo mencionan Kelly y Adger, (2000) Tales condiciones crean presiones sobre la población que finalmente derivan en condiciones inseguras (Wisner, et. al., 2004). La vulnerabilidad en el sector rural, en definitiva, es un iceberg, porque presenta una parte visible y una parte sumergida. La parte visible, representa solamente un porcentaje de la masa total del iceberg y equivale a las condiciones inseguras (Figura 30). El porcentaje restante se encuentra sumergido bajo un modelo de desarrollo excluyente, muy característico en sistemas rurales agrarios de América Latina (Key, 1995). De esta manera se crea causas de fondo y presiones dinámicas políticas, sociales y económicas.

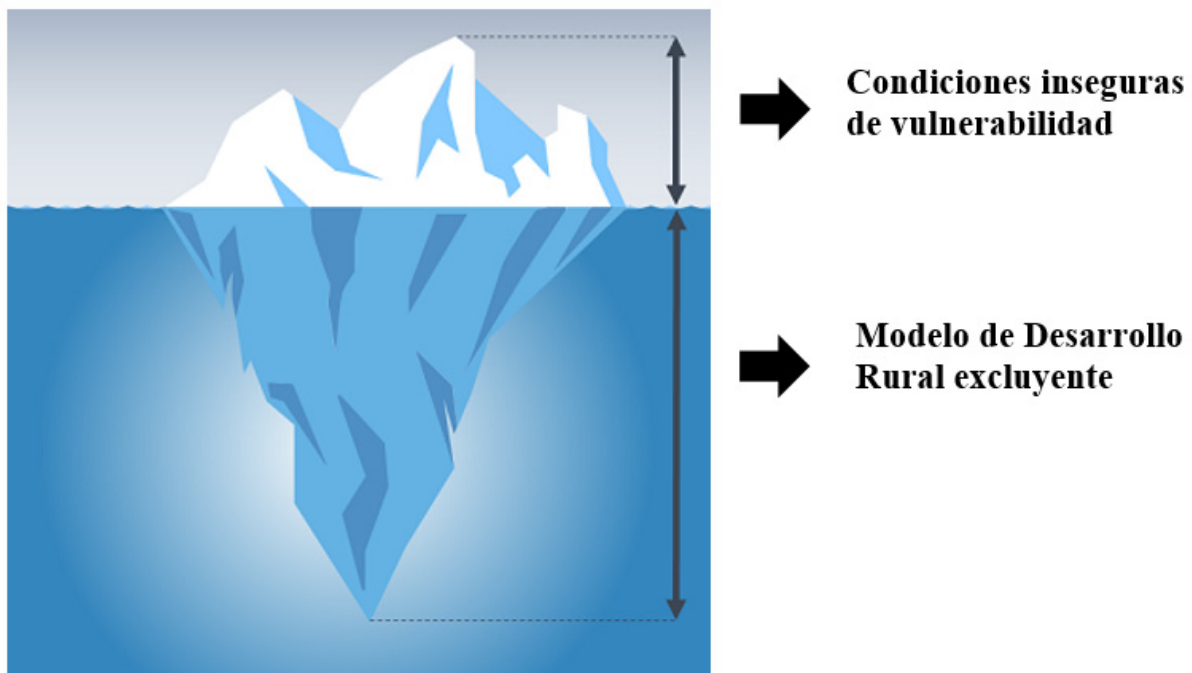


Figura 30. Modelo Iceberg para el análisis de la vulnerabilidad en sectores rurales.
Fuente: Figura adaptada de Barroche (2020)

En esta microcuenca, los bajos ingresos económicos, asentamientos inseguros y desconocimiento del peligro volcánico, no representan más que la parte visible del fenómeno. La parte sumergida del iceberg transita desde el limitado acceso a la educación, un modelo primario productivo con baja participación social hasta la sobre explotación del suelo, la baja inversión social y el poco interés por la gestión de riesgo volcánico. Sin duda la vulnerabilidad, y no solo la volcánica, es más compleja de lo que se percibe comúnmente. Debido a que la construcción de vulnerabilidad se sitúa entre los procesos de integración política, socioeconómica y los procesos de exclusión de desigualdad de derecho (Castel, 1992).

Conclusiones

La vulnerabilidad volcánica en la microcuenca alta del río alta del río Tahuando no se construye únicamente porque el 76% del territorio este expuesto a peligros del volcán Imbabura. Se configura por condiciones políticas, sociales y económicas deficientes, propias de los modelos de desarrollo excluyentes, especialmente en el sector rural. Por ese motivo, la



vulnerabilidad en sectores rurales debe ser analizada bajo un modelo de iceberg, mediante el cual las condiciones inseguras de vulnerabilidad son únicamente la parte visible, pero son el producto de un modelo de desarrollo excluyente la parte sumergida.

La vulnerabilidad es uno de los factores causales del riesgo y su análisis no puede ser simplificado a la idea de la exposición, peligro o susceptibilidad. La reducción y mitigación de la vulnerabilidad de cualquier tipo, e incluye la volcánica, tampoco se alcanza solo con el control de las condiciones inseguras a través de obras de ingeniería. Peor aún con la acción reactiva una vez manifestado el desastre. La reducción de la vulnerabilidad debe ser una construcción social participativa de los actores involucrados en el riesgo. El enfoque debe ser uno que pretenda la construcción de nuevas oportunidades de producción, asentamientos en condiciones de seguridad y sustentabilidad aceptables, y reducción de los niveles de desigualdad social. En consecuencia, un enfoque correctivo cuya meta sea la reducción de cualquier tipo de vulnerabilidad prevalente.

Referencias

- Alberico, I., Petrosino, P., y Lirer, L. (2011). Volcanic hazard and risk assessment in a multi-source volcanic area: the example of Napoli city (Southern Italy). . *Natural hazards and earth system sciences*, 11(4), 1057-1070.
- Bachri, S., Stötter, J., Monreal, M., y Sartohadi, J. (2015). The calamity of eruptions, or an eruption of benefits? Mt. Bromo uman–volcano system a case study of an open-risk perception. *Natural Hazards Earth System Science*(15), 277-290.
- Barroche, C. (25 de 03 de 2020). *Showeet. Plantillas PowerPoint Gratis y Creativas*. Obtenido de Showeet. Plantillas PowerPoint Gratis y Creativas: <https://www.showeet.com/es/condiciones-de-uso/>
- Burton, I., Kates, R., y White, G. (1993). *The Environment as Hazard*. . New York: Second ed. Guilford.
- Caicedo, D., y Casanova, G. (2007). *Diagnóstico Territorial y Plan de Manejo Ambiental, Documento preliminar*. barra, Ecuador.: Búsqueda Asociados.
- Castel, R. (1992). *La inserción y los nuevos retos de las intervenciones sociales. Marginación e inserción. Los nuevos retos de las políticas sociales*. . Madrid, España: Endimión.
- Cutter, S., Boruff, B., y Shirley, L. (2003). "Social Vulnerability to Environmental Hazards". *Social Science Quarterly* 84, num. 2, 242-260.
- D'Ercole, R., y Metzger, P. (2015). *Diferenciaciones espaciales y sociales, representaciones y manejo del riesgo volcánico en Quito*. Quito.
- D'Ercole, R., Hardy, S., Metzger, P., y Sierra, A. (2009). Alerta volcánica y erupción del volcán Pichinca en Quito (1998-1999). . *Revista BIFEA*, 38(3), 487–499.
- Dove, M. (2008). Perception of volcanic eruption as agent of change on Merapi volcano, Central Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 329-337.
- Ferrado, F. (2003). En torno a los desastres naturales: Tipología, conceptos y reflexiones. *Revista INVI*(18), 15–31.
- Few, R., Armijos, M. T., y Barclay, J. (2017). Living with Volcan Tungurahua: The dynamics of vulnerability during prolonged volcanic activity. *Geoforum* 80, 72-81.



- Hewitt, K. (1983). The Idea of Calamity in a Technocratic Age. En K. Hewitt, *Interpretations of Calamity from the Viewpoint of Human Ecology* (págs. 3-32). Boton: Allen and Unwin.
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (04 de Abril de 2020). *Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de Cayambe: <https://www.igepn.edu.ec/cayambe>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (04 de Abril de 2020). *Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de Imbabura: <https://www.igepn.edu.ec/imbabura>
- Jenkins, S., Spence, R., Fonseca, J., Solidum, R., y Wilson, T. (2014). Volcanic risk assessment: Quantifying physical vulnerability in the built environment. . *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 105-120.
- Kelly, P., y Adger, N. (2000). Theory and Practice in Assessing Vulnerability to Climate Change and Facilitating Adaptation. *Climatic Change* 47, 325-352.
- Kelly, M., y Adger, N. (2000). "Theory and Practice in Assessing Vulnerability to Climate Change and Facilitating Adaptation". *Climatic Change* 47, 325-352.
- Key, C. (1995). El desarrollo excluyente y desigual en la América Latina rural. *Nueva Sociedad* 137, 60-81.
- Lara, L., y Calderón, R. (2015). Peligro y riesgo específico asociado al volcán chaitén: perspectiva geológica de la vulnerabilidad en el entorno de un volcán activo. . *Revista Magallania*, 43(3), 27-35.
- Lara, L., J., C., Hinojosa, M., Huerta, S., Wall, R., y Moreno, H. (2006). Sistema de clasificación semicuantitativa de la vulnerabilidad volcánica. . *Volcanismo y Magmatismo*,(2), 487-489.
- Maturana, A. (2011). Evaluación de riesgos y gestión en desastres. 10 preguntas para la década actual. . *Revista Médica Clínica Las Condes*, 22(5), 545-555.
- Michellier, C., Kervyn, M., Barette, F., Muhindo-Syavulisembo, A., Kimanuka, C., Kulimushi, S., y . . . Kervin, F. (2020). Evaluating population vulnerability to volcanic risk in a data scarcity context: The case of Goma city, Virunga volcanic province (DR Congo). *International Journal of Disaster Risk Reduction*(45), 1-13.
- Pérez, D. (2012). *Metodología para la Gestión del Riesgo Volcánico*. . Chile: Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior.
- Pizarro, R. (2001). La vulnerabilidad social y sus desafíos: una mirada desde América Latina. *CEPAL-Serie. Estudios estadísticos y prospectivos*, 6, 41- 51.
- Rojas, O., y Reyes, M. (2011). Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales. . *Revista Universitaria de Geografía*, 20, 83-116.
- Romero, T., y Romero, H. (2015). Ecología política de los desastres: vulnerabilidad, exclusión socio-territorial y erupciones volcánicas en la Patagonia chilena. . *Revista Magallania (Punta Arenas)*, 43(3), 7-26.
- Ruiz, M. (2012). Vulnerabilidad territorial frente a desastres naturales: el caso de la isla de Mallorca (Baleares, España). *Geofocus*(12), 16-52.
- Salazar, D., y D'Ercole, R. (2009). Percepción del riesgo asociado al volcán Cotopaxi y vulnerabilidad en el Valle de Los Chillos (Ecuador). *Revista BIFEA*, 38(3), 23.



- Smith, R., Vélez, J., Rave, C., Caballero, H., Botero, V., y Escobar, D. (2004). XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. *Evaluación de riesgos en cuencas urbanas*. . Sao Paulo, Brasil.
- Turner II, B., Kasperson, R. E., Matson, P., McCarthy, J. J., Corel, R., Christensen, L., y . . . Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14), 8074-8079.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., y Davis, I. (2004). *At Risk. Natural hazards, people's vulnerability and disasters*. . London: Routledge.