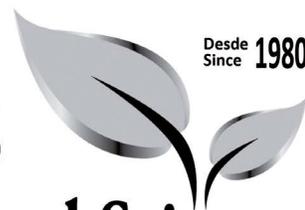




Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



Influencia geomorfológica en la vulnerabilidad a incendios forestales en el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica

Geomorphological Influence on Wildfires Vulnerability in Guanacaste Conservation Area, Costa Rica

Daniela Vargas-Sanabria^a y Adolfo Quesada-Román^b

- a Especialista en manejo de recursos naturales, investigadora en el Laboratorio de Investigación e Innovación Tecnológica, Vicerrectoría de Investigación, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica, danielavargas1989@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2483-4926
b Geógrafo y geomorfológico, Climate Change Impacts and Risks in the Anthropocene, Institute for Environmental Sciences, University of Geneva, Suiza, adolfo.quesada@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6601-5254

Director y Editor:

Dr. Sergio A. Molina-Murillo

Consejo Editorial:

Dra. Mónica Araya, Costa Rica Limpia, Costa Rica
Dr. Gerardo Ávalos-Rodríguez. SFS y UCR, USA y Costa Rica
Dr. Olman Murillo Gamboa, ITCR, Costa Rica
Dr. Luko Hilje, CATIE, Costa Rica
Dr. Arturo Sánchez Azofeifa. Universidad de Alberta-Canadá

Asistente:

Joseline Jimenez Brenes

Editorial:

Editorial de la Universidad Nacional de Costa Rica (EUNA)



Los artículos publicados se distribuyen bajo una Creative Commons Reconocimiento al autor-No comercial-Compartir igual 4.0 Internacional (CC BY NC SA 4.0 Internacional) basada en una obra en <http://www.revistas.una.ac.cr/ambientales>, lo que implica la posibilidad de que los lectores puedan de forma gratuita descargar, almacenar, copiar y distribuir la versión final aprobada y publicada (post print) del artículo, siempre y cuando se realice sin fines comerciales, no se generen obras derivadas y se mencione la fuente y autoría de la obra.



Influencia geomorfológica en la vulnerabilidad a incendios forestales en el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica

Geomorphological Influence on Wildfires Vulnerability in Guanacaste Conservation Area, Costa Rica

Daniela Vargas-Sanabria^a y Adolfo Quesada-Román^b

[Recibido: 20 de diciembre, 2017. Aceptado: 23 de marzo, 2018. Corregido: 3 de abril, 2018. Publicado: 1 de julio, 2018]

Resumen

El bosque tropical seco ubicado en el pacífico norte de Costa Rica es afectado de forma recurrente por incendios forestales, lo que impulsa cambios en la dinámica del paisaje, así como en los valores socioeconómicos y ecológicos del ecosistema. El objetivo del estudio es determinar las relaciones de la geomorfología en la vulnerabilidad a incendios forestales en el Área de Conservación Guanacaste, a partir de la relación entre el origen y la edad del material parental, así como la dinámica, morfología y evolución de las geoformas con las condiciones climáticas regionales y el bosque seco. Se realizó una cartografía geomorfológica con dos grupos genéticos: endógeno-modelado (cerro El Hacha, rampas volcánicas del complejo Orosí-Cacao, colinas tectónicas de Santa Elena) y exógeno (planicie costera). Se utilizó un modelo de vulnerabilidad a incendios forestales, que contempla componentes socioeconómicos y ecológicos; y, por último, se llevó a cabo un análisis cruzado entre las formas de relieve y el modelo de vulnerabilidad mediante el cruce de datos geoespaciales. Los resultados muestran que el porcentaje entre las formas de relieve y los rangos de vulnerabilidad indican un patrón en la morfología y el comportamiento en la composición de las laderas, orientación y localización. El estudio representa un acercamiento en la determinación de relaciones causales y dinámicas entre las formas de relieve y la vulnerabilidad a incendios forestales en el Área de Conservación Guanacaste.

Palabras clave: bosque seco tropical; geomorfología; incendios forestales; vulnerabilidad.

Abstract

The tropical dry forest located in the North Pacific Region of Costa Rica is recurrently affected by wildfires; this situation drives changes in landscape dynamics, as well as in the socioeconomic and ecological values of the ecosystem. This study aims to determine the relationship of the geomorphology to the wildfire vulnerability in Guanacaste Conservation Area, based on the relation between the origin with the age of the parental material, as well as the dynamics, morphology, and evolution of the geoforms with the regional climatic conditions and the dry forest. Geomorphological cartography was conducted with two genetic groups: the endogenous-modeled group (Cerro El Hacha, volcanic ramps of the Orosí-Cacao complex, tectonic hills of Santa Elena) and the exogenous one (coastal plain). A wildfire-vulnerability model was used; it includes socioeconomic and ecological components. Finally, a cross-analysis between the landforms and the vulnerability model was made by crossing geospatial data. The

a Especialista en manejo de recursos naturales, investigadora en el Laboratorio de Investigación e Innovación Tecnológica, Vicerrectoría de Investigación, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica, danielavargas1989@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2483-4926

b Geógrafo y geomorfólogo, Climate Change Impacts and Risks in the Anthropocene, Institute for Environmental Sciences, University of Geneva, Suiza, adolfo.quesada@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6601-5254



results show that the percentage between landforms and vulnerability ranges indicate a pattern in the morphology and behavior in the composition of the slopes, orientation, and location. The study represents an approach in the determination of causal and dynamic relationships between landforms and the wildfires vulnerability in Guanacaste Conservation Area.

Keywords: geomorphology; tropical dry forest; vulnerability; wildfires.

1. Introducción

Los efectos de los incendios forestales sobre los bosques y la biodiversidad se están convirtiendo en un mayor problema en todo el mundo. En parte, está relacionado con los impactos sustanciales de estos eventos en las poblaciones humanas, así como en su infraestructura. Además, la problemática está asociada con las predicciones de que las alteraciones naturales y antrópicas a gran escala, como el cambio climático, generarán incendios más frecuentes, generalizados e intensos (Flannigan *et al.*, 2009; Hidalgo *et al.*, 2013; Lindenmayer, 2010). En los trópicos, los incendios forestales están principalmente asociados a actividades humanas y, comparados con otras regiones del mundo, cada año se experimentan en mayor número (Cochrane, 2009).

El bosque tropical seco en el pacífico norte de Costa Rica es un ecosistema afectado recurrentemente por incendios forestales, lo que impulsa cambios importantes en la dinámica del paisaje. Otterstrom *et al.* (2006) se refieren a los incendios forestales como un factor determinante que impulsan los cambios de cobertura vegetal en ecosistemas de bosque seco y que son generados frecuentemente por factores antropogénicos.

Desde el periodo colonial, el bosque tropical seco de Guanacaste fue intensamente afectado por la deforestación para fines agropecuarios; no es sino a partir de la década de 1980, que se da un cambio en la política ambiental de Costa Rica para revertir este fenómeno y proteger amplias extensiones que originalmente estaban con dicho ecosistema (Janzen y Hallwachs, 2016; Jiménez *et al.*, 2016). Existen trabajos previos sobre la incidencia de incendios forestales en la provincia de Guanacaste, asociados con el fenómeno de El Niño (Villalobos *et al.*, 2000), con evaluaciones multicriterio (Moraga, 2010) y modelos de riesgo potencial para la prevención y control de incendios forestales (Vega-Araya, 2005).

El objetivo de este trabajo fue determinar cuáles son las relaciones que tiene la geomorfología en la vulnerabilidad a incendios forestales en el Área de Conservación Guanacaste (ACG), a partir de la relación entre el origen y la edad del material parental, así como la dinámica, morfología y evolución de las geoformas con las condiciones climáticas regionales y el bosque seco.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El trabajo se desarrolló en seis sectores del Área de Conservación Guanacaste (ACG): El Hacha, Santa Rosa, Murciélagos, Santa Elena, Pocosol y Refugio de Vida Silvestre Junquillal, que se ubican en el distrito de Santa Elena, cantón de La Cruz, provincia de Guanacaste,



Costa Rica (**Figura 1**). El ACG es una de las áreas de conservación que presenta mayor incidencia de incendios forestales en el país; además, allí se encuentra parte del ecosistema de bosque tropical seco.

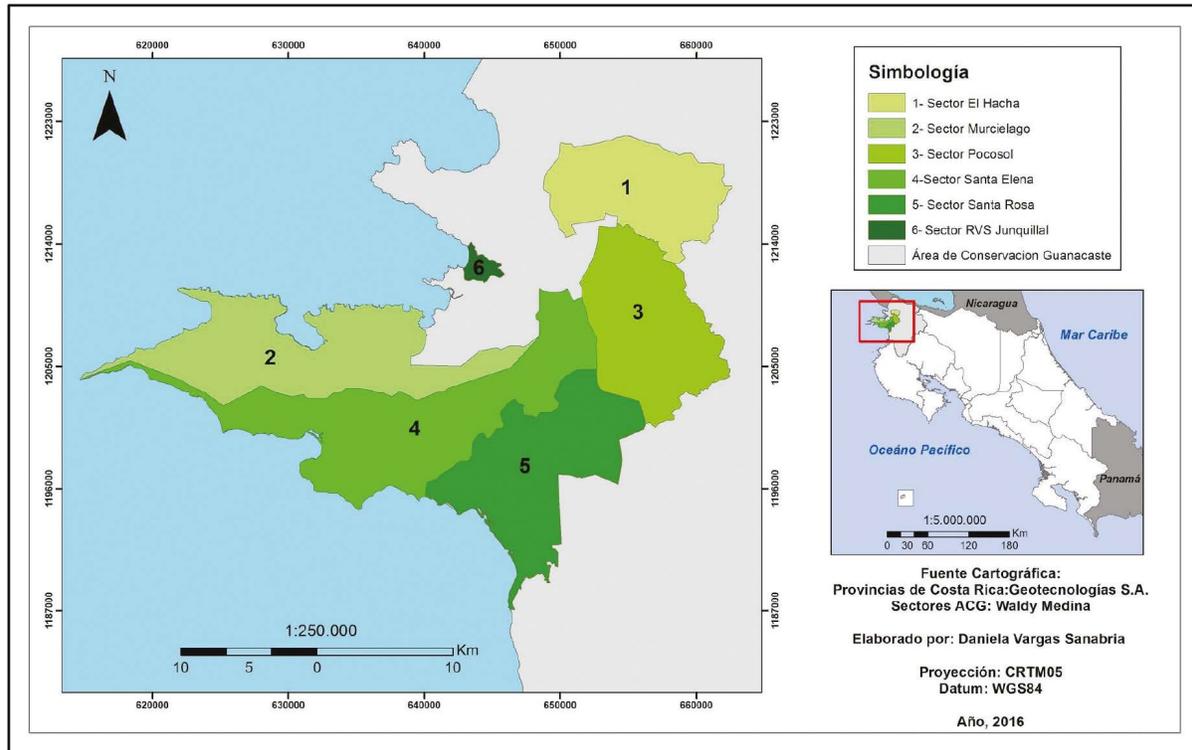


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio. Fuente: Vargas-Sanabria (2016).

El ACG se encuentra geológicamente asentada sobre la Meseta de Ignimbritas de Santa Rosa (MISR), la cual es producto de la subducción de placas entre Cocos y Caribe. Su subsecuente vulcanismo de conos como el Rincón de la Vieja y Orosí ha desarrollado erupciones violentas con la presencia de flujos piroclásticos cargados de productos litológicos cementados como las ignimbritas, así como erupciones más tranquilas con la deposición de coladas de lava o cenizas a lo largo de los cauces y planicies que dan hacia el océano Pacífico (Alvarado, 2011).

El relieve se conforma de cadenas montañosas y los suelos que se encuentran meteorizados con existencia de perfiles poco profundos, pero con horizontes conspicuos (Leiva *et al.*, 2009). La variación entre la Cordillera Volcánica de Guanacaste con la presencia de distintos conos volcánicos de gran volumen, como el Rincón de la Vieja (al noreste de la ciudad de Liberia) y el Orosí (ubicado aún más hacia el noreste), supone una transición que se extiende en los piedemontes volcánicos compuestos de materiales piroclásticos cementados y, a su vez, muy meteorizados por la influencia climática de altas temperaturas y precipitaciones moderadas, que no permiten el desarrollo de perfiles de suelo profundos, sino más bien se mantiene en el orden de los entisoles e inceptisoles dada su juvenil evolución dentro del proceso pedogenético.



Posterior a los piedemontes volcánicos de los complejos volcánicos, se alternan una serie de colinas y montañas bajas de origen tectónico, producto del plegamiento de las estructuras geológicas más antiguas del país (140 Ma); además, los valles de varios ríos y quebradas que desembocan en el océano, así como diversas planicies costeras y playas.

El ACG presenta una precipitación anual aproximada entre 900 y 2 400 mm, con una época seca que se extiende desde diciembre hasta abril (Villalobos *et al.*, 2000), con temperaturas, en el día, entre 26 y 38 °C y, durante la noche, de 16 y 23 °C. El área cuenta con todas las clases de bosque seco que se pueden encontrar en Mesoamérica, con una gran variedad de vegetación costera, riberas y bosques siempre verdes; sin embargo, algunos hábitats han sido transformados y destruidos por la tala, quema, siembra de pastos y actividades agrícolas (Janzen y Hallwachs, 2016).

2.2 Cartografía geomorfológica

Para la realización del mapa geomorfológico, fue necesario interpretar un modelo de elevación digital basado en curvas de nivel, fotografías aéreas CARTA del año 2005, a escala 1:25 000, y pendientes del área de estudio. Con respecto a la clasificación morfogenética y su leyenda, se usó el criterio de Simonov (1985); de esta manera, las formas quedaron concentradas en dos grupos genéticos: endógeno-modelado (cerro el Hacha, rampas volcánicas del complejo Orosí-Cacao, colinas tectónicas de Santa Elena) y exógeno (planicie costera). Por último, se edita y publica el mapa geomorfológico final, el cual va acompañado de una leyenda que contemple los colores según su génesis, dinámica, morfología, evolución y edad (Gustavsson *et al.*, 2006). La escala de salida, dada la extensión del ACG, es a 1:250 000.

2.3 Modelo de vulnerabilidad a incendios forestales

De acuerdo con Chuvieco *et al.* (2012), la evaluación de la vulnerabilidad es un componente que debe integrarse en los modelos de riesgo de incendios forestales y su principal objetivo es identificar dónde tendrá más efectos negativos un incendio forestal sobre valores sociales, económicos y ecológicos. El modelo utilizó como base el diagrama de vulnerabilidad diseñado por Chuvieco *et al.* (2012) y se adaptó para el área de estudio, contemplando las variables de los valores ecológicos y socioeconómicos, los cuales fueron validados con criterio experto por el personal del ACG (Figura 2). Este se desarrolló en tres etapas: en la primera, se elaboró la base de datos de las ocho variables (calidad visual, fragmentación, regeneración, infraestructura, biomasa, turismo, educación biológica e investigación); la segunda etapa consistió en la asignación de pesos acordes con una evaluación multicriterio realizada por expertos del área protegida, y, en la última etapa, se realizó el cruce de variables mediante la herramienta de calculadora ráster (proceso que se describe detalladamente en Vargas-Sanabria, 2016). Debido a la diversidad de datos de cada variable, el modelo se diseñó de forma cualitativa y los datos fueron caracterizados en rangos de vulnerabilidad alta, media y baja.

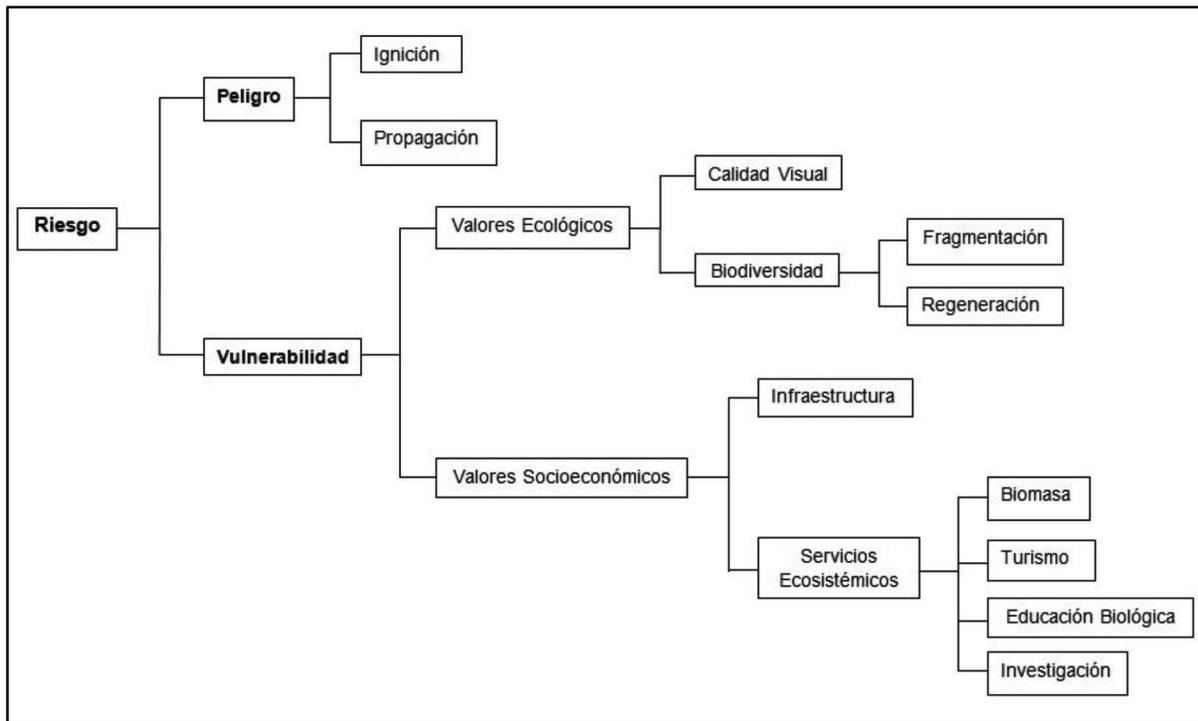


Figura 2. Diagrama de vulnerabilidad, adaptado de Chuvieco *et al.* (2012). Fuente: Vargas-Sanabria (2016).

2.4 Análisis bivariante: formas de relieve y el modelo de vulnerabilidad a incendios forestales

Para el análisis bivariante, se utilizó la herramienta *interseca* del programa ArcGis 10.3, la cual permite realizar relaciones geométricas de los datos geoespaciales. Posterior a esto, se realizó un análisis de los datos derivados del proceso anterior, para determinar la distribución en porcentaje, según las áreas con alta, media o baja vulnerabilidad sobre las formas de relieve.

3. Resultados

3.1 Mapa geomorfológico y sus morfologías

A partir de la cartografía geomorfológica a escala 1:25 000 de las formas de relieve más predominantes del ACG, se logró diferenciar una génesis tanto endógena modelada como exógena que dominan en el relieve de este sector de Costa Rica. Cabe mencionar que la conformación de las geoformas que componen este paisaje se presenta a partir de la interrelación entre una dinámica tectónica intensa y antigua, donde las rocas más antiguas del país hacen su aparición en la península de Santa Elena durante el periodo Jurásico, seguidas en el tiempo geológico por las rampas volcánicas del complejo Orosí-Cacao, con amplias superficies semiplanas, y el cerro El Hacha, el cual marca otra forma de relieve aparte de este piedemonte volcánico; por último,



se presentan las planicies costeras como una ínfima transición al mar. Todas estas morfologías (**Figura 3**) han sido fuertemente modeladas por los agentes exógenos, en especial, por la precipitación que ha promovido, a su vez, una intensa meteorización física y química, así como el desarrollo de suelos poco evolucionados debido a la juventud del material parental.

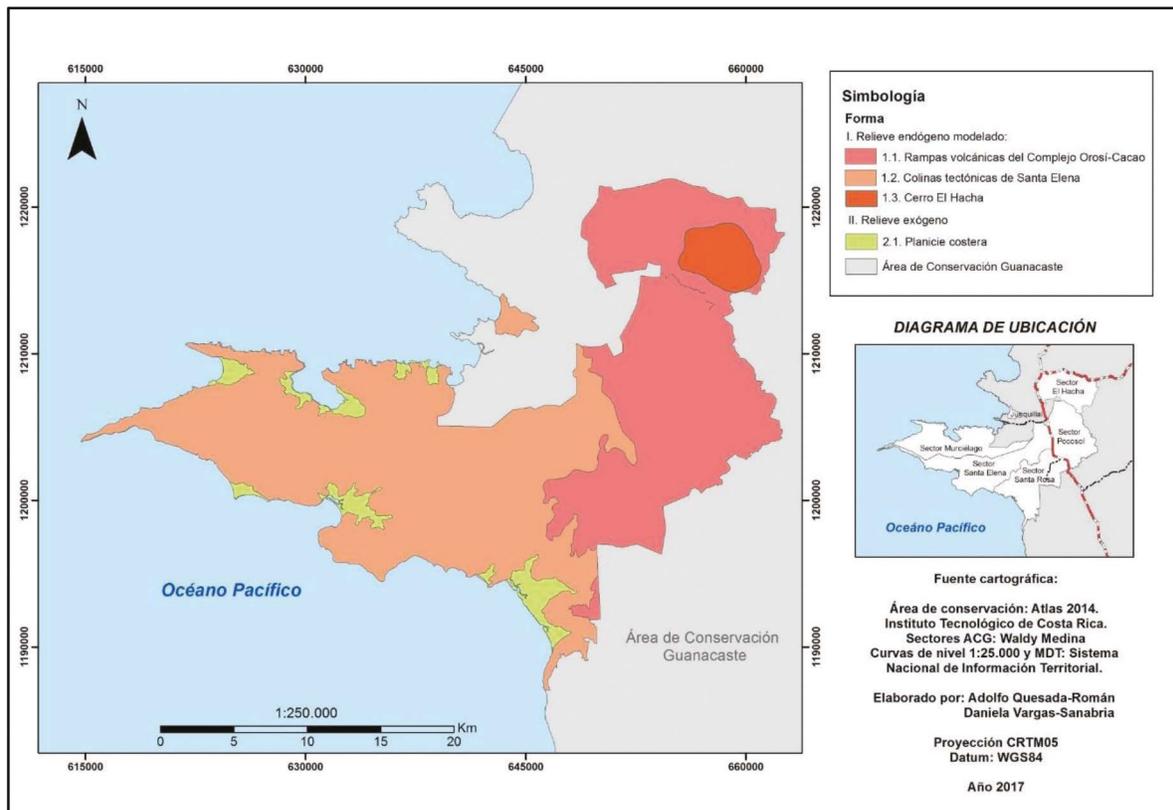


Figura 3. Mapa de formas de relieve del Área de Conservación Guanacaste

Las rampas volcánicas del complejo Orosí-Cacao son producto de la deposición de materiales piroclásticos asociados a erupciones de los volcanes Rincón de la Vieja y Orosí, con la presencia de flujos piroclásticos con productos litológicos cementados como las ignimbritas que han dado paso al relieve característico de la Meseta de Ignimbritas de Santa Rosa (MISR) del Mioceno Tardío al Plioceno (Denyer y Alvarado, 2007). Sus pendientes son menores a 5 grados, pero, dado que las condiciones climáticas de precipitaciones se encuentran por debajo de 2 000 mm anuales, dichas rampas no presentan amplias zonas de deposición aluvial, sino, más bien, la incisión de los afluentes de diversos ríos en los depósitos de ignimbritas. De acuerdo con Janzen y Hallwachs (2016), estas fueron las regiones más afectadas por la deforestación desde el periodo de la Colonia, debido a la facilidad de acceso y al desarrollo de actividades agropecuarias (**Figura 4**).



Las colinas tectónicas de Santa Elena están emplazadas en un *nappe* o manto de corrimiento, donde se ubican las litologías más antiguas del país, básicamente en peridotitas cortadas por diques máficos del Jurásico, morfologías que, a su vez, se sitúan en un sistema de fallas normales de este-oeste y noreste-suroeste, así como en una serie de fallas inversas de este-oeste (Denyer y Alvarado, 2007; Denyer y Gazel, 2009). Se componen de colinas alineadas de este-oeste, con elevaciones que llegan hasta los 500 m y pendientes incluso superiores a los 45° (Figura 4).

El cerro El Hacha es un antiguo cono volcánico erosionado, que se localiza en las cercanías del volcán Orosí, el cual presenta laderas empinadas dentro de un claro contexto de rampas volcánicas del complejo Orosí-Cacao con amplias superficies semiplanas (Figura 4). Alvarado (2011), lo describe como un relicto volcánico, ya sea un remanente de un cono volcánico, o bien cerro o edificio volcánico antiguo del Pleistoceno, en el cual los agentes erosivos han borrado las características de un cono volcánico.

La planicie costera se compone de secciones de pendientes planas o semiplanas asociadas a la deposición de sedimentos, producto de la erosión de las colinas tectónicas de Santa Elena por medio de distintos afluentes. Son áreas donde la influencia de las aguas freáticas puede incidir en la dinámica de humedad y por ello podrían estar menos afectadas por los incendios forestales.



Figura 4. (A) El cerro El Hacha y las rampas volcánicas del complejo Orosí-Cacao desde Ahogados con orientación norte. (B) Colinas tectónicas de Santa Elena desde Cuajuniquil con orientación suroeste. Fuente: Adolfo Quesada Román (julio de 2017).



3.2 Vulnerabilidad a incendios forestales

El modelo de vulnerabilidad muestra la distribución geoespacial de la integración de valores ecológicos y socioeconómicos que en un eventual incendio se verían potencialmente afectados. Las áreas con alta vulnerabilidad se encuentran en el sector Murciélago, parte oeste del sector Santa Rosa y algunas áreas del sector El Hacha. Las áreas con media vulnerabilidad se encuentran en el sector Pocosol y parte de RVS Junquillal; las áreas con baja vulnerabilidad se localizan en la zona central del sector Santa Elena y la norte del sector El Hacha (**Figura 5**).

De acuerdo con el modelo, los sectores con rango de vulnerabilidad alta representan áreas donde la presencia de incendios forestales es poca o nula. Estas áreas por lo general tienen ecosistemas poco fragmentados y están muy homogenizados, se encuentran estados sucesionales avanzados (bosque de galería, intermedios y tardíos), hay más contenido de biomasa aérea y mayor cantidad de infraestructura, debido a varias actividades desarrolladas como turismo, investigación y programas de educación biológica. Por otro lado, los sectores con rangos de media y baja vulnerabilidad presentan más incidencia de incendios forestales, con mayor presencia de coberturas que poseen sucesiones menos avanzadas como pastos, sabanas y bosques tempranos (Vargas-Sanabria, 2016).

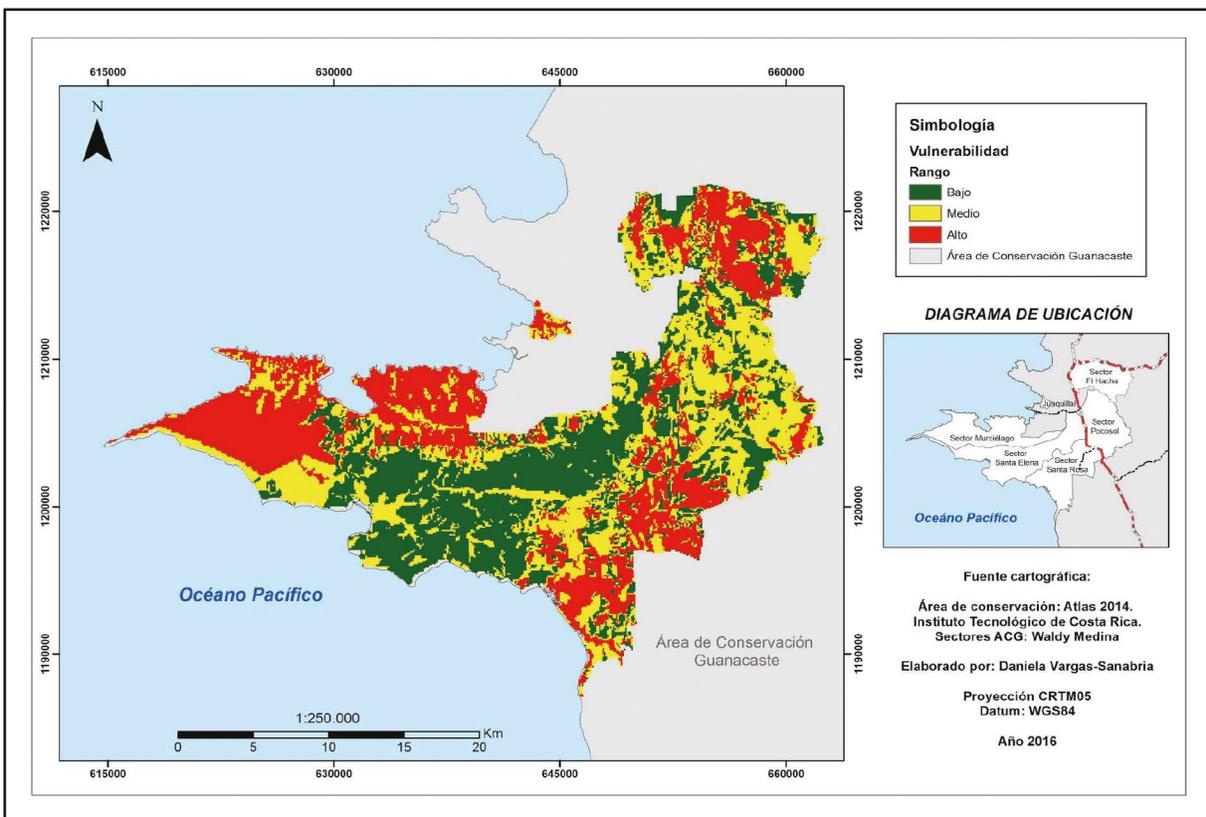


Figura 5. Mapa de vulnerabilidad a incendios forestales. Fuente: Vargas-Sanabria (2016).



3.3 Geomorfología y vulnerabilidad a incendios forestales en el Área de Conservación Guanacaste

De acuerdo con el análisis cruzado entre la geomorfología y la vulnerabilidad a incendios forestales, se halló que las áreas cuya vulnerabilidad es alta se relacionan con las formas de relieve del cerro El Hacha y las colinas tectónicas de Santa Elena en el sector de Murciélago. El sector RVS Junquillal, asociado a formas de relieve de colinas tectónicas de Santa Elena, presenta rangos de vulnerabilidad alta y media. Así mismo, el sector Santa Rosa, el cual está vinculado con tres formas de relieve —planicie costera, rampas volcánicas del complejo Orosí-Cacao y colinas tectónicas de Santa Elena—, muestra rangos de vulnerabilidad alta y media. En el sector de Pocosal, se encuentran formas de relieve correspondientes a rampas volcánicas del complejo de Orosí-Cacao y se asocian a rangos de vulnerabilidad media y baja. Por último, el área norte y central del sector Santa Elena presenta rangos de vulnerabilidad media y baja, asociados a colinas tectónicas (Figura 6).

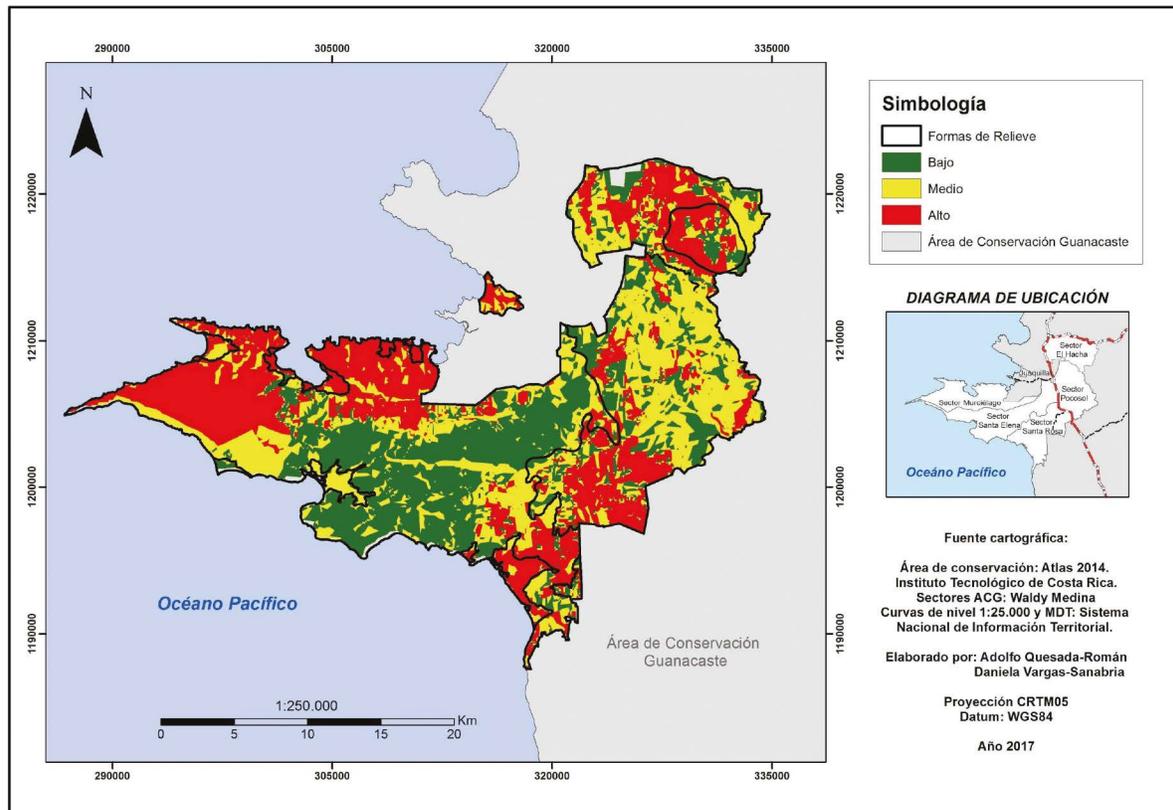


Figura 6. Mapa de intersección de datos de vulnerabilidad y formas de relieve



Los porcentajes de atino entre las formas de relieve y los rangos de vulnerabilidad (**Cuadro 1**) indican un patrón variado a partir de la morfología y el comportamiento de las laderas. En el sector oeste del cerro El Hacha, la porción suroeste de las rampas volcánicas del complejo Orosí-Cacao, así como el extremo noroeste de las colinas tectónicas de Santa Elena, es donde se presentan los valores más altos de vulnerabilidad a incendios forestales; en ellos la orientación predominante de las laderas hacia el norte, noroeste y oeste. Los valores bajos y medios tienen una alta representación en las rampas volcánicas del complejo Orosí-Cacao, dadas sus pendientes menores a 5°, donde funcionan como una transición para la aceleración de los vientos, una vez que logran superar la Cordillera Volcánica de Guanacaste. El caso de las planicies costeras se asocia con lugares donde la vulnerabilidad a incendios forestales tiende a ser baja o media, lo que depende de la ubicación del nivel freático a lo largo del año y de la intensidad de las sequías.

Cuadro 1. Análisis bivariado entre formas de relieve y rangos de vulnerabilidad a incendios forestales

Forma	Rango de vulnerabilidad (%)		
	Bajo	Medio	Alta
Cerro El Hacha	32	56	11
Colinas tectónicas de Santa Elena	24	61	16
Planicie costera	32	52	16
Rampas volcánicas del complejo Orosí-Cacao	38	46	17

4. Discusión

A escala regional, los suelos dominantes son entisoles, los cuales por lo general tienen perfiles de poca profundidad, de carácter ácido por las rocas ignimbríticas que los conforman, y de baja meteorización geoquímica que limita el crecimiento de la vegetación. Además, se presentan en relieves planos, ligeramente ondulados y predominantemente ondulados (Leiva *et al.*, 2009). Por tanto, el desarrollo del bosque seco en el ACG queda limitado a suelos pobres, donde existen condicionantes para el desarrollo de vegetación, como poca profundidad de suelos, alta acidez y baja meteorización con zonas donde el material parental y el proceso de pedogénesis es incipiente.

El hecho de que esta región sea la más afectada por incendios forestales en Costa Rica se explica a partir de su baja precipitación (~1 800 mm anuales), concentrada en pocos meses del año, una estación seca de aproximadamente cinco meses y temperaturas medias mensuales de 28 °C, lo que condiciona el desarrollo del bosque seco tropical por la recurrencia de inundaciones, alta escorrentía y poca infiltración del agua en los suelos, después de eventos de lluvias fuertes seguidos por extensas e intensas sequías (Solano y Villalobos, 2001). Además, el patrón de vientos y la dirección dominante hacia el noroeste en esta zona del país se explica con base en la dirección preferente y mayoritaria, durante el año, de los vientos alisios al entrar a Costa Rica (Solano y Villalobos, 2001). Asimismo, es consecuente con el efecto de Foehn, donde el aire húmedo procedente del Mar Caribe, al superar el eje montañoso del país, se vuelve más seco por un forzamiento topográfico, condicionante, a su vez, para el desarrollo de un clima tropical seco reflejado en la vegetación de esta área y la recurrencia del fenómeno de El Niño



(Alvarado y Fernández, 2001). Esta condición geográfica favorece que algunas zonas particulares como el sector oeste del cerro El Hacha, la porción suroeste de las rampas volcánicas del complejo Orosí-Cacao y el extremo noroeste de las colinas tectónicas de Santa Elena sean las que presentan los valores más altos de vulnerabilidad por la poca recurrencia de incendios forestales y el alto contenido de valores socioeconómicos y ecológicos.

En sectores del ACG donde la vulnerabilidad a incendios forestales es alta es recurrente que la orientación de las laderas sea hacia el norte y el este o, en su defecto, hacia zonas planas de la bajura. En un estudio específico sobre la dinámica atmosférica y oceánica del ACG, se encontró que, cuando el viento sopla fuerte sobre este territorio, las corrientes marinas son intensas al frente de la península de Nicoya (Lizano y Alfaro, 2014); estas condiciones locales, aunadas a la corriente Costera y el Domo Térmico de Costa Rica, podrían ser factores para que esta región del país tenga una mayor incidencia de incendios forestales en los periodos secos anuales o multidecadales asociados al fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENOS).

Los años Niño han presentado mayor número de incendios forestales con respecto al promedio, aunque la génesis de estos incendios no obedece enteramente a factores climáticos. Las condiciones especialmente secas durante los años de El Niño en el pacífico norte de Costa Rica pueden contribuir con una fácil dispersión del fuego (Villalobos *et al.*, 2000). Por tanto, el choque del viento contra dichas laderas o planicies a lo largo de los periodos secos, y aun con mayor peso durante periodos Niño, favorece que dichas vertientes se mantengan más secas y la incidencia de incendios forestales sea mayor, afectando de forma directa las áreas con la orientación de sus laderas hacia el norte y el este, así como planicies.

Además de las variaciones del clima que se han venido suscitando en el último siglo a escala global, se debe agregar que se ha empezado a presentar un cambio en los microclimas. Esto puede secar el sotobosque y las capas de tierra y, a su vez, alterar las características del combustible, aumentar la prevalencia de puntos de ignición, como caminos construidos para facilitar la extracción de madera, y afectar los patrones de cubierta del paisaje, así como la yuxtaposición espacial de diferentes tipos de bosques que pueden, simultáneamente, influir en la propagación de incendios forestales a través de distintos tipos de paisajes (Lindenmayer, 2010).

A pesar de que las especies comunes del bosque seco son tolerantes al fuego (Otterstrom *et al.*, 2006), el hecho de que este ecosistema está dominado por árboles caducifolios, semicaducifolios y perennes que soportan anualmente seis meses secos, provoca que su producción de hojarasca sea muy alta y supone otro de los factores de riesgo de incendios forestales (Jiménez *et al.*, 2016). Esto se ha venido observando en Costa Rica en las últimas décadas, donde las zonas de vida se han modificado, y los rangos altitudinales, donde las especies aparecen, son cada vez más superiores en altitud, debido al aumento de las temperaturas medias a escala local y global (Feeley *et al.*, 2013).

Las relaciones más plausibles entre la geomorfología y la vulnerabilidad a incendios forestales se deben a que la cubierta vegetal responderá a los cambios de temperatura y precipitación, así como a la frecuencia del fuego, con las transformaciones en la producción de sedimentos, y al desarrollo de los procesos de erosión (Goudie, 2006). Al presentarse mayores áreas afectadas por los fuegos durante los periodos secos, en la época de lluvias se da un franco aumento en la escorrentía



superficial y la erosión, que modificará los cauces fluviales y, posiblemente, tenga mayores incidencias en las inundaciones por la suma de sedimentos en las llanuras de inundación.

En otras latitudes, se ha observado que, posterior a la ocurrencia de incendios forestales, se da un incremento en la incidencia de procesos erosivos como escorrentía, arroyada, avenidas torrenciales y flujos de lodo (Bendix y Cowell, 2010; Eaton *et al.*, 2010; Moody *et al.*, 2008; Nyman *et al.*, 2011; Langhans *et al.*, 2017; Stoffel y Wilford, 2012). Por tanto, en las zonas tropicales el suelo desnudo es más susceptible al desarrollo de escorrentía superficial, de procesos de arroyada que incluso podrían estar relacionados con inundaciones súbitas y flujos de lodo, cuando empieza la época de lluvias por la alta cantidad de sedimentos y restos vegetales disponibles en el sistema fluvial. Así, las interrelaciones entre los incendios forestales y las formas de relieve tienen múltiples aristas y conexiones con diferentes tipos de procesos hidrogeomórficos.

5. Conclusiones

Se determinaron cuatro formas de relieve para el ACG: cerro El Hacha, rampas volcánicas del complejo Orosí-Cacao, colinas tectónicas de Santa Elena y planicie costera, todas ellas con una dinámica geomorfológica determinada por el origen del material parental, en su mayoría volcánico, desde el periodo Jurásico hasta el Cuaternario, controladas por la tectónica regional y local, modeladas por la acción exógena de la precipitación y los cambios en el uso de la tierra; y con morfologías que varían desde las superficies planas o semiplanas hasta las laderas con pendientes superiores a los 45°.

El modelo de vulnerabilidad representa, de forma geoespacial, la situación del fuego sobre los valores socioeconómicos y ecológicos dentro del área de estudio, permitiendo identificar principales zonas para la implementación de estrategias de control y protección, a través de planes de gestión de riesgo ante incendios forestales. El modelo evalúa las condiciones de vulnerabilidad mediante variables que fueron validadas con criterio experto y adaptadas para el ecosistema de bosque seco.

El análisis bivariante confirmó la relación que existe entre el tipo de morfología y el grado de vulnerabilidad que presentan diferentes sectores del ACG. Resaltan la localización, orientación y composición de las laderas, que a su vez favorecen procesos como los de colonización, así como la densidad boscosa y la aceleración de la velocidad de los vientos alisios provenientes del mar Caribe, aumentando así el efecto Foehn y la temperatura del aire. Además, los suelos poco desarrollados en este territorio (entisoles), aunados a la baja precipitación anual (< 2 000 mm) y a una estacionalidad seca prolongada (6 meses), generan las condiciones idóneas para la aparición de bosques secos, con alta producción de biomasa, la cual puede ser un medio para la ignición de incendios forestales.

Este estudio es pionero en la determinación de relaciones causales y dinámicas entre las formas del relieve, sus procesos y la vulnerabilidad de incendios forestales en una de las áreas más afectadas por esta amenaza en Costa Rica. Se pretende abrir una línea de investigación aún mayor en el país y la región centroamericana, debido a que los efectos del cambio climático podrían acentuar estos fenómenos que causan un grave impacto en los ecosistemas de bosque seco y la emisión de gases de efecto invernadero.



6. Referencias

- Alvarado, L. y Fernández, W. (2001). Relación de las anomalías climáticas de la atmósfera libre sobre Costa Rica y la variabilidad de las precipitaciones durante eventos de El Niño. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 8(2), 145-157.
- Alvarado, G. (2011). *Los volcanes de Costa Rica: geología, historia, riqueza natural y su gente*. San José, Costa Rica: EUNED.
- Bendix, J. y Cowell, C. M. (2010). Fire, floods and woody debris: Interactions between biotic and geomorphic processes. *Geomorphology*, 116(3-4), 297-304. Doi: [10.1016/j.geomorph.2009.09.043](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.043)
- Chuvieco, E., Aguado, I., Jurdao, S., Pettinari, M. L., Yebra, M., Salas, J., Hantson, S., de la Riva, J., Ibarra, P., Rodrigues, M., Echeverría, M., Azqueta, D., Román, M. V., Bastarrika, A., Martínez, S., Recondo, C., Zapico, E. y Martínez-Vega, F. J. (2012). Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International Journal of Wildfires*, 23, 606-619.
- Cochrane, M. A. (2009). *Tropical Fire Ecology. Climate change, Land use and Ecosystem dynamic*. Chichester, United Kingdom: Praxis Publishing Ltd. Doi: [10.1007/978-3-540-77381-8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77381-8)
- Denyer, P. y Alvarado G. E. (2007). Mapa geológico de Costa Rica. San José, Costa Rica: Librería Francesa. Escala 1:400 000.
- Denyer, P. y Gazel, E. (2009). The Costa Rican Jurassic to Miocene oceanic complexes: Origin, tectonics and relations. *Journal of South American Earth Sciences*, 28(4), 429-442. Doi: [10.1016/j.jsames.2009.04.010](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.04.010)
- Eaton, B. C., Andrews, C. A. E., Giles, T. R. y Phillips, J. C. (2010). Wildfire, morphologic change and bed material transport at Fishtrap Creek, British Columbia. *Geomorphology*, 118(3-4), 409-424. Doi: [10.1016/j.geomorph.2010.02.008](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.008)
- Feeley, K. J., Hurtado, J., Saatchi, S., Silman, M. R. y Clark, D. B. (2013). Compositional shifts in Costa Rican forests due to climate-driven species migrations. *Global Change Biology*, 19(11), 3472-3480. Doi: [10.1111/gcb.12300](https://doi.org/10.1111/gcb.12300)
- Flannigan, M. D., Krawchuk, M. A., De Groot, W. J., Wotton, B. M. y Gowman, L. M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, 18(5), 483-507. Doi: [10.1071/WF08187](https://doi.org/10.1071/WF08187)
- Goudie, A. S. (2006). Global warming and fluvial geomorphology. *Geomorphology*, 79(3-4), 384-394. Doi: [10.1016/j.geomorph.2006.06.023](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.023)
- Gustavsson, M., Kolstrup, E. y Seijmonsbergen, A. C. (2006). A new symbol-and-GIS based detailed geomorphological mapping system: Renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. *Geomorphology*, 77, 90-111. Doi: [10.1016/j.geomorph.2006.01.026](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.026)



- Hidalgo, H. G., Amador, J. A., Alfaro, E. J. y Quesada, B. (2013). Hydrological climate change projections for Central America. *Journal of Hydrology*, 495, 94-112. Doi: [10.1016/j.jhydrol.2013.05.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.004)
- Janzen, D. H. y Hallwachs, W. (2016). Biodiversity conservation history and future in Costa Rica: The Case of Área de Conservación Guanacaste (ACG). En M. Kappelle (Ed.), *Costa Rican Ecosystems (290-341)*. The University of Chicago Press, Chicago, Ill. DOI: [10.7208/chicago/9780226121642.001.0001](https://doi.org/10.7208/chicago/9780226121642.001.0001)
- Jiménez, Q., Carrillo, E., Kappelle, M. (2016). The northern pacific lowland seasonal dry forests of Nicoya Peninsula. En M. Kappelle (Ed.), *Costa Rican Ecosystems (247-289)*. The University of Chicago Press, Chicago, Ill. DOI: [10.7208/chicago/9780226121642.001.0001](https://doi.org/10.7208/chicago/9780226121642.001.0001)
- Langhans, C., Nyman, P., Noske, P. J., Van der Sant, R. E., Lane, P. N. J. y Sheridan, G. J. (2017). Post-fire hillslope debris flows: Evidence of a distinct erosion process. *Geomorphology*, 295, 55-75. Doi: [10.1016/j.geomorph.2017.06.008](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.06.008)
- Leiva, J., Mata, R., Rocha, O. y Gutiérrez, M. (2009). Cronología de la regeneración del bosque tropical seco en Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica. I. Características Edáficas. *Revista Biología Tropical*, 57(3), 801-815.
- Lindenmayer, D. B. (2010). Landscape change and the science of biodiversity conservation in tropical forests: A view from the temperate world. *Biological Conservation*, 143(10), 2405-2411. Doi: [10.1016/j.biocon.2009.12.015](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.12.015)
- Lizano, O. G. y Alfaro, E. J. (2014). Dinámica atmosférica y oceánica en algunos sitios del Área de Conservación Guanacaste (ACG), Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 62, 17-31. Doi: [10.15517/rbt.v62i4.20018](https://doi.org/10.15517/rbt.v62i4.20018)
- Moody, J. A., Martin, D. A. y Cannon, S. H. (2008). Post-wildfire erosion response in two geologic terrains in the western USA. *Geomorphology*, 95(3-4), 103-118. Doi: [10.1016/j.geomorph.2007.05.011](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.05.011)
- Moraga, J. C. (2010). Evaluación del riesgo ante incendios forestales en la cuenca del Río Tempisque, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 45, 33-64.
- Nyman, P., Sheridan, G. J., Smith, H. G. y Lane, P. N. J. (2011). Evidence of debris flow occurrence after wildfire in upland catchments of south-east Australia. *Geomorphology*, 125(3), 383-401. Doi: [10.1016/j.geomorph.2010.10.016](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.016)
- Otterstrom, S. M., Schwartz, M. W. y Velazquez-Rocha, I. (2006). Responses to Fire in Selected Tropical Dry Forest Trees. *Biotropica*, 38(5), 592-598. Doi: [10.1111/j.1744-7429.2006.00188.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2006.00188.x)
- Simonov, Y. (1985). *Análisis morfométrico*. Lomonosov. Moscú, URSS: Universidad Estatal de Moscú.



- Solano, J. y Villalobos, R. (2001). Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización geográfico climático de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 8(1), 26-39.
- Stoffel, M. y Wilford, D. J. (2012). Hydrogeomorphic processes and vegetation: Disturbance, process histories, dependencies and interactions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(1), 9-22. Doi: [10.1002/esp.2163](https://doi.org/10.1002/esp.2163)
- Vargas-Sanabria, D. (2016). *Dinámica del paisaje en áreas afectadas por incendios forestales en el bosque tropical seco del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica* (tesis de licenciatura). Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica.
- Vega Araya, M. (2005). *Modelo de riesgo potencial para la prevención y control de los incendios forestales para la Estación Experimental Forestal Horizontes, Guanacaste, Costa Rica* (tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Heredia, Costa Rica.
- Verstappen, H. T.H. (1983). *Applied geomorphology: geomorphological surveys for environmental development*. Elsevier Science Ltd., Amsterdam, Netherlands.
- Villalobos, R., Retana, J.A. y Acuña, A. (2000). El Niño y los incendios forestales en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 7(1), 1-20.