

UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA

VICERRECTORÍA ACADÉMICA

ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA MANEJO DE RECURSOS NATURALES

Dinámica del paisaje en áreas afectadas por incendios forestales en el bosque tropical seco del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica.

Tesis de grado sometida a la consideración del Tribunal Examinador del Programa de Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales

Daniela Vargas Sanabria

San José, Costa Rica

Julio, 2016

UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA

VICERRECTORÍA ACADÉMICA

ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA MANEJO DE RECURSOS NATURALES

Dinámica del paisaje en áreas afectadas por incendios forestales en el bosque tropical seco del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica.

Tesis de grado sometida a la consideración del Tribunal Examinador del Programa de Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales

Director de Tesis: Carlos Andrés Campos Vargas. Ing

Estudiante:

Daniela Vargas Sanabria

San José, Costa Rica

Julio, 2016

TRIBUNAL EXAMINADOR

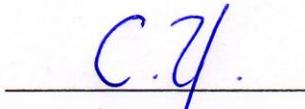
Este proyecto de Graduación ha sido aceptado y aprobado en su forma presente por el Tribunal Examinador del Programa de Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Estatal a Distancia, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales.



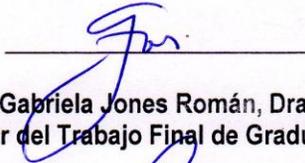
Luis Eduardo Montero Castro, M.Sc.
Director de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales.



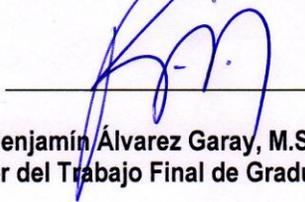
Héctor Brenes Soto, M.Sc.
Encargado del Programa de Manejo de los Recursos Naturales.



Carlos Andrés Campos Vargas, Ing.
Director de Tesis



Gabriela Jones Román, Dra.
Lector del Trabajo Final de Graduación



Benjamín Álvarez Garay, M.Sc.
Lector del Trabajo Final de Graduación

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	IX
AGRADECIMIENTOS.....	XI
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivos Específicos.....	5
2. Enfoque de la Investigación.....	6
2.1. Tipo de estudio.....	6
2.2. Fuentes de información.....	6
2.3. Variables de la Investigación.....	7
3. Marco Teórico.....	8
3.1. Cobertura de la Tierra.....	8
3.2. Incendios Forestales.....	9
3.2.1. Incendios Forestales en Costa Rica.....	10
3.3. Evaluación de Riesgo, Peligro y Vulnerabilidad ante Incendios Forestales.....	11
3.3.1. Valores Ecológicos:.....	12
3.3.2. Valores Socioeconómicos:.....	13
3.4. Sistemas de Información Geográfica en Incendios Forestales.....	13
3.5. Teledetección.....	14
3.5.1. Radiación Electromagnética.....	15
3.5.2. Espectro Electromagnético.....	16

3.5.3.	Interacción de la energía electromagnética con la atmósfera	17
3.5.4.	Tipos de sensores remotos.....	17
3.5.5.	Corrección Atmosférica	18
3.5.6.	Resolución de un sensor	18
3.6.	Imágenes Satelitales	19
3.6.1.	Imagen Satelital Multiespectral	19
3.7.	LANDSAT.....	20
3.7.1.	Tipos de sensores LANDSAT	21
4.	Marco Metodológico	22
4.1.	Descripción del área de estudio.....	22
4.2.	Población Muestra	24
4.3.	Recolección de Datos.....	24
4.4.	Procedimiento.....	29
4.4.1.	Delimitación de coberturas	29
4.4.2.	Dinámica de Incendios Forestales.....	37
4.4.3.	Modelo de Vulnerabilidad	40
5.	Resultados.....	55
5.1.	Delimitación de coberturas	55
5.2.	Dinámica de los Incendios Forestales.....	59
5.3.	Modelo de Vulnerabilidad de Incendios Forestales.....	62
6.	Discusión.....	72
6.1.	Delimitación de coberturas	72
6.2.	Análisis de la dinámica de los incendios forestales.....	75
6.3.	Evaluación del estado de vulnerabilidad ante incendios forestales.....	77
7.	Conclusiones y Recomendaciones	82
7.1.	Conclusiones	82

7.2. Recomendaciones	83
8. Referencias Bibliográficas	84
9. Anexos	93

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variables de la Investigación	7
Cuadro 2. Características de los Sensores LANDSAT.....	21
Cuadro 3. Coordenadas geográficas y hectáreas de los sectores de estudio del Área de Conservación Guanacaste.....	22
Cuadro 4. Set de Reglas para la caracterización de tipos de coberturas de la tierra para el trabajo de campo.....	25
Cuadro 5. Descripción de los parámetros utilizados para la corrección atmosférica de la imagen satelital.....	31
Cuadro 6. Métricas de paisaje	39
Cuadro 7. Secuencia temporal de la regeneración de hábitats adaptado de Guariguata y Ostertag (2001).....	45
Cuadro 8. Rango de vulnerabilidad en áreas fragmentadas para los sectores de estudio del ACG.....	47
Cuadro 9. Rango de vulnerabilidad para las edificaciones en los sectores de estudio del ACG.....	47
Cuadro 10. Biomasa aérea en categorías de cobertura de la tierra para los sectores de estudio del ACG.....	49
Cuadro 11. Rango de vulnerabilidad para valores de biomasa en los sectores de estudio del ACG.....	49
Cuadro 12. Número de turistas por sector en el año 2013 en el ACG.....	49
Cuadro 13. Rango de vulnerabilidad de acuerdo a la cantidad de visitantes por sector en el ACG.....	50
Cuadro 14. Número de investigaciones por sector dentro del ACG.	50
Cuadro 15. Rango de valores de vulnerabilidad de acuerdo a la cantidad de investigaciones en los sectores de estudio del ACG.....	50
Cuadro 16. Número de estudiantes por sector de estudio del Programa de Educación Biológica del ACG, 2015.....	51
Cuadro 17. Rango de vulnerabilidad basada en la cantidad de estudiantes del Programa Educación Biológica.....	51
Cuadro 18. Resumen de las asignaciones de valores mediante criterio experto.....	52

Cuadro 19. Matriz de error de algoritmos de clasificación supervisada	55
Cuadro 20. Cantidad de hectáreas y porcentaje por tipo de cobertura en el área de estudio, 2015.	58
Cuadro 21. Cantidad de hectáreas quemadas por sector de 1997 al 2015.....	60

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de modelo de evaluación de riesgo de incendios forestales.....	11
Figura 2. Componentes de la teledetección	14
Figura 3. Esquema de onda electromagnética	15
Figura 4. Diagrama del espectro electromagnético	17
Figura 5. Mapa de sectores de estudio en el Área de Conservación Guanacaste.....	23
Figura 6. Diagrama de la metodología para trabajo en campo.....	24
Figura 8. Metodología de trabajo empleada para la delimitación de las coberturas de la tierra.	29
Figura 9. A) Clasificación supervisada Maximum Likelihood , B) Clasificación supervisada Neural Network.....	35
Figura 10. Ejemplo de composición de árboles de decisión para cada categoría, A) categoría de sabana-pasto y B) categoría de bosque temprano.	35
Figura 11. Estructura del árbol de decisión final.....	36
Figura 12. Metodología de trabajo empleada para el análisis de las zonas recurrentemente quemadas.....	37
Figura 13. Gráfico de distribución de datos de recurrencia de incendios forestales	38
Figura 14. Metodología empleada para la elaboración del modelo de vulnerabilidad.....	41
Figura 15. Diagrama de vulnerabilidad	42
Figura 16. Mapa de levantamiento de campo para el análisis de la calidad visual	44
Figura 17. Categorización de las clases de bosque / no bosque y diseño de cuadrícula .	46
Figura 18. Diagrama jerárquico de pasos para obtener el mapa final de vulnerabilidad...	54
Figura 19. Mapa de cobertura de la tierra 2015 para los sectores de estudio Santa Rosa, Santa Elena, Murciélago, Junquillal, Pocosol y El Hacha.....	57

Figura 20. Mapa de recurrencia de incendios del área de estudio entre el periodo 1997-2015	61
Figura 21. Mapa del nivel de vulnerabilidad en la calidad visual del sitio de estudio	63
Figura 22. Mapa del nivel de vulnerabilidad en áreas fragmentadas en los sectores de estudio del ACG.....	64
Figura 23. Mapa del nivel de vulnerabilidad en la regeneración de especies ante incendios forestales en el área de estudio	65
Figura 26. Mapa del nivel de vulnerabilidad ante incendios forestales en áreas de afluencia turística en los sectores de estudio del ACG.....	68
Figura 28. Mapa del nivel de vulnerabilidad según el desarrollo de actividades de Educación Biológica dentro del ACG.	70
Figura 29. Mapa final de áreas vulnerables ante incendios forestales en los sectores de estudio del Área de Conservación Guanacaste.	71

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Tabla de registro de datos de campo	93
Anexo 2. Encuesta.....	94
Anexo 3. Fotografía de Cerro Santa Elena	95

ACRÓNIMOS

ACG: Área de Conservación Guanacaste

BTS: Bosque Tropical Seco

BTSM: Bosque Tropical de Mesoamérica

CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

CONAFOR: Comisión Nacional Forestal

CONIFOR: Comisión Nacional sobre Incendios Forestales

CTRM05: Costa Rica Transversal Mercator 05

ECM: Evaluación Multicriterio

FAO: Food and Agriculture Organization of United Nations

FLAASH: Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes

GPS: Sistema de Posicionamiento Global

MISR: Meseta de Ignimbritas de Santa Rosa

NASA: National Aeronautics and Space Administration

ND: Niveles Digitales

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

ROIS: Region of Interest

SIG: Sistema de Información Geográfica

SINAC: Sistema Nacional de Áreas de Conservación

DEDICATORIA

A mi madre Alicia, por todo su apoyo incondicional durante toda mi formación académica.

A los bomberos forestales por su gran dedicación en la protección de los recursos naturales, ¡Gracias por su labor!

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos, por todo el apoyo y cariño que me han dado a lo largo de todo este proceso.

A mi tutor, Ing. Carlos Andrés Campos, estoy infinitamente agradecida por el tiempo y dedicación en este proceso, por toda la paciencia y sobre todo por todos los consejos que hicieron mejorar esta investigación.

A mi lectora, Dra. Gabriela Jones Román y al proyecto que coordina PROY0041-2014 “*Análisis de aspectos históricos, biológicos y ecológicos en áreas impactadas recurrentemente por incendios forestales en el bosque seco tropical*”, por sus valiosos aportes a esta investigación y su gran apoyo durante este largo proceso.

A M.Sc. Benjamín Álvarez, gracias por tu ayuda incondicional, motivación y sobre todo por confiar en mí y en esta investigación.

Al Laboratorio de Investigación e Innovación Tecnológica (LIIT), por todo el apoyo recibido y constante motivación en esta investigación.

Al Área de Conservación Guanacaste, en especial a Don Róger Blanco por toda la información suministrada y su ayuda en la validación de datos.

Al Programa de Manejo del Fuego del ACG, por su colaboración y disponibilidad para la realización del trabajo de campo, a don Julio Díaz por sus valiosos comentarios y a Didi Guadamuz Eras, por compartir la base de datos de polígonos de incendios forestales.

Al Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT-CONARE), por el apoyo financiero recibido para este proyecto; y al Laboratorio PRIAS por brindarme un espacio físico para el desarrollo de esta investigación.

A la Sra. Ligia Bermúdez, por toda su colaboración en el análisis estadístico de los datos.

A PRORED por el apoyo económico brindado para el trabajo de campo.

A la Comisión de Movilidad Internacional Estudiantil de la UNED por otorgarme la oportunidad de la pasantía a España y agradezco de manera especial a Maynor Barrientos (PORIFED) y Ana Ruth Chinchilla (PRORED), por impulsarme y ayudarme en este proceso.

Al Dr. Emilio Chuvieco Salinero y al grupo de Teledetección Ambiental de la Universidad de Alcalá, España; por abrirme las puertas de su laboratorio y por toda la ayuda, consejos y contribuciones en esta investigación.

A todas las personas que de una u otra manera han estado vinculadas en esta investigación. Gracias por el apoyo recibido y la confianza depositada en mí.

Daniela

RESUMEN

El bosque tropical seco en el pacífico norte de Costa Rica, es un ecosistema que ha sido afectado por incendios forestales, generando cambios en la dinámica del paisaje. El estudio pretende mediante el uso de tecnologías como teledetección y sistemas de información geográfica analizar la dinámica de los incendios forestales y la afectación sobre el paisaje y con esto, determinar la vulnerabilidad del riesgo a incendios forestales en seis sectores del *Área de Conservación Guanacaste*, Costa Rica. Se recolectaron puntos de campo con equipo GPS y se caracterizaron los tipos de cobertura en el área de estudio; mediante la utilización de imágenes satelitales LANDSAT se realizó una clasificación supervisada para determinar los tipos de cobertura de la tierra para el año 2015. Se analizó la dinámica de afectación y la recurrencia de los incendios forestales mediante la utilización de polígonos de área quemada de los años 1997 al 2015, así mismo se realizó un análisis estadístico utilizando el coeficiente de correlación de Pearson para determinar si existía correlación entre el número de incendios, métricas del paisaje, la cobertura de la tierra, tipos de suelo y el grado de la pendiente. Por último se diseñó un modelo de vulnerabilidad a incendios forestales de acuerdo a variables ecológicas y socioeconómicas del área de estudio. Se identificaron 10 categorías de cobertura de la tierra, siendo el bosque intermedio el de mayor predominancia en el área. Los sectores con mayor área quemada son Murciélagos, Pocosol, El Hacha y Santa Elena. Se encontró correlación negativa con el índice medio de forma (Pearson, $r=-.093, n=754, p=.010$), correlación negativa con los bosques secundarios (Pearson, $r=-.096, n=754, p=.008$) y bosques tempranos (Pearson, $r=-.090, n=754, p=.014$) y por último correlación negativa con suelos de tipos entisoles (Pearson, $r=-.083, n=754, p=.023$) e inceptisoles (Pearson, $r=-.090, n=754, p=.014$). Se identificó que los sectores más vulnerables son Murciélagos, Santa Rosa y algunas partes del sector el Hacha. Se concluye que existe una dominancia en el área de estudio de tres coberturas: bosque intermedio, sabana-pasto y bosque temprano, así mismo, la dinámica de afectación y reincidencia afecta las coberturas de sabana-pasto y bosque temprano localizadas en las zonas limítrofes del área de estudio. Por último, el diseño del modelo de vulnerabilidad constituye una herramienta geoespacial para la toma de decisiones de la situación del fuego sobre los valores socioeconómicos y ecológicos.

ABSTRACT

The tropical dry forest in the North-Pacific area of Costa Rica is an ecosystem that has been affected by wildfires, generating significant changes in landscape dynamics. Through the usage of new remote sensing technologies and geographical information systems, this research intends to analyze the dynamics of wildfires and their affectation on the landscape in order to determine a wildfire risk vulnerability model in six selected study locations in the *Área de Conservación Guanacaste*, Costa Rica. Field points were collected with GPS equipment and cover types were characterized in the study area. Using LANDSAT satellite images, the types of land cover in the location of study for 2015 were determined by supervised classification. The dynamics of affectation and the recurrence of wildfires were analyzed burned area polygons of 1997 to 2015. Moreover, a statistical analysis was made using the Pearson coefficient to determine the correlation between the amount of fires, landscape metrics, land cover, types of soil and slope angle. . Finally, a wildfire risk vulnerability model was designed according to ecological and socioeconomic variables of the study site. Ten land cover categories were identified, with intermediate forest being the most predominant in the area and it was possible to identify the locations with more burned territory: Murciélago, Pocosal, El Hacha and Santa Elena. The results showed a negative correlation against the mean shape index (Pearson, $r=-.093, n=754, p=.010$), negative correlation between intermediate forests (Pearson, $r=-.096, n=754, p=.008$) and early forests (Pearson, $r=-.090, n=754, p=.014$). Finally, negative correlation between entisols (Pearson, $r=-.083, n=754, p=.023$) and inceptisol (Pearson, $r=-.090, n=754, p=.014$) soils. It was determined that the most vulnerable locations are Murciélago, Santa Rosa and some parts of El Hacha sector. It is concluded that there is dominance in the study area, three coverages: intermediate forest, savannah-grass and early forest and the dynamics of affectation and recurrence affects savannah-grass and forest early located in the boundaries of the study area. Finally the vulnerability model provides geospatial information of the fire situation on socio-economic and ecological values.

1. Introducción

Los bosques tropicales secos (BTS) representan el 42% de los bosques tropicales en el mundo (Murphy y Lugo, 1986), sin embargo, son uno de los ecosistemas terrestres más amenazados (Janzen, 1988), debido a la conversión de bosques a pasturas para agricultura (Miles *et al.*, 2006). Se estima que en Centroamérica un 0.09% está conservado bajo alguna categoría de protección (Janzen, 1988).

Según Holdridge (1967), los BTS se caracterizan por una biotemperatura de 17°C, con una estación seca de 4-5 meses y una precipitación anual de 500 a 2000 mm (Kalacska *et al.*, 2004). Debido a las características ambientales y las buenas condiciones de fertilidad de los suelos, los bosques tropicales secos son aptos para la agricultura y ganadería por lo tanto existe un grado de presión sobre estas tierras por parte de los pobladores (Murphy y Lugo, 1986).

Las tasas de conversión de la tierra a pasturas o agricultura son más altas en los BTS que en otros tipos de bosques Neotropicales (Calvo-Alvarado, Sánchez-Azofeifa y Portillo-Quintero, 2013). Estos cambios involucran muchas veces quema de biomasa y deforestación, produciendo efectos negativos sobre la biodiversidad (Kauffman *et al.*, 2002).

Por lo general en los trópicos, el fuego está asociado con actividades humanas (Murphy y Lugo, 1986), incluso en algunos ecosistemas a nivel mundial los incendios forestales con tundras y bosques boreales son un fenómeno natural (Chowdhury y Hassan, 2014). Sin embargo la dinámica entre la actividad humana y los incendios ha variado durante el siglo XX convirtiendo esta perturbación en una amenaza importante para los bosques y su composición (Dennis *et al.*, 2001) y aunque no se consideren los incendios forestales como el factor determinante en la historia evolutiva de los bosques tropicales secos si es considerado uno de los factores que impulsan el cambio de cobertura vegetal en estos ecosistemas (Otterstrom, Schwartz y Velázquez-Rocha, 2006).

1.1. Antecedentes

El bosque tropical seco es uno de los ecosistemas más amenazados que se extiende por Mesoamérica (Janzen, 1986). Pocos ecosistemas en el mundo son tan necesarios de conservar como lo es el Bosque Tropical Seco de Mesoamérica (BTSM). La conservación de BTSM puede ser considerada como una prioridad internacional, ya sea, por ser un ecosistema único debido a su designación como una reserva de variabilidad genética (Barrance, Schreckenberg y Gordo, 2009).

En México y Centroamérica existe una red de fragmentos de bosque dispersa y con limitaciones de bosque seco tropical, lo que no ha permitido una conservación adecuada. Dado esto, el BTSM se ha visto considerablemente dañado durante siglos por actividades humanas como agricultura, ganadería, extracción de madera, desarrollo turístico y en mayor cantidad por quemadas (Barrance, Schreckenberg y Gordo, 2009).

Uno de los elementos que más daño ha causado sobre los BTS es el fuego. Los incendios forestales son sin duda, uno de los precursores de la pérdida de cobertura boscosa de estos.

México y Centroamérica sustentan alrededor de unas 73.000.000 de hectáreas forestales incluyendo ecosistemas que se adaptan al fuego. Unos 21.000 incendios forestales afectan cada año unas 667.000 hectáreas en la región. Debido a esto, se cuenta con recursos y tecnologías que permitan el desarrollo de diferentes tareas correspondientes al manejo de fuego, por ejemplo, en algunas partes de la región se desarrollan distintas formas de detección: participación civil, detección satelital y terrestre (Martínez y Rodríguez, 2008).

Actualmente la tecnología como sensores remotos brinda herramientas capaces de detectar, caracterizar y cuantificar energía emitida por un objeto como un incendio forestal. A su vez los sistemas de información geográfica son adaptados para el monitoreo y diseño de modelos que permitan analizar las causas y efectos de estos fenómenos (Álvarez y Fonnegra, 2011). Por ejemplo la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, por sus siglas en inglés) brinda información sobre puntos calientes en la región; por otro lado, los institutos mexicanos CONABIO y CONAFOR han establecido relaciones con el fin de proporcionar detección de puntos calientes, actividad que se

realiza en Guatemala y que se pretende extender a toda Centro América (Martínez y Rodríguez, 2008).

En México, se creó un sistema de información y monitoreo de incendios forestales que permite manejar la descripción y caracterización de condiciones tales como, las cargas de combustibles, la ubicación de los incendios, las áreas impactadas y los riesgos a los incendios. Lo que ha permitido definir fuentes de información para la evaluación y monitoreo de incendios por medio de nuevas y variadas tecnologías (Flores, 2014).

En la Reserva de la Biosfera en Guatemala, se elaboró un modelo de susceptibilidad a los incendios forestales. Para el estudio se realizó una clasificación de vegetación de acuerdo a los patrones de cambio, mediante composiciones de 15 días/mes de imágenes AVHRR. Utilizando valores por píxeles y el índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), entre los meses de febrero a marzo de 1999. Estos datos se procesaron para obtener dos clasificaciones no supervisadas las cuales se combinaron para obtener un mapa con clases de vegetación según los patrones de cambio, lo que permitió mapas de zonas susceptibles a incendios forestales (Ramírez, 1999).

En Costa Rica se han realizado dos proyectos que utilizaron tecnologías SIG para el estudio de los incendios forestales, su prevención y control. Moraga (2010) realizó una Evaluación Multicriterio (ECM) del Riesgo ante incendios forestales en la cuenca del río Tempisque para determinar el riesgo ante incendios forestales a partir de variables como proximidad a carreteras, tipos de suelos, usos de la tierra, focos de incendios, insolación y altitud. Mientras que Vega (2005) realizó un modelo de riesgo potencial para la prevención y control de los incendios forestales para la estación Experimental Forestal Horizontes en Guanacaste.

1.2. Justificación

La quema de biomasa tiene un gran impacto a nivel local, regional y mundial (Fuentes, 2011). El fuego se produce por razones naturales como un rayo, sequías extremas; y por factores antropogénicos como quemaduras no controladas para limpieza de terrenos o cacería (Comisión Nacional Forestal, 2010).

En muchos ecosistemas como bosques boreales o sabanas arboladas la incidencia de incendios forestales es un proceso natural, sin embargo, son muchos los efectos

negativos que producen en el suelo, el agua, la vegetación y la atmósfera (Fuentes, 2011). La población también se ve afectada por la incidencia de incendios debido a las consecuencias en la salud y en la economía (Cochrane, 2002).

Los BTS son importantes gracias a los servicios ecosistémicos que brindan a la población, como agua, conservación de suelo y recreación. Desde el punto de vista biológico, el BTS es de suma importancia debido a la composición de fauna y flora caracterizada por incluir elementos de América del Norte y América del Sur; además muchas especies son endémicas (Martínez y Rodríguez, 2008). Se estima que en Costa Rica alrededor de 11.000 hectáreas de BTS en el Parque Nacional Santa Rosa, alberga cerca de 13.000 especies de insectos, 175 especies de aves, 115 especies de mamíferos y 75 especies de reptiles y anfibios (Janzen, 1988).

El estudio de los incendios forestales en el trópico es de gran importancia debido a que todos los años se experimentan en estos ecosistemas más incendios que en cualquier otra parte del mundo (Cochrane, 2009). El 47% de la superficie terrestre de América Latina y el Caribe está cubierta por bosques, se estima que entre 1980 a 1990 la pérdida de cobertura boscosa por incendios forestales fue de 61 millones de hectáreas, alrededor de un 6% del área forestal total, mientras que para los años de 1990 a 1995 la pérdida de bosques fue de 5.8 millones de hectáreas por año, un 3% menos de la cobertura total forestal (Cochrane, 2002).

En Costa Rica durante el período de 1998 al 2004 se contabilizaron un promedio de 41.262,93 ha al año perjudicadas por incendios forestales en áreas de conservación, especialmente afectando pastos, charrales y áreas de bosque (Lobo, 2005). El 72% de los incendios forestales se han registrado en las Áreas de Conservación Guanacaste, Tempisque y Arenal-Tempisque (Baltodano, 2007).

El bosque tropical seco en el pacífico norte de Costa Rica, es un ecosistema que ha sido afectado por incendios forestales, generando cambios en la cobertura de la tierra. La propuesta en estudio pretende mediante la utilización de nuevas tecnologías como teledetección y sistemas de información geográfica establecer modelos que sirvan como herramientas de análisis para la evaluación de riesgo de incendios forestales. El Programa de Manejo del Fuego del ACG será el principal beneficiario, ya que, mediante los insumos generados en este proyecto se podrán formular diferentes estrategias para el

control de incendios forestales y la protección de los recursos naturales, de acuerdo a la información geoespacial de la situación del fuego sobre el área protegida. Además el modelo de vulnerabilidad de riesgo podrá ser replicado en otras áreas de conservación de acuerdo a las necesidades, componentes y variables de cada área.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar la dinámica de los incendios forestales y la afectación sobre el paisaje con el fin de implementar un modelo de vulnerabilidad de riesgo en seis sectores del Área de Conservación Guanacaste.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1.3.2.1 Determinar los tipos de cobertura de la tierra presentes en el área silvestre protegida que es afectada por incendios forestales.
- 1.3.2.2 Describir la dinámica de afectación de incendios forestales y la reincidencia de dicha perturbación en las áreas afectadas por el fuego.
- 1.3.2.3 Determinar el estado de vulnerabilidad del área protegida a los incendios forestales de acuerdo a variables ecológicas y socioeconómicas.

2. Enfoque de la Investigación

2.1. Tipo de estudio

El presente estudio responde a una investigación mixta, donde se representan procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación, a su vez, se realizó recolección y análisis de datos tanto cualitativos como cuantitativos que permitieron una discusión conjunta (Hernández, Fernández y Baptista, 2010).

La línea de investigación del estudio fue “*la generación y aplicación de tecnologías para el manejo de los recursos naturales*”.

2.2 Fuentes de información

Se utilizaron fuentes primarias y secundarias para la investigación.

2.2.1. *Fuentes primarias:* Entrevistas realizadas al personal del Área de Conservación Guanacaste y a los encargados del Programa de Manejo del Fuego, también se contó con una base de datos geográfica (polígonos en formato ESRI shapefile), imagen satelital Landsat 8 OL-TIRS del año 2015 e informes técnicos del ACG.

2.2.2 *Fuentes secundaria:* Revisión bibliográfica como artículos científicos, tesis de grado y postgrado, libros, documentos digitales obtenidos en la red. Se utilizó el atlas digital de Costa Rica de capas del Instituto Tecnológico de Costa Rica para el año 2008 y 2014 en proyección transversal mercator 05 para Costa Rica (CRTM05).

2.3 Variables de la Investigación

Cuadro 1. Variables de la Investigación

Objetivos	Variable	Conceptual	Instrumental	Indicadores
Determinar los tipos de cobertura de la tierra presentes en el área silvestre protegida que es afectada por incendios forestales.	Cobertura de la Tierra	Cobertura que se logra visualizar sobre la superficie de la tierra.	Mapa de cobertura de la tierra del año 2015 mediante la utilización de imágenes satelitales y Trabajo de campo (toma de fotografías captando los cuatro puntos cardinales y puntos GPS)	Matriz de Error de Productor y Usuario Índice Kappa
Describir la dinámica de afectación de incendios forestales y la reincidencia de dicha perturbación en las áreas afectadas por el fuego.	Área afectada por incendios forestales	Eventos que se desencadenan en ecosistemas forestales originados por un rayo o por factores antropogénicos.	Análisis estadístico de polígonos de incendios del año 1997 al 2015	Categorías de áreas afectadas y recurrentes por Incendios forestales.
Determinar el estado de vulnerabilidad del área protegida a los incendios forestales de acuerdo a variables ecológicas y socioeconómicas.	Vulnerabilidad del área protegida	Efectos del fuego sobre los valores ecológicos y económicos	Modelo de vulnerabilidad (cartografía de elementos vulnerables)	Modelo de vulnerabilidad validado con criterio experto

3. Marco Teórico

A nivel mundial los bosques cambian tanto en calidad como en cantidad, de forma negativa o positiva. Estos cambios están muchas veces asociados a factores sociales, económicos y ambientales. Para lograr comprender la dinámica de la cobertura de la tierra, se debe comprender que existen interacciones que se dan en su evolución y el comportamiento que la humanidad tiene hacia estos cambios en la tierra debido a degradación de recursos hídricos, deforestación e incendios forestales (Rodríguez, 2012).

3.1. Cobertura de la Tierra

La cobertura de la tierra se define como la cobertura biofísica que se logra observar sobre la superficie de la tierra, describe no solo la vegetación y elementos antrópicos existentes sino también abarca los afloramientos rocosos y cuerpos de agua. Es importante señalar que la cobertura de la tierra difiere del uso de la tierra, caracterizado por las actividades e insumos de la población que le permiten producir, cambiar o mantener un tipo de cobertura de la tierra (Di Gregorio, 2005).

El Informe Nacional de la FAO (Noches y Chavarría, 2010), sobre la evaluación de los recursos forestales mundiales describe las siguientes clases de cobertura de la tierra para Costa Rica:

- ❖ **Laguna/Embalse:** Los embalses se definen como cuerpos de agua artificiales destinados a la producción de energía mientras que las lagunas son depósitos de agua naturales.
- ❖ **Pastos:** Son formaciones vegetales que se componen de gramíneas consideradas hierbas dominantes ocasionalmente están acompañados con árboles y arbustos que se encuentran esparcidos, dedicadas a la ganadería extensiva aunque en algunos casos no se presente ningún uso.
- ❖ **Manglar:** Son agrupaciones de árboles, arbustos y matorrales que se caracterizan por ser plantas halófitas y poseer la habilidad para crecer y prosperar en los litorales.
- ❖ **Nubes o sombras:** Áreas cubiertas por nubes o sombras de nube que impiden la clasificación de la cobertura a la que pertenece el área estudiada.

- ❖ **Uso Urbano:** Terreno para fines urbanos, habilitación de caminos y provisión de servicios, vías públicas y áreas destinadas para servicios comunales.
- ❖ **ND:** No determinado

Para la descripción de estadios sucesionales de bosque se utilizó como referencia lo reportado por Kalacska *et al.*, (2004):

- ❖ **Bosque Temprano:** Presenta un solo nivel de dosel que se extiende a unos 6 metros de altura. Un alto porcentaje son especies deciduas. Existe presencia de arbustos, pequeños árboles con pastos y suelos desnudos en áreas abiertas.
- ❖ **Bosque Intermedio:** El dosel se compone de dos niveles con alturas de 10 metros, especies deciduas de rápido crecimiento, así como lianas y especies siempre verde.
- ❖ **Bosque Tardío:** Dosel con aproximadamente dos niveles con alturas de 30 metros. Las especies regeneradoras son tolerantes a la sombra con pequeñas áreas de luz que alcanzan el suelo. Especies siempre verde con hoja perenne.

3.2. Incendios Forestales

La mezcla de calor, combustible y oxígeno en proporciones adecuadas son el primer paso para el comienzo de un fuego. Los carbohidratos como celulosa y hemicelulosa derivados de la biomasa vegetal son combustibles que permiten la propagación de incendios forestales (Cochrane, 2009).

Un incendio forestal que se propaga sin control impacta tanto los ecosistemas como al ser humano. El fuego modifica el equilibrio ecológico, aumenta la contaminación ambiental, contribuye al calentamiento global, incide sobre la capacidad de recarga de los acuíferos y potencia la erosión del suelo (Vega, 2005).

De acuerdo a la Comisión Nacional Forestal de México (2010), existen los siguientes tipos de incendios forestales:

- ❖ **Incendio Superficial:** Este fenómeno se da cuando el fuego se propaga de manera horizontal sobre la superficie y el terreno puede alcanzar hasta metro y medio de altura. Este tipo de incendio afecta los combustibles vivos y muertos

como pastizales, hojas, ramas, ramillas arbustos o pequeños árboles de regeneración natural.

- ❖ **Incendio Subterráneo:** Los incendios de este tipo se propagan por debajo del suelo llegando a quemarse materia orgánica acumulada y raíces, puede llegar a alcanzar afloramientos rocosos. Estos incendios no producen llamas al igual que emiten poco humo.
- ❖ **Incendio de Copa o Aéreo:** Los incendios de este tipo por lo general son los más peligrosos ya que el fuego consume toda la vegetación. Son difíciles de controlar, comienzan en forma superficial y continúan hasta que las llamas logran alcanzar primero el nivel del suelo y luego se propagan escalando de forma vertical la vegetación la cual es un medio de combustión que permite que el fuego avance a gran escala hacia las copas de los árboles.

3.2.1. Incendios Forestales en Costa Rica

Los incendios forestales se han incrementado como resultado del cambio climático, afectando de manera severa áreas de mayor extensión. La generación de incendios forestales está estrechamente ligada a fenómenos sociales junto a factores de construcción históricos de condiciones vulnerables, socioeconómicas, ambientales e institucionales (Fernández *et al.*, 2009).

En Costa Rica, los incendios forestales en su mayoría son producidos por la actividad humana de manera involuntaria o premeditada mediante prácticas agropecuarias, quema de basura, cacería, venganza y fogatas. Debido a las características topográficas, climáticas y al tipo de vegetación existente en la zona, los incendios forestales son más propensos y se extienden en la vertiente pacífica del país (Lobo, 2005).

Según Lobo (2005) el Área de Conservación Guanacaste es la de mayor incidencia de incendios forestales en el país, información que se corrobora con el informe de la temporada 2015 de incendios forestales del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), donde se indica que las áreas de conservación ubicadas en la región Chorotega: Arenal-Tempisque, Tempisque y Guanacaste, fueron las más afectadas este año, alrededor de 31.428 hectáreas en total, correspondiente a un 78% del total del país (SINAC, 2015).

3.3. Evaluación de Riesgo, Peligro y Vulnerabilidad ante Incendios Forestales

La evaluación del riesgo de incendios forestales es una parte fundamental en la prevención de incendios, ya que, los recursos de planificación pre-fuego requieren de herramientas que sean objetivas para controlar cuándo y dónde es más probable que un incendio se produzca o cuándo y dónde tendrá más efectos negativos (Chuvieco *et al.*, 2013).

El Riesgo se refiere a la probabilidad de inicio de un fuego por la presencia y la actividad de agentes causantes como un rayo o factores antropogénicos. Por otro lado, el peligro de incendio hace mención a los factores que pueden dar comienzo a un incendio así como la propagación, resistencia para el control y el daño causado por el evento. La vulnerabilidad es el posible efecto del fuego sobre los valores sociales y ecológicos; estos dos componentes deber ser parte de las evaluaciones de riesgo de incendios forestales (Chuvieco *et al.*, 2012) (Figura 1).

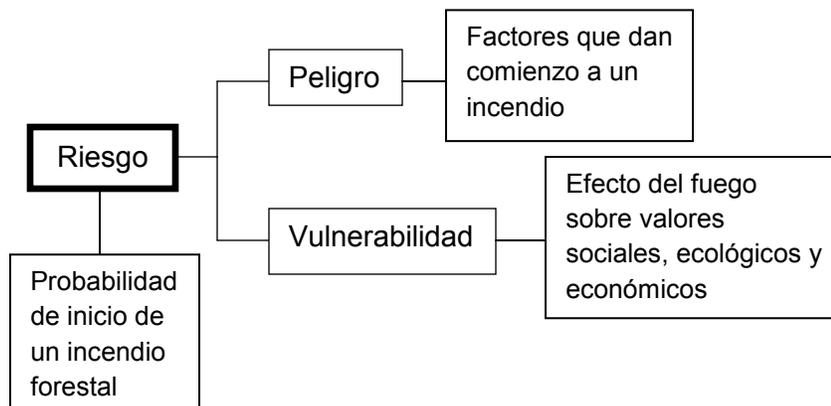


Figura 1. Esquema del modelo de evaluación de riesgo de incendios forestales.

Los incendios forestales son causantes de una pérdida importante del patrimonio nacional, anualmente se queman miles de hectáreas de vegetación perdiéndose la biodiversidad y los servicios ecosistémicos y sociales que la misma vegetación brinda a la población. De acuerdo a lo anterior dentro de la evaluación de vulnerabilidad se identifican valores ecológicos y socioeconómicos que permiten estimar los daños del efecto del fuego.

3.3.1. Valores Ecológicos:

3.3.1.1. Biodiversidad:

Es la forma de referirse a la variedad de plantas y animales nativos de una localidad (Gill, Stephens y Cary, 2013). Dentro de esta variable se estudia:

- ❖ *Sucesión y dinámica de la vegetación:* Es una forma simple de cambio en el tipo de vegetación o biodiversidad basado en el tiempo de colonización de la vegetación o tiempo de sucesión desde el disturbio. La vegetación y la dinámica de hábitats implica múltiples vías y cambios que toman lugar en el tiempo localidad (Gill, Stephens y Cary, 2013)
- ❖ *Fragmentación:* Proceso dinámico donde un determinado hábitat homogéneo y continuo va quedando reducido a fragmentos más pequeños y aislados, inmersos en una matriz de hábitats diferentes al original. Debido a esto el hábitat será sustituido total o parcialmente por una cobertura diferente a la original lo que provoca un cambio en la estructura y los aspectos funcionales generando pérdidas en el potencial ecológico y biodiversidad debido a disminución de la superficie total (Szek, 2012).

3.3.1.2. Calidad visual del paisaje:

El territorio posee características intrínsecas en los elementos que lo componen ya sean naturales o artificiales que son percibidos por cada uno de los distintos observadores del territorio. Dado esto, la calidad visual del paisaje se aprecia y se reconoce de manera distinta según el observador (Estévez, Garmendia y García, 2012).

De acuerdo a Estévez, Garmendia y García, (2012), la calidad visual está formada por:

- ❖ *Diversidad:* parámetro que evalúa el grado de mosaico de los usos del paisaje.
- ❖ *Valor Ecológico:* las zonas más próximas a las zonas de gran valor ecológico tienen mayor calidad.
- ❖ *Naturalidad:* entre más natural más valor tiene y es más susceptible al deterioro por lo tanto es más frágil.

- ❖ *Proximidad a elementos patrimoniales*: cuando se está próximo a un elemento patrimonial, el paisaje tendrá más valor.
- ❖ *Proximidad a impactos visuales*: mayor proximidad a impacto visual disminuye la calidad del paisaje.

3.3.2. Valores Socioeconómicos:

El fuego genera un impacto grande en la economía de una región ocasionando pérdidas de bienes y servicios que van desde salud hasta pérdidas de madera y erosión del suelo. Dentro del modelo de vulnerabilidad es esencial la estimación económica de los servicios ecosistémicos afectados por un incendio forestal.

3.3.2.1. Servicios ecosistémicos:

Son los beneficios que el hombre obtiene de la naturaleza y de los ecosistemas forestales. Estos servicios satisfacen la mayoría de las necesidades que tiene los humanos como subsistencia, protección, ocio y recreación (Barrio, Loureiro y Chas, 2007).

3.4. Sistemas de Información Geográfica en Incendios Forestales

Los sistemas de información geográfica (SIG) son un conjunto de software y hardware diseñados para el diseño, análisis, interpretación y presentación de datos referentes a la superficie terrestre (Olaya, 2011). A nivel de incendios forestales éstas herramientas facilitan el abordaje de la captura de información espacial, la ejecución de análisis avanzados y desarrollo de la gestión mediante la generación y la producción de datos que permiten el estudio de fenómenos geográficos (Fernández *et al.*, 2009).

Con esta información se pretende identificar áreas propensas a inicios de incendios determinando los de carácter natural o antrópicos (Fernández *et al.*, 2009). Actualmente, se ha desarrollado el uso de datos proporcionados por los satélites, esta información es obtenida mediante diferentes técnicas y sensores los cuales permiten observar la dinámica de la tierra con respecto a la prevención y evaluación de incendios forestales (Chuvienco, 2009).

3.5. Teledetección

Se define como la ciencia de obtener información acerca de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos mediante un dispositivo que no tiene contacto con el objeto, área o fenómeno que se investiga (Lillesand, Kiefer y Chipman, 2008). Bajo este contexto se hace la captura y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales o plataformas aerotransportadas. Esto es posible por la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres que tienen un comportamiento reflectivo variable debido a factores físico- químicos en el momento de la captura de la imagen (Pérez y Muñoz, 2006). La teledetección requiere de los siguientes componentes: fuente de energía, cubierta terrestre, sistema sensor, sistema de recepción de información, intérprete (digital o análogo) y un usuario final (Chuvieco, 2010) (Figura 2).

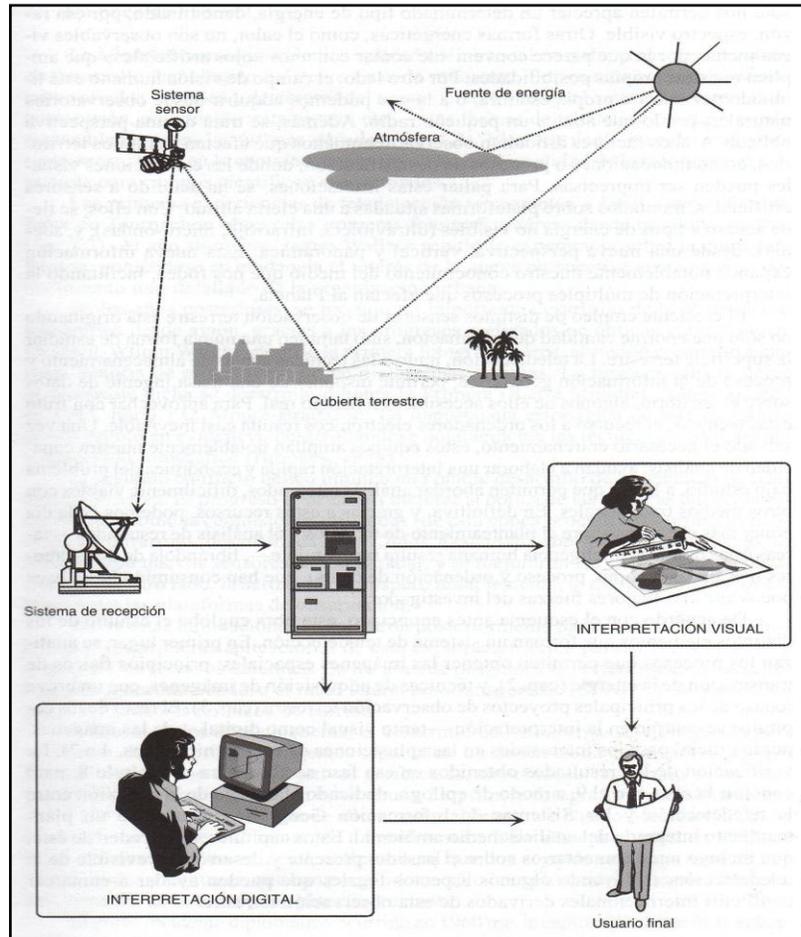


Figura 2. Componentes de la teledetección. Fuente Chuvieco (2010).

3.5.1. Radiación Electromagnética

La teledetección es posible gracias a la radiación electromagnética que es definida como la interacción entre flujo de energía y cubiertas terrestres. En éste fenómeno ondulatorio de propagación interfieren dos campos perpendiculares: el magnetismo y el eléctrico (Pérez y Muñoz, 2006).

Esta teoría es explicada mediante dos componentes fundamentales la longitud de onda y la frecuencia (Figura 3). La primera se define como la distancia entre dos picos sucesivos de una onda mientras que la segunda define el número de ciclos que pasan por un punto fijo en una unidad de tiempo (Chuvieco, 2010). Se expresan mediante la fórmula:

$$c = \lambda * v$$

Dónde:

C= es la velocidad de propagación

λ = la longitud de onda

v = la frecuencia.

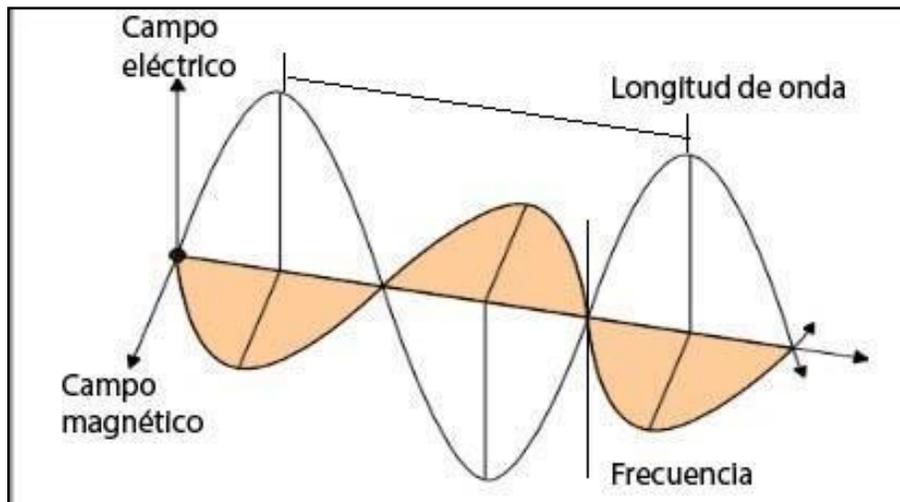


Figura 3. Esquema de onda electromagnética. Fuente: Adaptado de Pérez y Muñoz (2006)

3.5.2. Espectro Electromagnético

La radiación electromagnética está dada por distintas longitudes de onda y frecuencias, es por esto, que en teledetección es común categorizar ondas electromagnéticas por la ubicación de las longitudes de onda, generando una serie de regiones o bandas espectrales, donde el comportamiento y la organización dan lugar al *espectro electromagnético* (Figura 4) (Lillesand, Kiefer y Chipman, 2008). La unidad de medida es el micrómetro (μm).

Las bandas espectrales más frecuentes utilizadas en teledetección de acuerdo a Chuvieco (2010) son:

- ❖ *Espectro Visible*: Es la parte visible que el ojo humano puede percibir, el color azul se extiende desde 0.4 μm a 0.5 μm , el color verde de 0.5 μm a 0.6 μm y el color rojo va desde 0.6 μm a 0,7 μm .
- ❖ *Infrarojo cercano (IRC)*: Permite discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad. Se encuentra situado entre el 0.7 μm a 1.2 μm .
- ❖ *Infrarojo medio*: Dentro de esta región se encuentra el infrarojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR) idóneo para estimar contenidos de humedad en la vegetación y suelos situado entre 1.2 μm a 2.5 μm ; y el infrarojo medio (IRM) situado entre 2.5 μm y 8 μm . Ésta última región permite identificar focos de temperaturas altas como incendios o volcanes activos así como tipos de gases atmosféricos.
- ❖ *Infrarojo lejano o térmico (IRT)*: Permite detectar el calor proveniente de la mayoría de las cubiertas terrestres, ubicado entre los 8 μm y 14 μm .
- ❖ *Micro Ondas (M)*: Esta región se encuentra por encima de 1 μm y se caracteriza por que el tipo de energía es transparente a la cubierta de nubes.

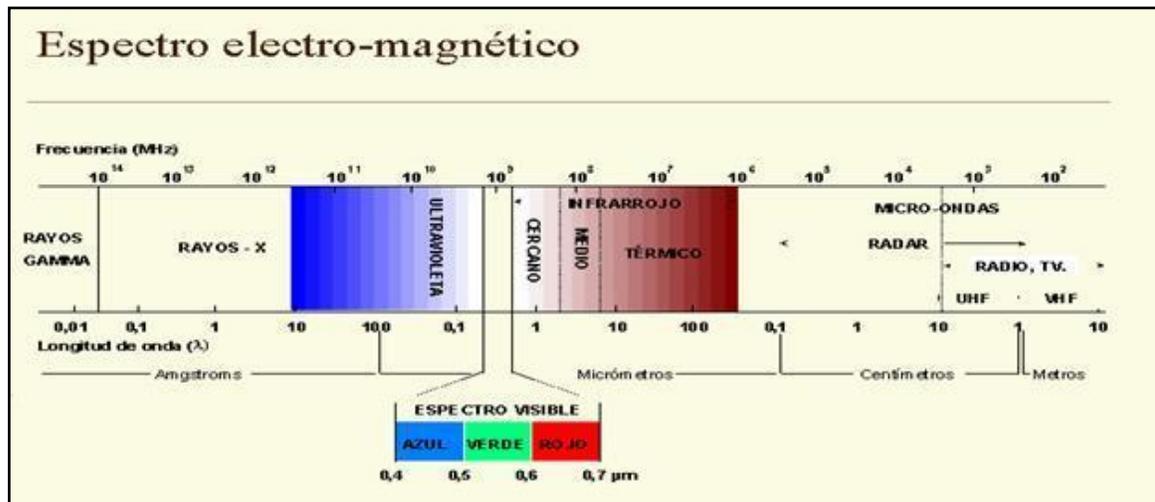


Figura 4. Diagrama del espectro electromagnético. Fuente: SEMAR (2012).

3.5.3. Interacción de la energía electromagnética con la atmósfera

Como producto de la interacción de la atmósfera con el sensor se producen muchas veces algún tipo de efecto o ruido sobre los datos teledetectados. Estos efectos pueden ser por dos procesos: dispersión y absorción (Segado, 1996).

La absorción por su parte produce un calentamiento en la atmósfera (Segado, 1996), ya que, convierte la radiación en calor (Rejas, 2008). La dispersión se da mediante dos formas: dispersión *Rayleigh*, la cual es producida por moléculas de los gases y la dispersión de *Mie* o dispersión por aerosoles la cual es producida por partículas de mayor tamaño como humo, vapores y neblina (Rejas, 2008).

3.5.4. Tipos de sensores remotos

Los sensores remotos se clasifican en dos tipos activos y pasivos. Los sensores activos como el radar generan la radiación de forma directa hacia el objeto, estos sensores operan mediante el espectro de microonda y ondas de radio del espectro EEM, mientras que los sensores pasivos registran radiación del sol (Pérez, 2007).

❖ *Sensores Pasivos*

Tal como se mencionó los sensores pasivos reciben señales emitidas y reflejadas por los objetos percibidos; éstas señales que son generadas por la radiación solar de manera natural proveen información sobre los objetos percibidos. Las imágenes creadas por estos

sistemas de percepción pasiva suelen ser de mayor valor en la evaluación de los recursos naturales (Martínez y Díaz, 2005).

3.5.5. Corrección Atmosférica

Los sensores remotos necesitan que la radiación solar pase a través de la atmósfera antes de que la información sea recolectada por el instrumento, de esta manera se recolecta información de la atmósfera y la superficie terrestre. Sin embargo, es necesario eliminar la influencia de partículas y distorsiones generadas por la atmósfera en las imágenes mediante un proceso llamado corrección atmosférica que se aplica durante el pre-procesamiento de las imágenes (ENVI, 2009). La corrección atmosférica busca recuperar la radiancia intrínseca del objeto de estudio que es obtenida de la señal recibida por el sensor mediante los siguientes pasos: 1) conversión de niveles digitales (ND) a radiancia, 2) transformación de la radiancia a reflectancia y por último 3) la obtención de la conversión de valores de reflectancia mediante la extensión FLAASH (Aguilar, Mora y Vargas, 2014).

La radiancia es el total de energía radiada en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Se cuantifica mediante vatios por metro cuadrado y estereoradian ($W \cdot m^{-2} \text{ sr}^{-1}$) (Chuvieco, 2010). También se define como la cantidad de flujo radiante por unidad de longitud de onda emitida en un cono por unidad de ángulo sólido (Gómez, 2006). Por otro lado la reflectancia o albedo es la relación que existe entre el flujo reflejado y el incidente (Chuvieco, 2010).

3.5.6. Resolución de un sensor

La resolución de un sistema sensor se define como la habilidad para discriminar información a detalle de un objeto (Chuvieco, 2010). El sensor se conforma de varios componentes los cuales entran en juego a la hora de la captura de datos entre los que destacan el espacio, el tiempo y la radiometría (Schowengert, 2007).

❖ Resolución Espacial

Se define como la capacidad que tiene el sistema sensor para separar o discriminar los objetos más pequeños de una imagen. La unidad mínima se conoce como píxel y se mide en la imagen en milímetros y en el terreno en metros (Chuvieco, 2010).

❖ *Resolución Espectral*

Se refiere al número y anchura de bandas que puede discriminar el sensor, cuanto mayor cantidad de bandas proporcione un sensor será más idóneo debido a que permite con mayor facilidad la caracterización espectral de las coberturas (Chuvieco, 2010).

❖ *Resolución Radiométrica*

La resolución radiométrica es la sensibilidad a la que el sensor logra detectar la radiancia que recibe (Wang and Weng, 2014).

❖ *Resolución Temporal*

Es conocido comúnmente como la repetición de ciclos o intervalos en la adquisición de imágenes de un área determinada (Wang and Weng, 2014).

3.6. Imágenes Satelitales

A medida que los satélites “barren” la superficie terrestre, captan mediante sensores, energía reflejada de las cubiertas terrestres. Esta energía es registrada mediante una matriz de puntos la cual da origen a las imágenes satelitales las cuales proveen datos que nos permiten extraer información geofísica y geográfica. Las características como el número de bandas, regiones del espectro electromagnético, tamaño de la imagen y resolución será distinto dependiendo del tipo de sensor que se utilice (Martínez y Díaz, 2005).

Las imágenes de satélite pueden ser de varios tipos como pancromáticas, multiespectrales e hiperespectrales. Para el estudio en caso se utilizaron imágenes multiespectrales, las cuales se describirán a continuación:

3.6.1. Imagen Satelital Multiespectral

Las imágenes multiespectrales son capturadas por un sensor digital el cual mide la reflectancia en muchas bandas. Los distintos valores de reflectancia se combinan y crean imágenes de color (Martínez y Díaz, 2005).

3.7. LANDSAT

Proyecto coordinado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) y la NASA (National Aeronautics and Space Administration) basado en una colección de datos espaciales. Por cuatro décadas las imágenes han proporcionado un recurso único a investigadores para trabajar en diferentes áreas como agricultura, geología, silvicultura, ordenamiento territorial y recursos naturales (USGS, 2013).

El programa inició en 1967 con el nombre de ERTSs (Earth Resources Technology Satellites), para 1975 fue oficializado con el nombre LANDSAT (Lillesand, Kiefer y Chipman, 2008). En el año de 1980 el programa Landsat entro en una nueva etapa de financiamiento y funcionamiento ya que fue transferido al sector privado, sin embargo, con el fallido lanzamiento del satélite Landsat 6 el cual se perdió debido a un fallo en la comunicación con la plataforma y no se ubicó la órbita precisa, se empezaron a generar dudas sobre su utilización, dado esto, el programa volvió a pasar al gobierno. Se empezó a gestionar el nuevo sensor Landsat 7 el cual tuvo la participación de tres agencias: NASA, encargada del desarrollo y lanzamiento del satélite; NOAA, responsable de las operaciones y mantenimiento de los sensores y USGS, encargado de recoger, procesar y distribuir los datos (Sobrino, 2000).

3.7.1. Tipos de sensores LANDSAT

Cuadro 2. Características de los Sensores LANDSAT.

Tipo de Sensor	Características	
<i>Landsat MSS (Multispectral Scanner System)</i>	Resolución Espacial	68 m x 83 m
	Rango Espectral	0.5 - 1.1 μm
	Número de Bandas	4, 5
	Resolución Temporal	18 días (L1-L3) 16 días (L4-L5)
	Tamaño de la Imagen	185 km x 185 km
<i>Landsat TM (Thematic Mapper)</i>	Resolución Espacial	30 m (120 m termal)
	Rango Espectral	0.45 - 12.5 μm
	Número de Bandas	7
	Resolución Temporal	16 días
	Tamaño de la Imagen	185 km x 172 km
<i>Landsat ETM+ (The Enhanced Thematic Mapper Plus)</i>	Resolución Espacial	30 m (60 m termal, 15 m pancromática)
	Rango Espectral	0.45 - 12.5 μm
	Número de Bandas	8
	Resolución Temporal	16 días
	Tamaño de la Imagen	183 km x 170km
<i>Landsat OLI TIRS (Operational Land Imager -Thermal Infrared Sensor)</i>	Resolución Espacial	30 m OLI visible, near infrared, SWIR , CIRRS-100m TIRS- 15 m OLI pancromática
	Rango Espectral	0.43 - 12.5 μm
	Número de Bandas	11
	Resolución Temporal	16 días
	Tamaño de la Imagen	185 km

Fuente: Elaboración propia con datos de <http://landsat.gsfc.nasa.gov>.

4. Marco Metodológico

4.1. Descripción del área de estudio

La investigación se desarrolló en los sectores: Santa Rosa, Murciélago, Santa Elena (Parque Nacional Santa Rosa) Junquillal (Refugio Nacional de Vida Silvestre Bahía Junquillal), El Hacha y Pocosol (Parque Nacional Guanacaste), ubicados dentro del Área de Conservación Guanacaste, distrito de Santa Elena, cantón de La Cruz, provincia Guanacaste, Costa Rica (Figura 5). La selección de estos sectores se debe a que son áreas afectadas de manera recurrente por incendios forestales.

Cuadro 3. Coordenadas geográficas y hectáreas de los sectores de estudio del Área de Conservación Guanacaste.

Sector	Coordenadas Geográficas	Hectáreas (ha)
Santa Rosa	10,8577389 N – 85,7270306 W	11.066,737
Murciélago	10,8870000 N – 85,8445111 W	12.937,423
Santa Elena	10,8938250 N – 85,7645167 W	15.288
El Hacha	11,0026111 N – 85,5400722 W	7.981,854
Pocosol	10,8918722 N – 85,5992417 W	9.847,841
RVS Junquillal	10,9739861 N – 85,647811 W	438,463

Fuente: Elaboración propia

En AGC la precipitación anual es entre 900 y 2400 mm y la época seca se extiende desde diciembre hasta abril (Villalobos, Retana y Acuña, 2000). La escala de temperaturas varía, los rangos nocturnos son de 16 a 23°C, mientras que, en el día son de 26 a 38°C. El área de estudio cruza alrededor de nueve zonas de vida, abarcando la costa del pacífico seco tropical (Janzen, 1986).

Janzen (1986) menciona que el área cuenta con todas las clases de bosque seco que se pueden encontrar en toda la extensión latitudinal de este tipo de hábitat en Mesoamérica, así mismo, indica que las islas Murciélago y la punta de la península de Santa Elena son

las áreas más secas del país. Existe una gran variedad de vegetación costera, riberas y bosques siempre verdes, tanto dentro del área protegida como a sus alrededores, sin embargo, la mayoría de hábitats se han transformado, destruidos y homogenizados debido a actividades de tala, quema, siembra de pastos y actividades agrícolas (Janzen, 1986).

Geológicamente el ACG se encuentra asentado sobre la Meseta de Ignimbritas de Santa Rosa (MISR), región que es producto de subducción de placas. Existe una constante actividad volcánica, el relieve se conforma de cadenas montañosas y los suelos se encuentran meteorizados con perfiles poco profundos pero los horizontes son conspicuos (Leiva *et al.*, 2009).

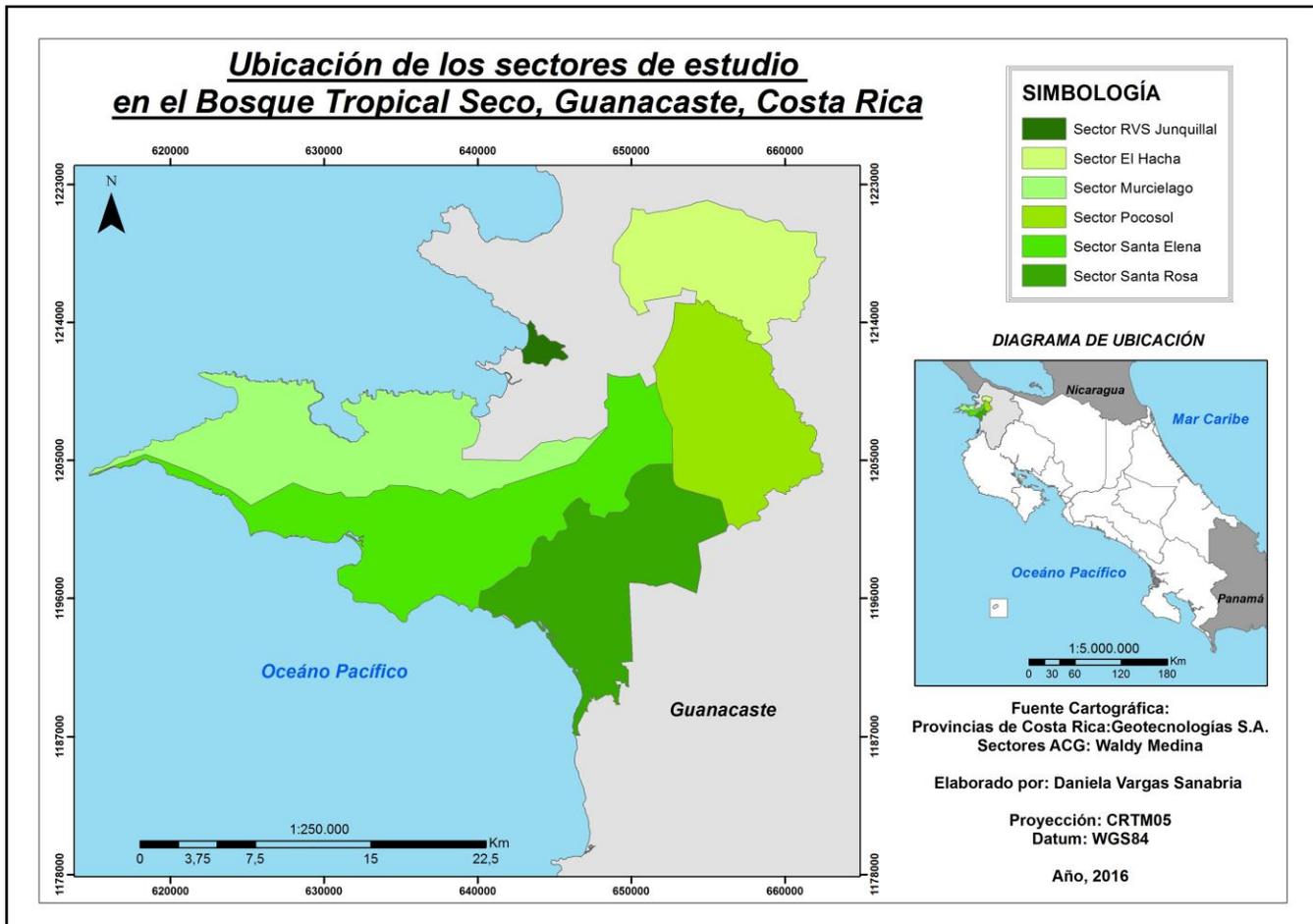


Figura 5. Mapa de sectores de estudio en el Área de Conservación Guanacaste.

4.2. Población Muestra

Para determinar la población muestra se utilizó el muestreo por *selección intencionada o muestreo de conveniencia*. Éste tipo de muestreo permite realizar la elección por métodos no aleatorios de una muestra donde las características sean similares a la población objetivo, este tipo de muestreo no se permite cuantificar la representatividad de la muestra debido a que es determinada por el investigador (Casal y Mateu, 2003).

La unidad de estudio corresponde a cada área muestreada de 3 hectáreas o más, así mismo, la población la determinan las áreas mayores a tres hectáreas dentro de los seis sectores de estudio del Área de Conservación Guanacaste, mientras que la variable de interés es el tipo de cobertura muestreada.

4.3. Recolección de Datos

Trabajo de Campo

El trabajo de campo se basó en la caracterización de los tipos de coberturas de la tierra presentes en los sectores de estudio.

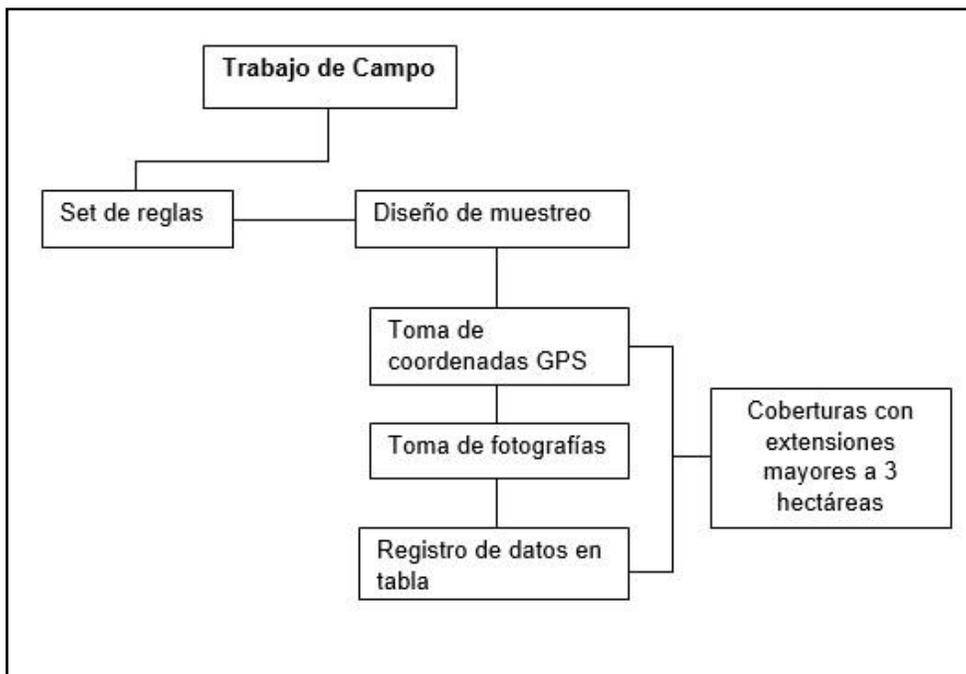


Figura 6. Diagrama de la metodología para trabajo en campo. Fuente: Elaboración propia

Se realizó un *set de reglas* (Cuadro 4) para identificar las coberturas basándose como referencia en el establecido por el CONIFOR (Comisión Nacional sobre Incendios Forestales) y adaptado a las necesidades del área. Las giras de campo se realizaron durante los meses de marzo, abril y mayo del año 2015.

Cuadro 4. Set de Reglas para la caracterización de tipos de coberturas de la tierra para el trabajo de campo.

Cobertura	Descripción	Ejemplo
<i>Pastos</i>	Hierbas, árboles dispersos, áreas abiertas.	
<i>Sabanas</i>	Extensas áreas abiertas con pastos y árboles dispersos.	
<i>Bosque temprano</i>	Arbustos, altura máxima de 6 a 8 m, árboles juveniles y pequeños, pierden sus hojas en época seca.	

<p><i>Bosque Intermedio</i></p>	<p>Especies deciduas con tamaños entre 10 a 15 m. Lianas</p>	
<p><i>Bosque tardío</i></p>	<p>Tres estadios de vegetación, individuos entre 15 a 30m, siempre verdes.</p>	
<p><i>Manglar</i></p>	<p>Árboles con raíces aéreas, mezcla de agua dulce con salada.</p>	

<p><i>Cuerpos de agua</i></p>	<p>Ríos, lagunas y quebradas</p>	
<p><i>Infraestructura</i></p>	<p>Edificaciones construidas de cemento o madera, carreteras, puentes.</p>	
<p><i>Bosque de Galería</i></p>	<p>Bosque a orillas de ríos o quebradas.</p>	

Fuente: Elaboración propia

Se estableció un diseño de muestreo donde se recorrieron los senderos turísticos y de patrullaje así como caminos rurales y carreteras internacionales que colindan con el área protegida, durante el recorrido se tomaron puntos con equipo de posicionamiento global GPS (marca Garmin modelo60 csx) de cada cobertura mayor a tres hectáreas y homogénea, esto se debe a que los píxeles de las imágenes LANDSAT abarcan un área de 30 x 30 metros, es decir 900 m² por lo que coberturas menores a tres hectáreas no podrían ser identificadas en las imágenes satelitales por efecto de proximidad de otras coberturas.

Por cada punto de cobertura levantada se tomó una fotografía en los cuatro flancos (norte-sur-este-oeste) con una cámara fotográfica (marca Sony Cyber-shot DSC-H50) con el fin de poder verificar en las imágenes satelitales que los puntos recolectados efectivamente correspondieran a la cobertura levantada en el campo y a la vez fueran insumo para el procedimiento de validación post clasificación en el programa ENVI. Se recolectaron 220 puntos de campo (Figura 7). La información se levantó en campo mediante una tabla de registro (Anexo 1) y posteriormente se sistematizó en una base de datos de una hoja del programa Microsoft Excel.

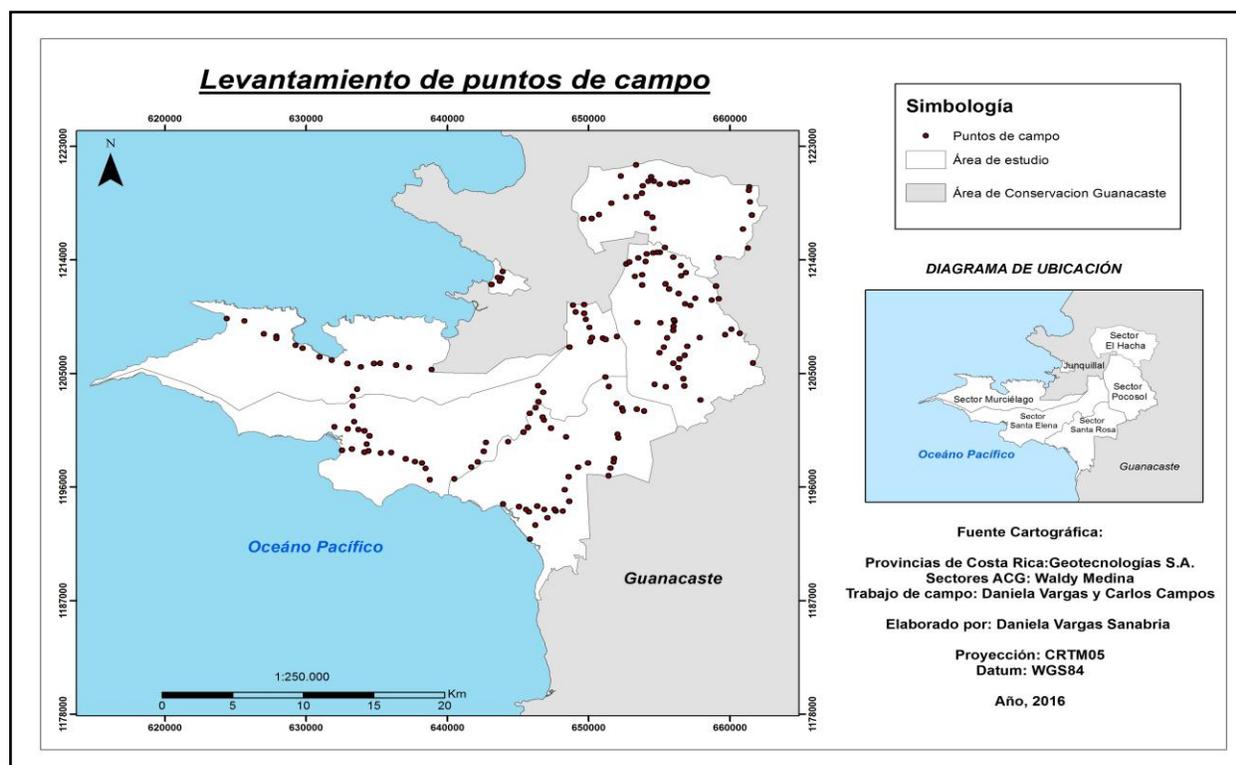


Figura 7. Mapa de puntos de muestreo.

4.4. Procedimiento

4.4.1. Delimitación de coberturas

La delimitación de la cobertura de la tierra en los sectores de estudio responde a la necesidad de determinar las distintas composiciones vegetales presentes, con el fin de evaluar y monitorear los cambios producidos sobre estos ecosistemas por eventos como los incendios forestales. El proceso para la delimitación de las coberturas consta de tres fases principales (Figura 8).

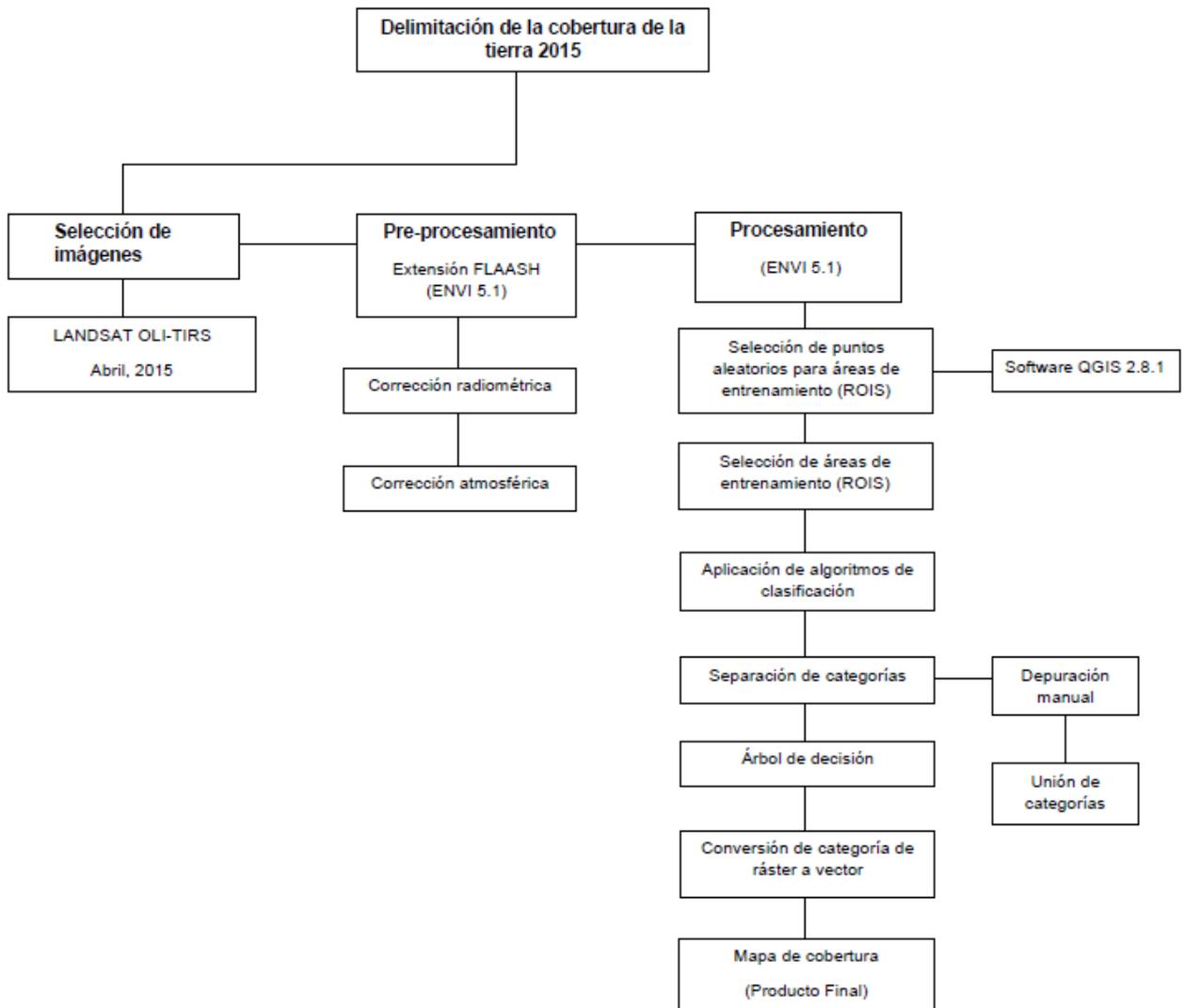


Figura 8. Metodología de trabajo empleada para la delimitación de las coberturas de la tierra.

A continuación se detallaran las actividades realizadas en estas tres fases para la delimitación de la cobertura de la tierra de los sectores de estudio.

4.4.1.1. Selección de imágenes

La selección de imágenes se realizó para identificar las imágenes que cubrían toda el área de estudio, las que tuvieran una cobertura nubosa menor a 25% y las que contaban con fechas entre los periodos comprendidos de diciembre y abril.

Se utilizaron imágenes multiespectrales LANDSAT (disponibles en <http://earthexplorer.usgs.gov/>, del Servicio Geológico de los Estados Unidos). Se seleccionó una imagen que contaba con un nivel de procesamiento de L1T (Nivel 1 Terrain), que corresponde a productos con una corrección geométrica sistemática aplicada donde se utilizan puntos de control terrestres obteniendo una imagen registrada con una proyección cartográfica de referencia UTM 16N, estos datos contienen la corrección topográfica debido al desplazamiento del terreno por el relieve (García *et al* ., 2013).

4.4.1.2. Pre-procesamiento de imágenes

El pre-procesamiento de imágenes es un paso que se realizó para mejorar la calidad visual de la imagen que fue descargada en la fase anterior y posteriormente crear datos con alta calidad. Este procedimiento consistió en transformar las imágenes crudas que están en niveles digitales (ND) a unidades físicas como radiancia. Por medio de la calibración radiométrica y mediante la utilización del software ENVI 5.1, se recodifico la imagen en formato Band Interleaved by Line (BIL), para poder ser procesada por la extensión del software.

Para transformar los valores de las unidades físicas de radiancia a reflectancia se realizó la corrección atmosférica mediante la extensión FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) del programa ENVI 5.1. El fin de este procedimiento fue eliminar los “ruidos” que son causados a la señal que llega al satélite y son reflejados en la imagen. Se utilizaron los siguientes parámetros para la corrección atmosférica (Cuadro 5)

Cuadro 5. Descripción de los parámetros utilizados para la corrección atmosférica de la imagen satelital.

Parámetro	Característica
Tipo de Sensor	Multiespectral Landsat OLI - TIRS
Altitud	705.00 Km
Modelo Atmosférico	Tropical
Modelo de Aerosol	Marítimo
Modelo de Aerosol Retrieval	2k Band T
Visibilidad Inicial	20Km

Fuente: Elaboración propia.

4.4.1.3. Procesamiento de imágenes

Luego de pre-procesar las imágenes con el fin de darles una mejor calidad visual, se continuó la etapa de clasificación supervisada. Schowengerdt (2007) describe la clasificación de una imagen como un proceso usado para producir un mapa temático (distribución espacial en función de la superficie de la tierra de elementos que dan información específica de un área); así, para poder elaborar el mapa temático de la cobertura de la tierra desde una imagen satelital fue necesario realizar una serie de pasos descritos a continuación:

- ❖ *Definir las categorías o leyenda:* Para este paso se determinaron los tipos de cobertura de la tierra de interés para el área de estudio (pastos, sabanas, bosque tardío, intermedio y temprano, manglar, laguna, bosque de galería, infraestructura y nubes o sombras), según el set de reglas establecido anteriormente. Se utilizó también la capa de ríos, escala 1:200000, del Atlas 2014 del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- ❖ *Determinar áreas de entrenamiento:* Estas áreas las cuales son llamadas también por su acrónimo en inglés AOI (*Areas of interest*) o ROIS (*Regions of interest*) cumplen la función de “entrenar” al algoritmo de clasificación para el reconocimiento de las distintas categorías o leyendas, anteriormente establecidas. Cada área asigna al resto de los píxeles de la imagen a una categoría de acuerdo

a las propiedades del píxel o similitud en sus niveles digitales (ND) con los extraídos antes como referencia (Schowengerdt, 2007, Chuvieco, 2010).

Para poder determinar las áreas de entrenamiento se utilizaron como referencia los puntos de campo georeferenciados de las coberturas de la tierra. De los 220 puntos obtenidos se utilizaron 110 puntos correspondientes a la mitad de puntos que se levantaron para cada cobertura; esta selección de puntos se realizó de manera al azar mediante la herramienta de investigación llamada *puntos aleatorios* del programa *Quantum GIS 2.12*. Los otros 110 puntos restantes se utilizaron para la validación de la clasificación (se describirá detalladamente más adelante)

Los 110 puntos de campo de las coberturas que fueron seleccionados al azar se proyectaron sobre la imagen satelital y alrededor de cada punto se recolectaron “muestras” de 9 píxeles (esta acción se realiza 5 veces obteniendo un total de 45 píxeles por cobertura) esto se realiza para la clasificación de las coberturas en el programa. Posteriormente se evaluaron las áreas de entrenamiento con el análisis de separabilidad *Jeffries-Matusita*. Éste análisis permite estimar la separabilidad o distancia entre las categorías, es decir, que tan distintas o semejantes son las categorías entre sí. Los valores que se obtienen mediante este análisis van de 0 a 2; donde el valor de 2 representa una separabilidad máxima entre pares de categoría, es decir que existe una separación o diferencia entre cada cobertura clasificada, mientras que si se acerca a 0 significa que las coberturas son similares entre sí. La aplicabilidad de este análisis sugiere, si lo hubiera, sobre la existencia de algún error en la asignación de píxeles que podría afectar la clasificación final.

- ❖ *Aplicación de algoritmos de clasificación supervisada:* Basados en las muestras de las áreas de entrenamiento se aplicaron los algoritmos de clasificación. Teniendo en cuenta que la mayoría de las muestras corresponden a distintos estadios de sucesión de la vegetación y que la discriminación individual desde una imagen satelital es difícil por la composición, distribución y fenología de algunas especies de plantas, se tomó la decisión de aplicar varios algoritmos de clasificación: *Minimum Distance*, *Mahalanobies*, *Maximum Likelihood*, *Neural Network*, *Support Vector Machine* y *Parallelepiped* para determinar cuál clasificaba mejor las coberturas.

- ❖ *Validación de la clasificación:* Posterior a la aplicación de los algoritmos de clasificación, el programa realizó un mapa de salida donde cada píxel tenía una categoría (cobertura) establecida. Para verificar la exactitud de estos mapas fue necesario estimar si los puntos fueron cartografiados o asignados geográficamente de forma correcta dentro de los datos suministrados al programa.

Para realizar la validación fue necesario utilizar la herramienta de post-clasificación llamada *matriz de confusión* (también denominada matriz de error). La matriz de error consiste en la combinación de filas y columnas que expresan el número de muestras o píxeles que se asignaron para cada categoría en una clasificación (Congalton y Green, 2009) y la relación con muestras clasificadas reales de campo (Lillesand, Kiefer y Chipman, 2008)

Para la ejecución de esta matriz fue necesario la utilización de muestras reales de campo por lo tanto, se tomaron como fuente los 110 puntos georeferenciados restantes. Con estos datos y la clasificación final, se generó una matriz de error y un índice Kappa, que permitió determinar la precisión obtenida en la aplicación de los algoritmos. Por lo general la matriz de error viene acompañada de los resultados calculados por la exactitud del productor y del usuario los cuales señalan la veracidad de la clasificación y el muestreo.

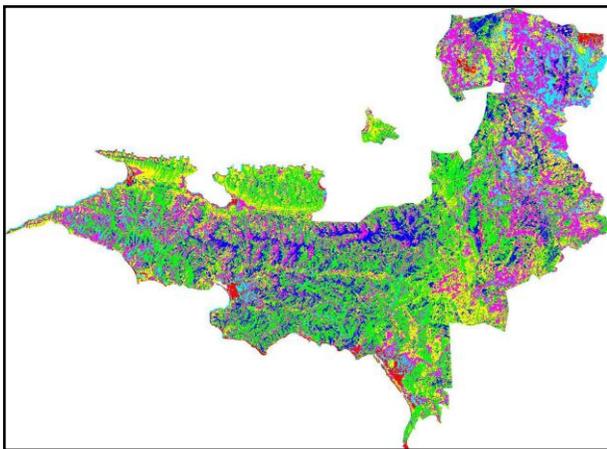
Exactitud del Productor: Esta estimación resulta de la división del número de píxeles clasificados para cada categoría con el número de píxeles de muestras de entrenamiento usados para cada categoría indicando que tan bien los píxeles de entrenamiento clasificaron cada tipo de cobertura (Lillesand, Kiefer y Chipman, 2008). También mide el error por omisión, esto es cuando un píxel pertenece a una categoría y el programa no lo asigna a esa categoría (Congalton y Green, 2009).

Exactitud del Usuario: Se obtiene por la división del número de píxeles que han sido clasificados correctamente en cada categoría por el número de píxeles totales que fueron clasificados en esa categoría. Así mismo, estima el error por comisión el cual indica la probabilidad de que un píxel clasificado en una categoría represente esa verdadera categoría en el terreno (Lillesand, Kiefer y Chipman, 2008).

Índice Kappa: Técnica multivariable discreta usada en la evaluación de la precisión para determinar estadísticamente si una matriz de error es significativamente diferente a otra (Congalton y Green, 2009).

- ❖ *Árboles de Decisión*: se utilizó una clasificación alternativa denominada árboles de decisión (*Decisión tree classifier*) cuya finalidad fue separar las categorías de coberturas. Se utilizaron los algoritmos que clasificaron mejor las distintas categorías (Figuras 9), partiendo de ahí se fue “extrayendo” del mapa de clasificación supervisada cada categoría por separado, creando así un árbol único para cada categoría (Figura 10), se depuró manualmente (Esto consistió en eliminar zonas que el algoritmo clasificó incorrectamente) y finalmente se creó un nuevo árbol con todas las categorías depuradas y clasificadas correctamente (Figura 11) lo que dio origen a un mapa temático final con las coberturas de la tierra del año 2015.

A)



B)

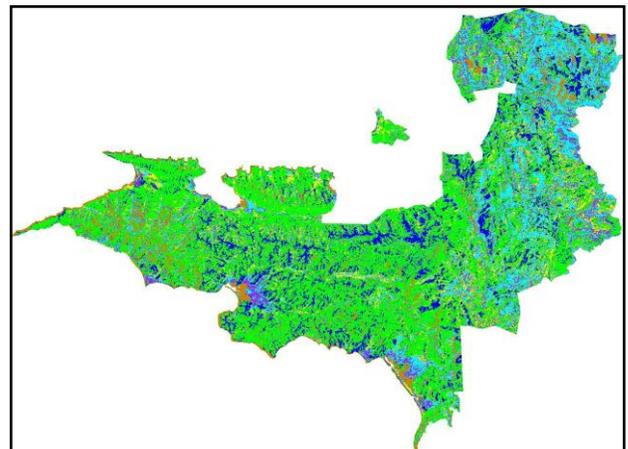
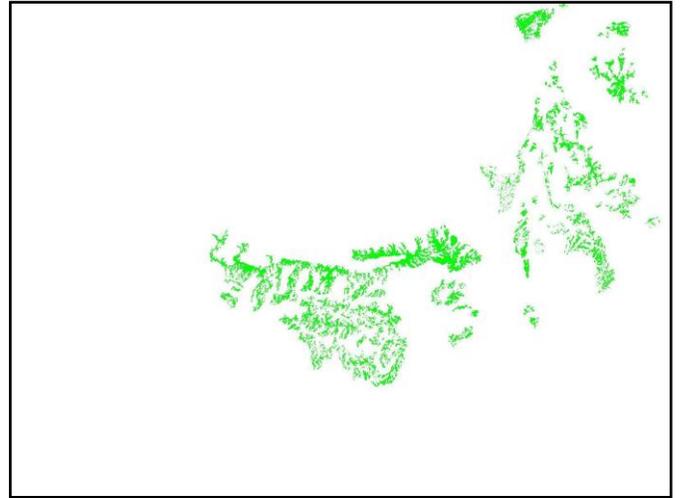
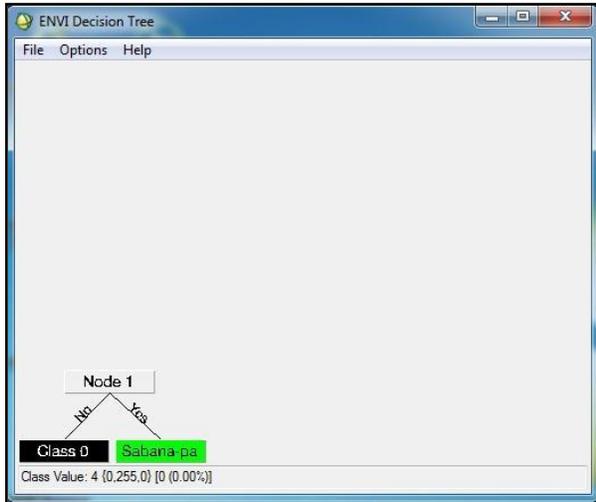


Figura 9. A) Clasificación supervisada Maximum Likelihood , B) Clasificación supervisada Neural Network

A)



B)

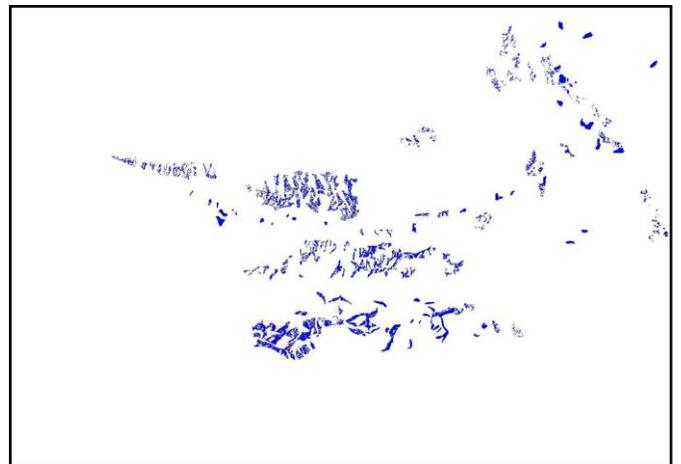
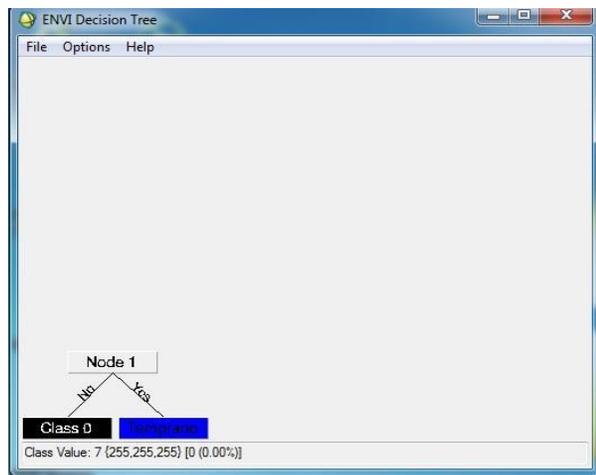


Figura 10. Ejemplo de composición de árboles de decisión para cada categoría, A) categoría de sabana-pasto y B) categoría de bosque temprano.

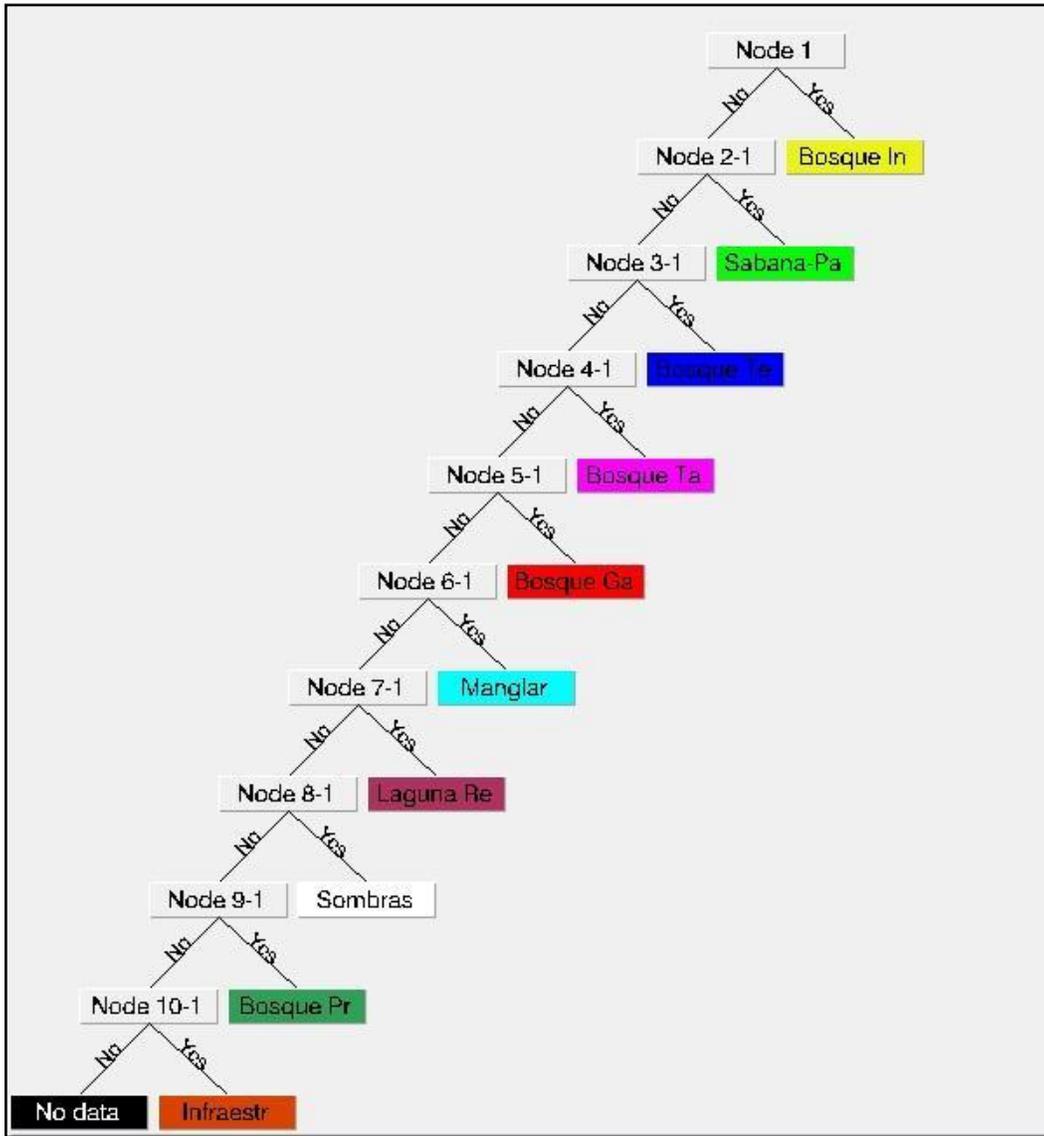


Figura 11. Estructura del árbol de decisión final.

4.4.2. Dinámica de Incendios Forestales

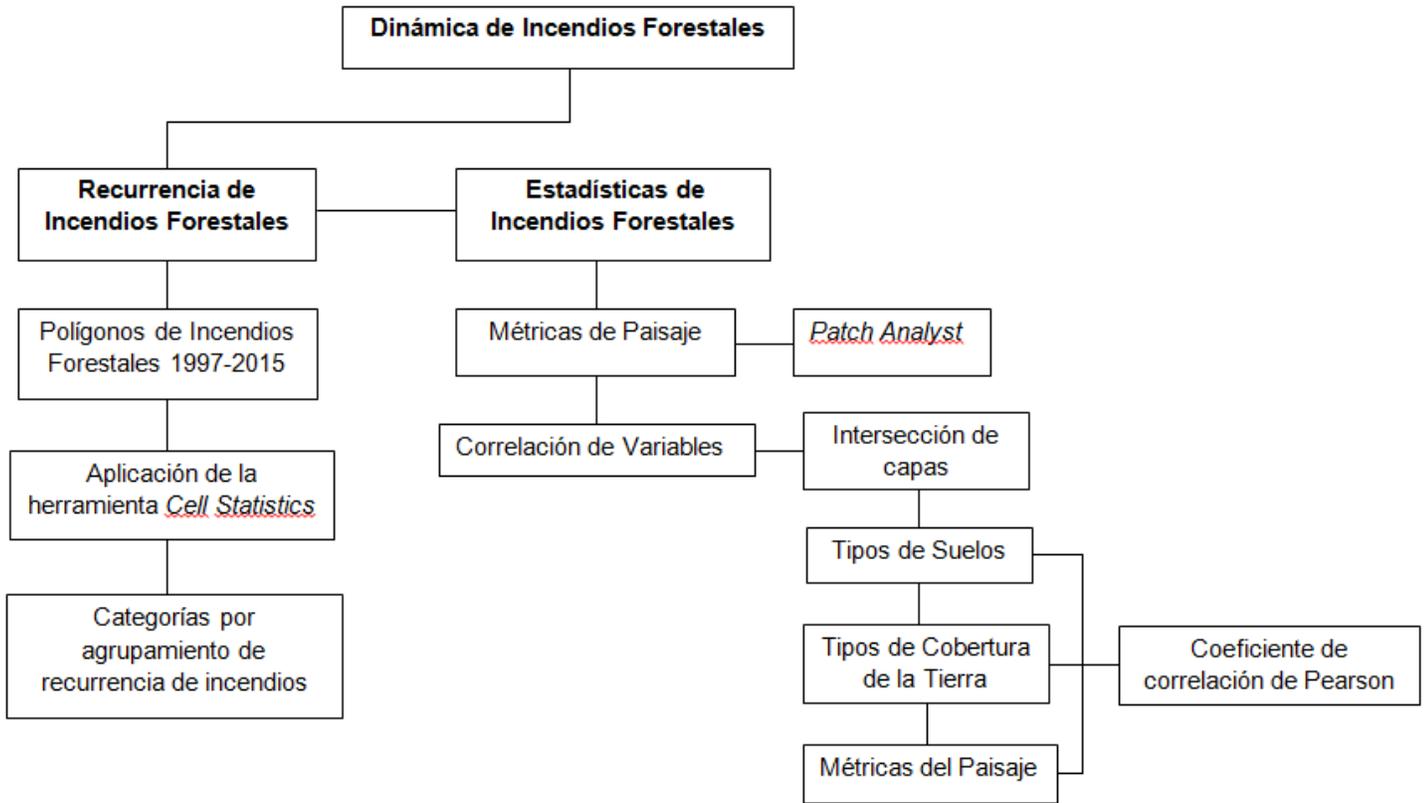


Figura 12. Metodología de trabajo empleada para el análisis de las zonas recurrentemente quemadas.

4.4.2.1. Recurrencia de Incendios Forestales

Para el análisis de la recurrencia de incendios forestales se utilizó como base los polígonos de áreas quemadas (formato ESRI shapefile) suministrados por el Programa de Manejo del Fuego del Área de Conservación Guanacaste, los cuales fueron levantados mediante el trabajo de campo con equipo GPS durante los años 1997 al 2015. Se homogenizó la tabla de registros de los archivos, determinando para cada capa vectorial por año los siguientes atributos: *parque nacional-sector-sitio-fecha-año-area_ha*.

Con la utilización del software *Environmental Systems Research Institute*, ArcGis 10.3 se realizó la conversión de los datos vectoriales a ráster. A la tabla de registro se agregó una columna llamada **INC** correspondiente a la ocurrencia de incendios, así mismo se le asignó un valor de **1** a este campo, esto representó la variable numérica para identificar las áreas que han sido afectadas por incendios forestales. Mediante la herramienta *cell statistics* de ArcGis 10.3 se realizó la sumatoria de píxeles (cada píxel con un valor de 1) de los años 1997 al 2015 dando como resultado 12 categorías de reincidencia de incendios. De acuerdo a la distribución de percentiles (cuartiles) y los valores extremos se establecieron agrupaciones por frecuencia y número de incendios (Figura 13).

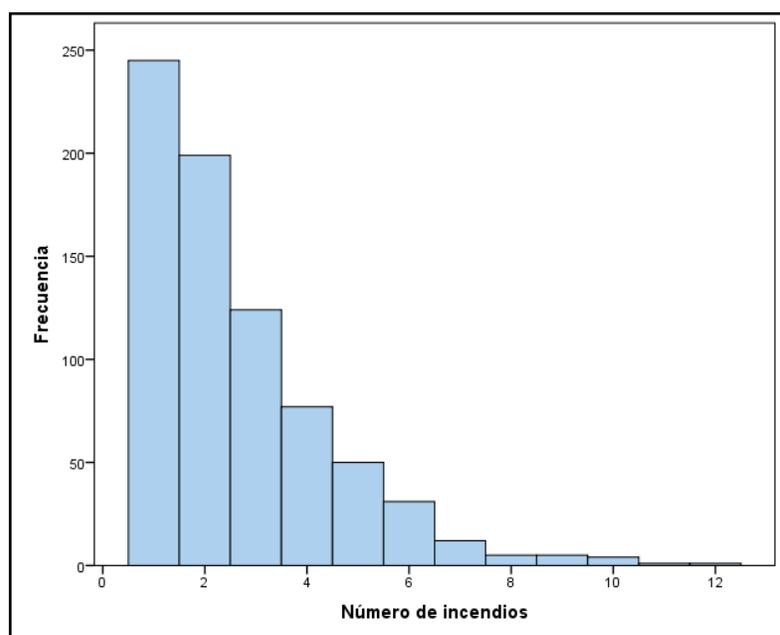


Figura 13. Gráfico de distribución de datos de recurrencia de incendios forestales.

Fuente: Elaborado por Ligia Bermúdez.

4.4.2.2. Análisis estadístico de Incendios forestales

❖ *Obtención de Métricas de Paisaje*

Un incendio forestal afecta la vegetación y con ello el paisaje. Partiendo del supuesto de que existe una posible relación entre la estructura del paisaje y la recurrencia de incendios se procedió a analizar métricas del paisaje mediante la extensión *Patch Analyst 5.2* del programa ArcGis 10.3. Se utilizó como base la capa de los polígonos de incendios de 1997 al 2015 en formato ráster obtenida en el paso anterior. A continuación se presentan las métricas analizadas (Cuadro 6).

Cuadro 6. Métricas de paisaje

Métrica	Siglas	Descripción
Índice de forma ponderado	AWMSI	Indica la complejidad de las teselas
Índice de forma medio	MSI	Indica la complejidad de las teselas
Media del radio perímetro-área	MPAR	Media de los radios del perímetro y área de un grupo de teselas
Dimensión fractal media del parche	MPDF	Indica como es de compleja la forma de la tesela
Dimensión fractal media de la tesela ponderada	AWMPFD	Media de cada uno de los índices de cómo es de compleja la forma de la tesela por su área
Borde total	TE	Sumatoria de los perímetros de cada una de las teselas
Densidad de Bordes	ED	Cantidad relativa de bordes en la superficie del paisaje o clase
Borde medio de la tesela	MPE	Cantidad media de borde por tesela
Tamaño medio de la tesela	MPS	Es la superficie media de los parches del paisaje o una determinada clase
Área total del paisaje	TLA	Área total de la unidad de paisaje
Área de clase	CA	Área correspondiente al conjunto de fragmentos que constituyen una clase determinada
Desviación típica del tamaño de la tesela	PSSD	Indica el tamaño de las teselas en el paisaje

Fuente: Adaptado de Costafreda, 2009.

❖ *Correlación de variables*

Se realizó una intersección de las capas de cobertura de la tierra, suelos y las métricas de paisaje. Se obtuvo una base con 754 datos que corresponden al número de incendios asociados con las variables anteriormente citadas. Para estudiar las relaciones que hay

entre la variable de interés que es el número de incendios y las variables de métricas, vegetación, tipo de suelos y pendientes se utilizó el coeficiente de *Correlación de Pearson* que es el indicado para datos de tipo cuantitativos.

El coeficiente de correlación de *Pearson* puede tomar valores entre -1 o 1; si toma valores cercanos a cero significa que la correlación es nula, no hay relación entre las variables y conforme se va acercando a -1 o 1 la correlación es alta, el signo indica la dirección, si el coeficiente es negativo hay una correlación inversa y cuando es positiva la relación es directa, conforme una variable aumenta la otra también o conforme una variable disminuye la otra también.

En la prueba no se considera a una variable como independiente y otra como dependiente ya que no se evalúa la causalidad (Hernández, Fernández y Baptista, 2010). La correlación de estas variables es una medida del grado de variación de ambas variables donde existe una intensidad de asociación pero no como se mencionó anteriormente de causalidad. (Steel y Torrie, 1988).

4.4.3. Modelo de Vulnerabilidad

El modelo de vulnerabilidad fue diseñado con el fin de identificar las áreas donde los componentes económicos, ecológicos y sociales se verían afectados por un incendio forestal. El modelo se desarrolló en tres etapas: Una primera etapa donde se elaboró la base de datos de las ocho variables utilizadas y posteriormente se realizó el diseño cartográfico en formato ráster de cada una de las variables. La segunda etapa consistió en la asignación de pesos, esto se basó en la multiplicación de cada variable por un porcentaje estimado de acuerdo a la evaluación multicriterio realizada a expertos e investigadores del área protegida, que permitió determinar el grado de importancia de cada variable dentro del área de estudio (se ampliará esta metodología más adelante). La tercera etapa consistió en el cruce de las variables, esto consistió en sumar cada una de las variables para obtener como producto final un mapa de las áreas con alta, media o baja vulnerabilidad (Figura 14).

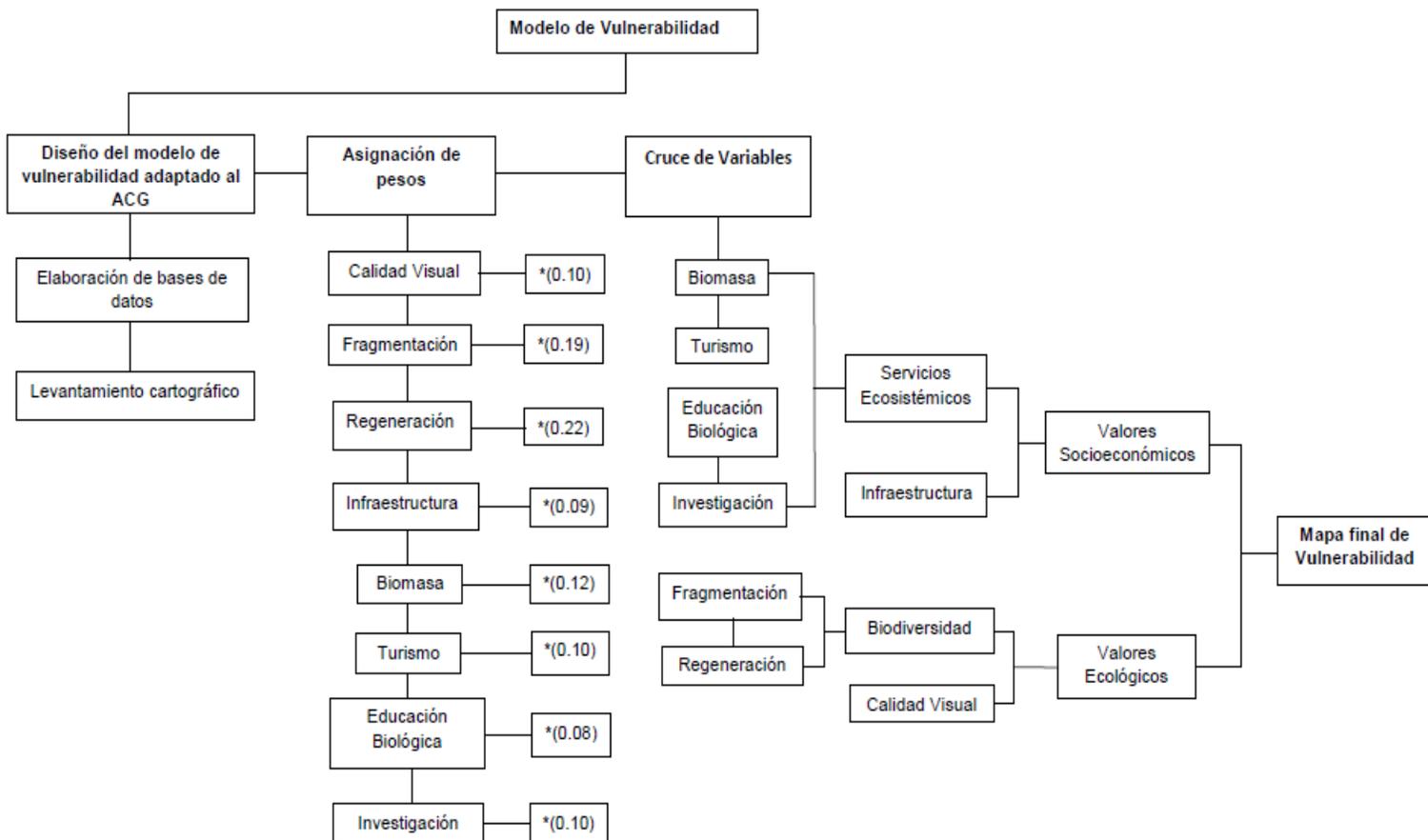


Figura 14. Metodología empleada para la elaboración del modelo de vulnerabilidad.

4.4.3.1. Diseño del Modelo de Vulnerabilidad

Para la generación del modelo de vulnerabilidad se evaluaron los componentes ecológicos y socioeconómicos importantes dentro del área protegida. El modelo que se diseñó fue cualitativo debido a la diversidad de datos de cada variable; así mismo se categorizaron estos datos en un rango asociado a la vulnerabilidad alta, media y baja. A continuación se presenta el diagrama de vulnerabilidad diseñado por Chuvieco *et al.*, (2012) y adaptado para el sitio de estudio dentro del ACG (Figura 15).

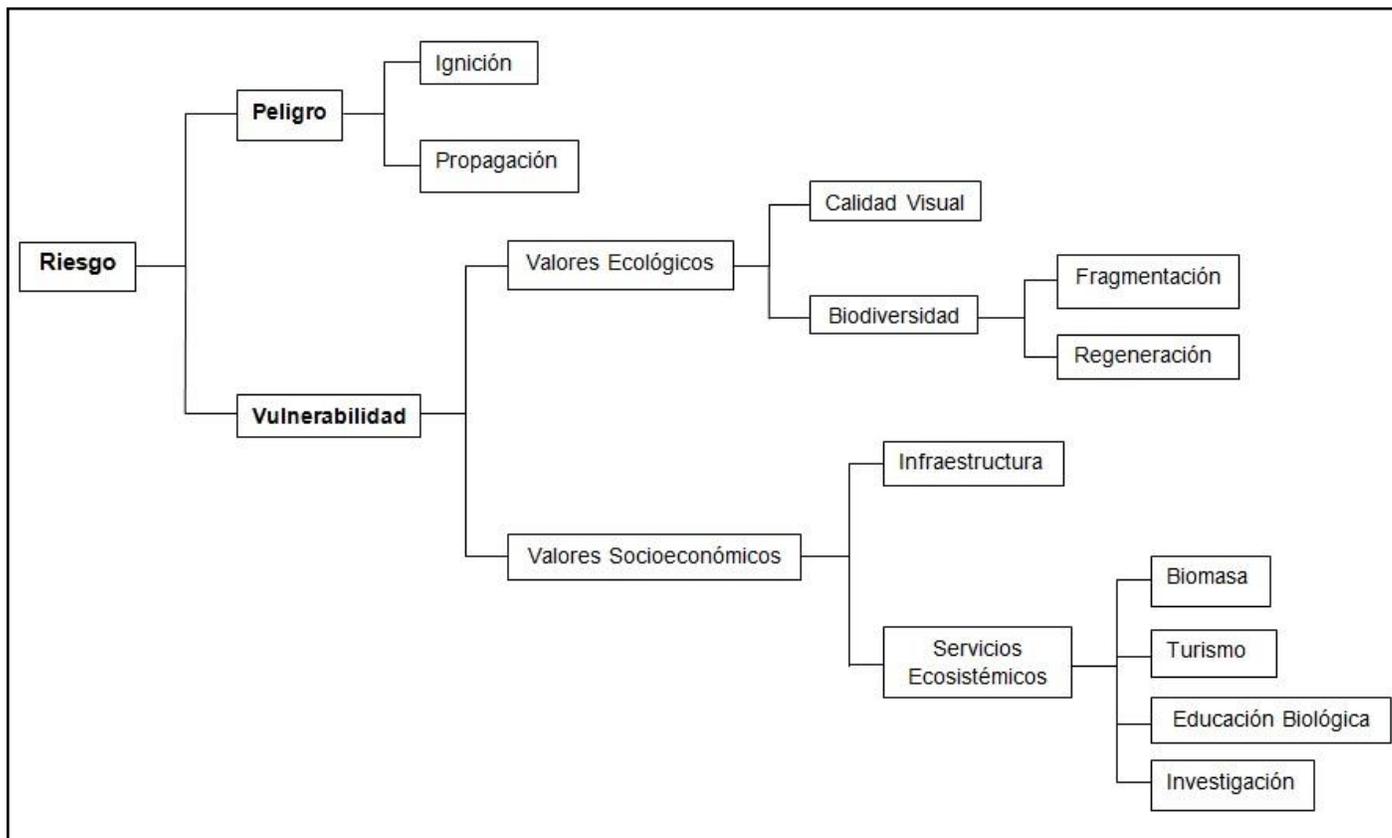


Figura 15. Diagrama de vulnerabilidad. Fuente: Adaptado de Chuvieco *et al.*, (2012)

De acuerdo al diagrama anterior basado en los componentes ecológicos y socioeconómicos se establecieron cuatro parámetros: calidad visual, biodiversidad, infraestructura y servicios ecosistémicos. Dentro de estos parámetros se evaluaron varios aspectos como como fragmentación, regeneración, biomasa, turismo, educación biológica e investigación. Los rangos de vulnerabilidad (alto, medio y bajo) establecidos para cada elemento del modelo fueron consultados y sometidos a criterio experto por el personal del ACG.

4.4.3.1.1. Valores Ecológicos

Dentro de los valores ecológicos se evaluaron los siguientes parámetros: calidad visual y biodiversidad.

1. Calidad Visual

El análisis del paisaje es una técnica que permite estudiar la dinámica visual del entorno, permitiendo estimar las zonas dentro del área de estudio que serían afectadas en su calidad visual si se diera un eventual incendio forestal. Se procedió a realizar un recorrido por el área de estudio y con ayuda del personal del Programa de Manejo del Fuego del ACG se identificaron 25 puntos de interés visual los cuales fueron georeferenciados mediante equipo de posicionamiento global GPS (Figura 16).

Cada punto georeferenciado cuenta con dos parámetros que corresponden a la altura del observador (se estima una altura de 2 metros) y el radio (para el caso de estudio se estimó 20 km que corresponde a la distancia que el ojo humano puede enfocar hasta el horizonte). La herramienta utilizada fue *Viewshed* del *3D Analyst Tools* del programa *ArcGis 10.3*. Este método realiza un análisis de los puntos GPS recolectados, con respecto al modelo de elevación digital del área de estudio, el radio asignado y la altura del observador, lo que finalmente da un modelo de las áreas visibles y no visibles.

Los valores dados por el modelo fueron de 0 a 7; 0 corresponde a las áreas no visibles que ya el mismo programa identifica, para efecto de las áreas visibles se identificó con una vulnerabilidad alta las áreas cercanas a los puntos de muestreo con valores de 1 a 3,5; mientras que las áreas más alejadas se les asignó una categoría de vulnerabilidad media con valores de 3,6 a 7.

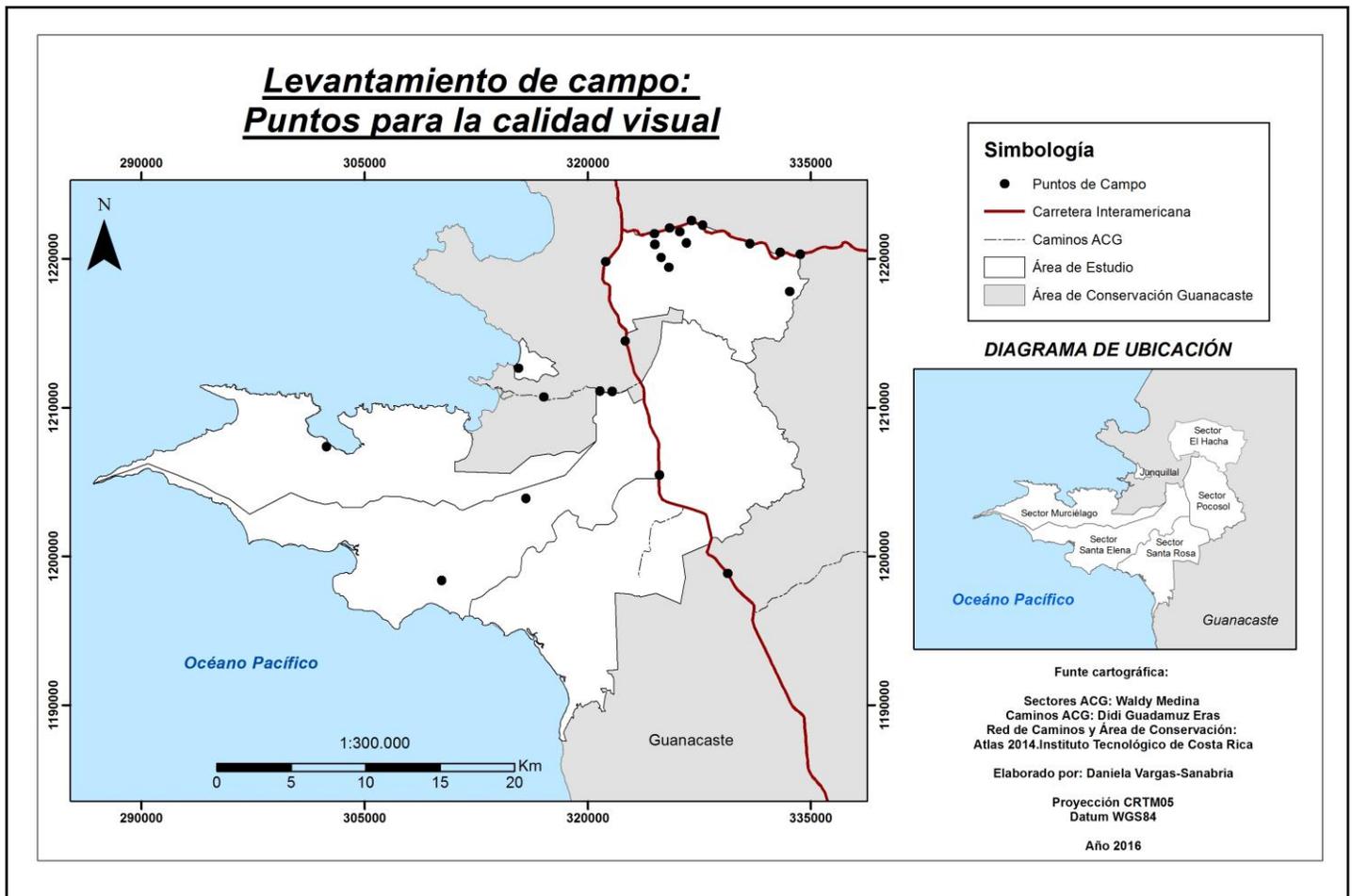


Figura 16. Mapa de levantamiento de campo para el análisis de la calidad visual.

2. Biodiversidad

La biodiversidad es la variación hereditaria, número y disposición de organismos vivos en los tres niveles de organización de los genes (variación genética, variación entre especies y variación entre ecosistemas) dentro de una población, comunidad o ecosistema (Wilson, 1997, Burley, 2002). De acuerdo a Burley (2002), la biodiversidad a nivel de paisaje se relaciona con la variación en la composición, estructura y función de los ecosistemas.

Dentro del contexto de los valores ecológicos se estima la biodiversidad del paisaje a del área de estudio Para determinar este parámetro fue necesaria la suma de dos aspectos: la fragmentación de hábitats y la regeneración de estadios sucesionales.

❖ *Regeneración*

Para determinar el nivel de sucesión de las especies fue necesario establecer los distintos tipos de vegetación dentro del área de estudio, para ello se tomó como base el mapa de cobertura de la tierra 2015. Los años de regeneración por estadio se identificaron tomando como referencia el modelo hipotético de la secuencia ocurrida durante el crecimiento del bosque secundario establecido por Guariguata y Ostertag (2001); el cual fue adaptado al área de estudio. A continuación se muestra en el Cuadro 7 la caracterización establecida por cobertura, tiempo en sucesión y rango de vulnerabilidad.

Cuadro 7. Secuencia temporal de la sucesión de hábitats adaptado de Guariguata y Ostertag (2001).

Cobertura	Tiempo en sucesión	Rango de Vulnerabilidad
Sabanas y Pastos	1-5 años	Bajo
Bosque Tempranos	5-20 años	Medio
Bosque Secundarios, Bosque de Galería, Manglar, Bosques tardíos y Bosque seco enano	20-100 años	Alto

❖ *Fragmentación*

La fragmentación es considerada como uno de los procesos de degradación que causan más daño a la biodiversidad (Farina, 1998); por esta razón es considerada como un aspecto importante dentro de la evaluación de áreas vulnerables ante incendios forestales. En el modelo de vulnerabilidad se establece que las áreas con baja fragmentación son más vulnerables.

Para el análisis de la fragmentación se procedió a caracterizar el mapa de cobertura de la tierra 2015 del área de estudio (obtenido como producto del objetivo uno) en dos clases: **bosque** (incluye bosque temprano, bosque intermedio, bosque tardío, bosque seco enano, bosque de galería y manglar) y **no bosque** (sabana-pasto, laguna, infraestructura, sombras o nubes); además se diseñó una cuadrícula o red (formato shapefile) de 1 km x 1km (este valor fue validado por el personal del ACG) (Figura 17).

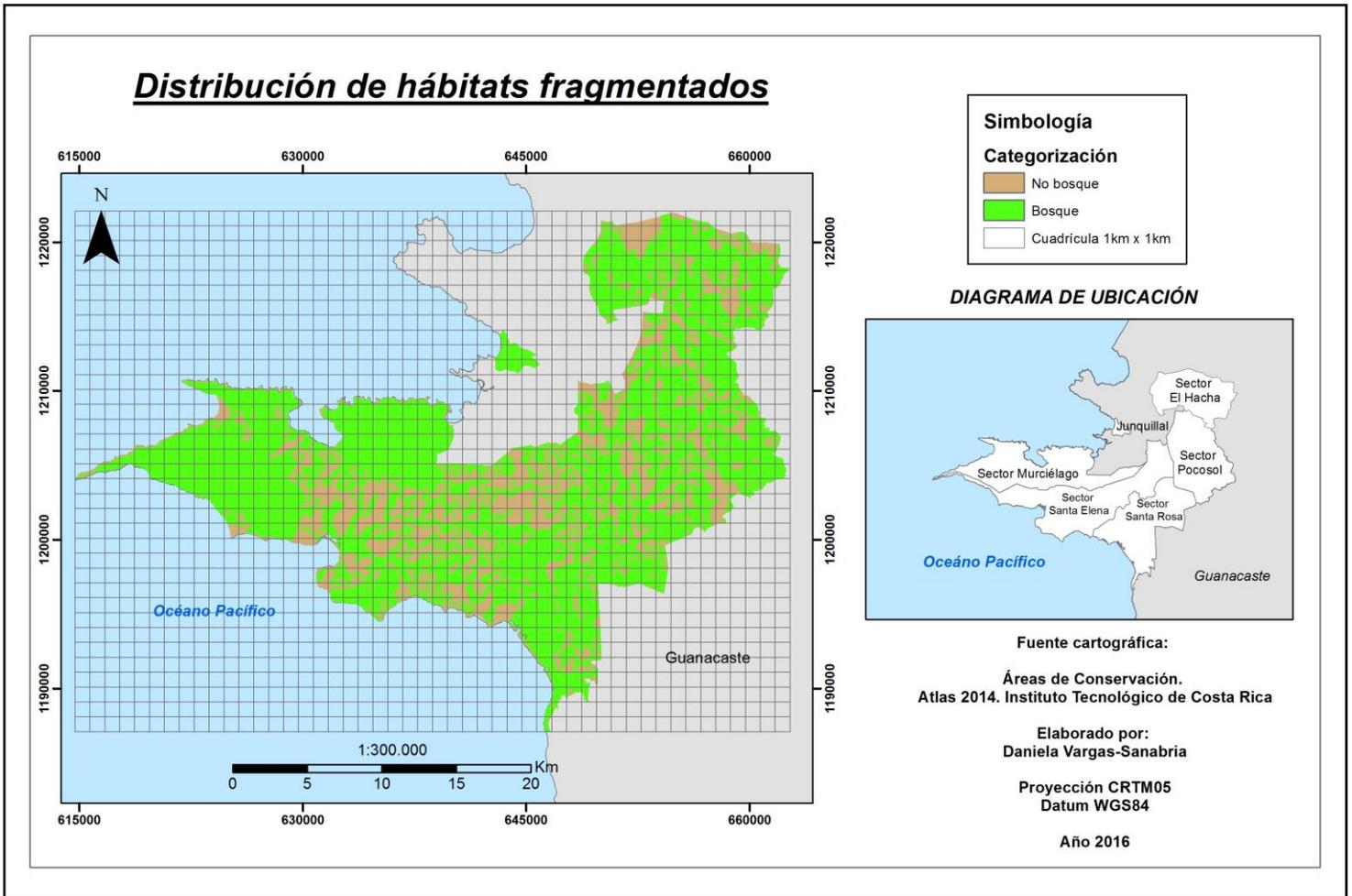


Figura 17. Categorización de las clases de bosque / no bosque y diseño de cuadrícula.

Posteriormente se analizó la fragmentación mediante la herramienta “*Zonal Statistics*” del programa *ArcGis 10.3*. Ésta herramienta calcula una estadística para cada zona (la capa de la zona corresponde a la cuadrícula de 1km x 1 km) de acuerdo a la capa de valores (el archivo ráster de categorías de bosque y no bosque). El producto final de este análisis es una capa ráster con los valores de fragmentación analizados por cada zona de 1km².

Para la clasificación de los valores de vulnerabilidad por fragmentación (alto-medio-bajo) se adaptaron los rangos establecidos para el índice de fragmentación de Díaz, 2003 (Cuadro 8).

Cuadro 8. Rango de vulnerabilidad en áreas fragmentadas para los sectores de estudio del ACG, adaptado de Díaz (2003)

Fragmentación	Vulnerabilidad
$F < 1 \leq 0,7$	Alto
$F = 0,7 \leq 0,5$	Media
$F < 0,5$	Bajo

4.4.3.1.2. Valores Socioeconómicos

1. Infraestructura

Dentro de este parámetro se consideraron solo las edificaciones dentro del área de estudio: la casona Santa Rosa y las infraestructuras del SINAC y áreas circundantes. Para el levantamiento de estos polígonos se utilizó el programa *Google Earth*. Para este parámetro solo se contemplaron dos rangos de vulnerabilidad: alto y medio debido a que solo se contaba con ésta información (Cuadro 9).

Cuadro 9. Rango de vulnerabilidad para las edificaciones en los sectores de estudio del ACG. Fuente: Elaboración propia.

Edificación	Rango
Casona	Alta
Infraestructura del SINAC y áreas circundantes	Media

2. Servicios Ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos son generalmente afectados por incendios forestales (Chuvienco *et al.*, 2013); generando pérdidas ecológicas y económicas dentro del área protegida. Para el desarrollo de este parámetro se consideraron los siguientes cuatro aspectos:

❖ *Biomasa*

Para la elaboración del mapa de biomasa del área de estudio se tomó como base el mapa de cobertura de la tierra 2015, referencias bibliográficas y consulta experta al personal del ACG. Se estimó la biomasa área, aunque los incendios forestales en Costa Rica son superficiales, el fuego mantiene un contacto indirecto con las especies, afectando la corteza de las especies, debilitándolas y disminuyendo su crecimiento, ocasionando muerte de individuos y con esto la reducción de la biomasa y los contenidos de carbono del área de estudio.

Los valores de biomasa para las categorías de coberturas de la tierra fueron los descritos por Imbach, Coto y Salinas, (2005); la única variable dentro de los valores establecidos para las categorías es la del bosque temprano ya que se tomó como referencia el valor aportado por Ulate (2011) (Cuadro 10).

Así mismo se tomaron algunas consideraciones establecidas por Imbach, Coto y Salinas, (2005):

- ❖ Para los bosques primarios el contenido de biomasa utilizado fue el asignado a los ecosistemas naturales en las zonas de vida de Costa Rica, partiendo de que no han sido alterados.
- ❖ Los humedales y lagunas presentan contenidos de biomasa dispersa por lo tanto no se puede categorizar.
- ❖ Reagrupación de las categorías en 4 clases generales por contenido de biomasa: muy bajo (0 a 5 ton/ha), baja (5 a 40 ton/ha), media (40 a 100 ton /ha) y alta (>100 ton/ha). Para esta investigación se agrupo en una sola clase los rangos muy bajo y bajo (Cuadro 11), esto debido a que el modelo solo presenta tres rangos jerárquicos por lo tanto debía homogenizarse esta variable para evitar problemas a la hora de realizar la sumatoria final de las variables.

Cuadro 10. Biomasa aérea en categorías de cobertura de la tierra para los sectores de estudio del ACG.

Cobertura	Biomasa (Ton*ha)	Carbón	Referencia
Bosque Natural (Bosque de Galería, Bosque Enano Seco, Bosque Tardío)	248,48	124,24	Imbach, Coto y Salinas (2005)
Manglar	229,5	114,525	Imbach, Coto y Salinas (2005)
Bosque Secundarios	99,07	49,535	Imbach, Coto y Salinas (2005)
Bosque Temprano	13,11	6,555	Ulate, (2011)
Pasturas	2,935	1,4675	Imbach, Coto y Salinas (2005)

Cuadro 11. Rango de vulnerabilidad para valores de biomasa en los sectores de estudio del ACG. Adaptado con datos de Imbach, Coto y Salinas (2005).

Valores ton/ha	Rango
>100	Alto
>40-100	Medio
0-40	Bajo

❖ *Turismo*

La estimación de la afluencia turística en el área protegida se analizó mediante el informe de visitación del 2013 del Área de Conservación Guanacaste (Rodríguez y Martínez, 2014) (Cuadro 12). Posteriormente se clasificó la cantidad de turistas en tres categorías (Cuadro 13).

Cuadro 12. Número de turistas por sector en el año 2013 en el ACG. Adaptado con datos de Martínez y Rodríguez (2014).

Sector	Nº de Visitantes
Santa Rosa	28442
Junquillal	9728
Murciélagos	1538
Santa Elena	0
Pocosol	0
El Hacha	0

Cuadro 13. Rango de vulnerabilidad de acuerdo a la cantidad de visitantes por sector en el ACG. Fuente: Elaboración propia.

Nº de Visitantes	Rango
0-5000	Bajo
>5000-10000	Media
>10000	Alta

❖ *Investigación*

De acuerdo a los datos obtenidos sobre la investigación en el ACG entre el periodo 2004-2012 (Blanco, 2013) se procedió a contabilizar la cantidad de investigaciones por sector (Cuadro 14).

Cuadro 14. Número de investigaciones por sector dentro del ACG. Adaptado con datos de Blanco (2013).

Sector	Nº de Investigaciones
Santa Rosa	113
Santa Elena	20
Murciélagos	7
Pocosol	2
El Hacha	1
Junquillal	0

Posterior a esto se elaboró el cuadro de valores de rango de vulnerabilidad con respecto al número de investigaciones realizadas en el área de estudio (Cuadro 15)

Cuadro 15. Rango de valores de vulnerabilidad de acuerdo a la cantidad de investigaciones en los sectores de estudio del ACG. Fuente: Elaboración propia

Nº de Investigaciones	Rango
0-10	Bajo
11-20	Media
>21	Alta

❖ *Programa Educación Biológica*

El programa de educación biológica contempla dentro de sus áreas de trabajo varios sectores que también corresponden al área de estudio de la presente investigación, por tal motivo, fue incluido este aspecto dentro de los servicios ecosistémicos del modelo. Los datos fueron suministrados por la coordinadora del programa la señora Gabriela Gutiérrez y basados en la cantidad de estudiantes por sector incluidos dentro del programa para el año 2015 (Cuadro 16) se procedió a estimar el rango de vulnerabilidad (Cuadro 17).

Cuadro 16. Número de estudiantes por sector de estudio del Programa de Educación Biológica del ACG, 2015.

Sector	Nº de estudiantes
Santa Rosa	995
El Hacha	246
Murciélago	188
Junquillal	188
Santa Elena	0
Pocosol	0

Cuadro 17. Rango de vulnerabilidad basada en la cantidad de estudiantes del Programa Educación Biológica. Fuente: Elaboración propia

Nº de estudiantes	Rango
0-150	Bajo
150-300	Medio
>300	Alto

4.4.3.2. Asignación de pesos

Dentro del modelo de vulnerabilidad se contó con ocho variables (fragmentación, biomasa, calidad visual, infraestructura, turismo, investigación, regeneración y educación biológica) las cuales tuvieron un nivel de importancia distinto dentro del área protegida; por lo tanto se debió asignar un valor a cada variable que permitiera identificar su

importancia tanto en el área protegida como para el modelo. Para asignar los pesos a cada variable se procedió de la siguiente manera:

Se realizó una evaluación multicriterio (Anexo 2) que consistió en obtener mediante una encuesta realizada al personal del ACG e investigadores, el punto de vista con respecto a la importancia de las variables dentro del área protegida. El siguiente cuadro muestra el resumen de las encuestas realizadas, así como el valor porcentual para cada variable (Cuadro 18).

Cuadro 18. Resumen de las asignaciones de valores mediante criterio experto.

Evaluación Multicriterio									
Variable	Criterio Experto					Total	Proporción	%	
	C1	C2	C3	C4	C5				
Fragmentación de hábitats	7	7	9	9	8	40	0,189	19	
Biomasa/Reservorios de carbono	4	6	7	8	1	26	0,123	12	
Atractivo Visual (paisaje)	6	5	3	4	4	22	0,104	10	
Infraestructura (Casona, estructuras del SINAC y áreas circundantes)	1	1	1	7	9	19	0,090	9	
Turismo	3	3	2	3	10	21	0,099	10	
Investigación	5	4	5	5	2	21	0,099	10	
Regeneración de estadios sucesionales	10	10	10	10	6	46	0,218	22	
Educación Biológica	2	2	4	1	7	16	0,075	8	
Valor Total						211		100	

Nota: El criterio experto se basó en la asignación de un valor de 1 a 10 dependiendo de la importancia de la variable dentro del área protegida. El valor total es la suma de los valores por cada variable, la proporción es el valor total entre el total de cada variable, luego esta proporción se multiplicaba por 100 y daba el porcentaje de cada variable dentro del modelo. Se asignó un código a cada criterio experto que se detalla a continuación: C1: Didi Guadamuz: Funcionario y encargado del área SIG del Programa de Manejo del Fuego en el ACG; C2: Julio Díaz, Coordinador del Programa de manejo del Fuego en el ACG; C3: Róger Blanco; Director de Investigación del ACG; C4: Carlos Campos, Investigador de la UNED; C5: Benjamín Álvarez: Cátedra de SIG de la UNED.

Para asignar cada valor porcentual a la variable se procedió a utilizar la siguiente fórmula ejecutada en la herramienta *Ráster Calculator* del programa *ArcGis 10.3*:

$$V = [(F * 0.19) + (B * 0.12) + (CV + 0.10) + (I * 0.10) + (T * 0.10) + (Inv * 0.10) + (R * 0.22) + (EB * 0.08)]$$

Dónde:

V=Vulnerabilidad

F = Fragmentación

B= Biomasa

CV= Calidad Visual

I =Infraestructura

T=Turismo

Inv= Investigación

R=Regeneración

EB= Educación Biológica

4.4.3.3. Cruce de variables

Para la elaboración del mapa final de vulnerabilidad se procedió a sumar todas las variables mediante la herramienta *Raster Calculator* del programa *ArcGis 10.3* y siguiendo los siguientes pasos:

1. Se sumaron las variables biomasa, investigación, turismo y educación biológica y se obtuvo el componente de servicios ecosistémicos.
2. Se sumó el componente de servicios ecosistémicos e infraestructura y se obtuvo los valores socioeconómicos
3. Para obtener el componente de biodiversidad se sumó la variable de regeneración y fragmentación.
4. El resultado del componente de biodiversidad se sumó con la calidad visual y se obtuvo los valores ecológicos
5. Se sumaron los valores socioeconómicos y valores ecológicos y como resultado se obtuvo el mapa final de vulnerabilidad.

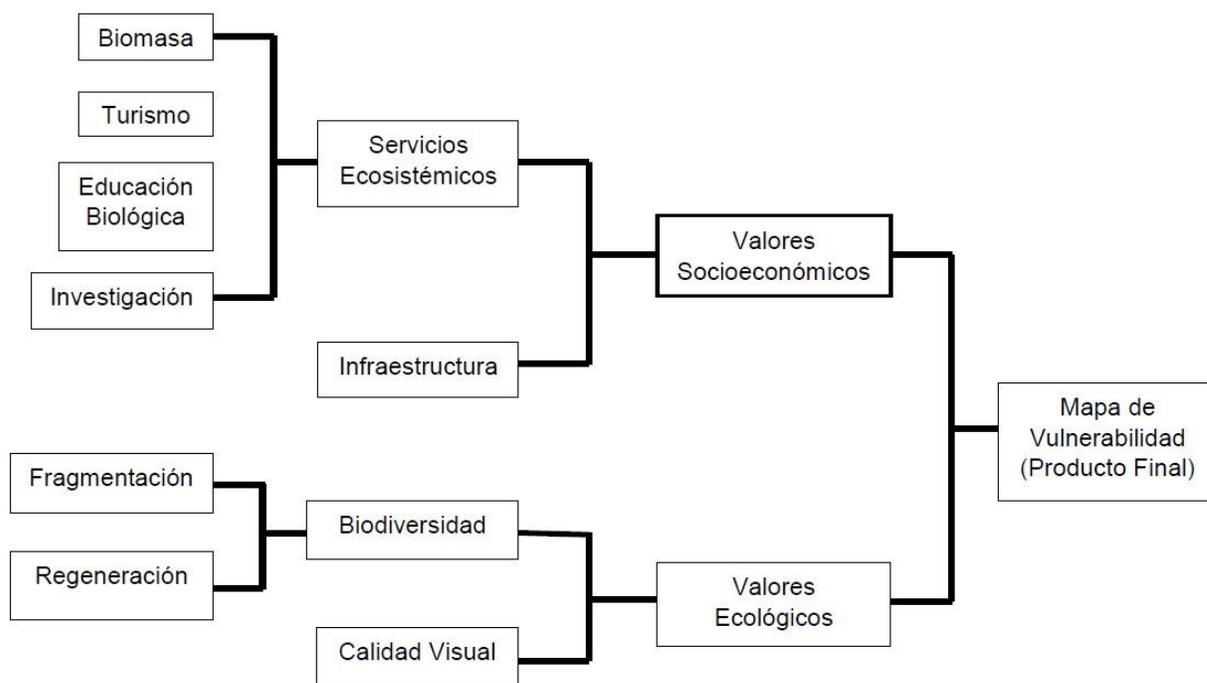


Figura 18. Diagrama jerárquico de pasos para obtener el mapa final de vulnerabilidad.

Fuente: Elaboración Propia

5. Resultados

5.1. Delimitación de coberturas

Validación de datos y clasificación

La imagen LANDSAT 8 OLI utilizada, correspondiente al mes de abril del año 2015 (código LC80160522015092LGN00) presentó un promedio de cobertura de nubes de 36.25%; sin embargo cabe destacar que la cubierta nubosa se extendía muy poco sobre el área de estudio perjudicando solo pequeñas áreas para la clasificación. Aunque se utilizaron varios algoritmos de clasificación, se obtuvo un mejor resultado con los clasificadores *Maximum Likelihood* y *Neural Network*, ambos clasificadores se utilizaron para la elaboración del mapa final.

Mediante la matriz de confusión (Cuadro 19) se validaron los datos del trabajo de campo con lo clasificado por el programa. La exactitud del productor total fue de 81.48% y la exactitud del usuario total fue de 78.40%. Cabe mencionar que se realizó un promedio general de los datos reportados mediante las estadísticas de ambos clasificadores.

Cuadro 19. Matriz de error de algoritmos de clasificación supervisada.

Tipo de Cobertura	Clasificador	Exactitud del productor	Exactitud del Usuario
Bosque Tardío	Maximum Likelihood	77.78%	83.33%
Bosque Intermedio	Maximum Likelihood	77.78%	70.00%
Bosque Temprano	Maximum Likelihood	77.78%	67.31%
Sabana-Pasto	Maximum Likelihood	91.11%	95.35%
Bosque de Galería	Maximum Likelihood	73.33%	82.50%
Manglar	Neural Network	91.11%	71.93%
Total		81.48%	78.40%

Nota. El clasificador *Maximum Likelihood* tuvo una precisión de 81.11% y el coeficiente Kappa de 0.77; el clasificador *Neural Network* tuvo una precisión de 60.37% y el coeficiente Kappa 0.54. Fuente: Elaboración propia.

Las clases sabana-pasto junto a la clase manglar tuvieron una mayor exactitud de productor, esto indica que estas dos categorías fueron las que mejor se clasificaron. La cobertura de bosque de galería tuvo una menor exactitud de productor; mientras que, las categorías forestales (bosque tardío, bosque intermedio y bosque temprano) presentaron una igualdad entre la exactitud del productor. Finalmente las categorías de infraestructura, nubes, bosque enano seco y laguna fueron clasificadas de forma manual y validadas

mediante trabajo de campo y criterio experto, por lo cual no fueron tomadas en cuenta en el cuadro de la matriz de error.

Mapa de Cobertura de la Tierra

Luego de realizar la ejecución del árbol de decisión se obtuvo el mapa final de cobertura de la tierra 2015 con diez categorías (bosque de galería, bosque intermedio, bosque seco enano, bosque tardío, bosque temprano, infraestructura, laguna, manglar, sabana-pasto y sombras o nubes) para los seis sectores estudiados del Área de Conservación Guanacaste (Figura 19).

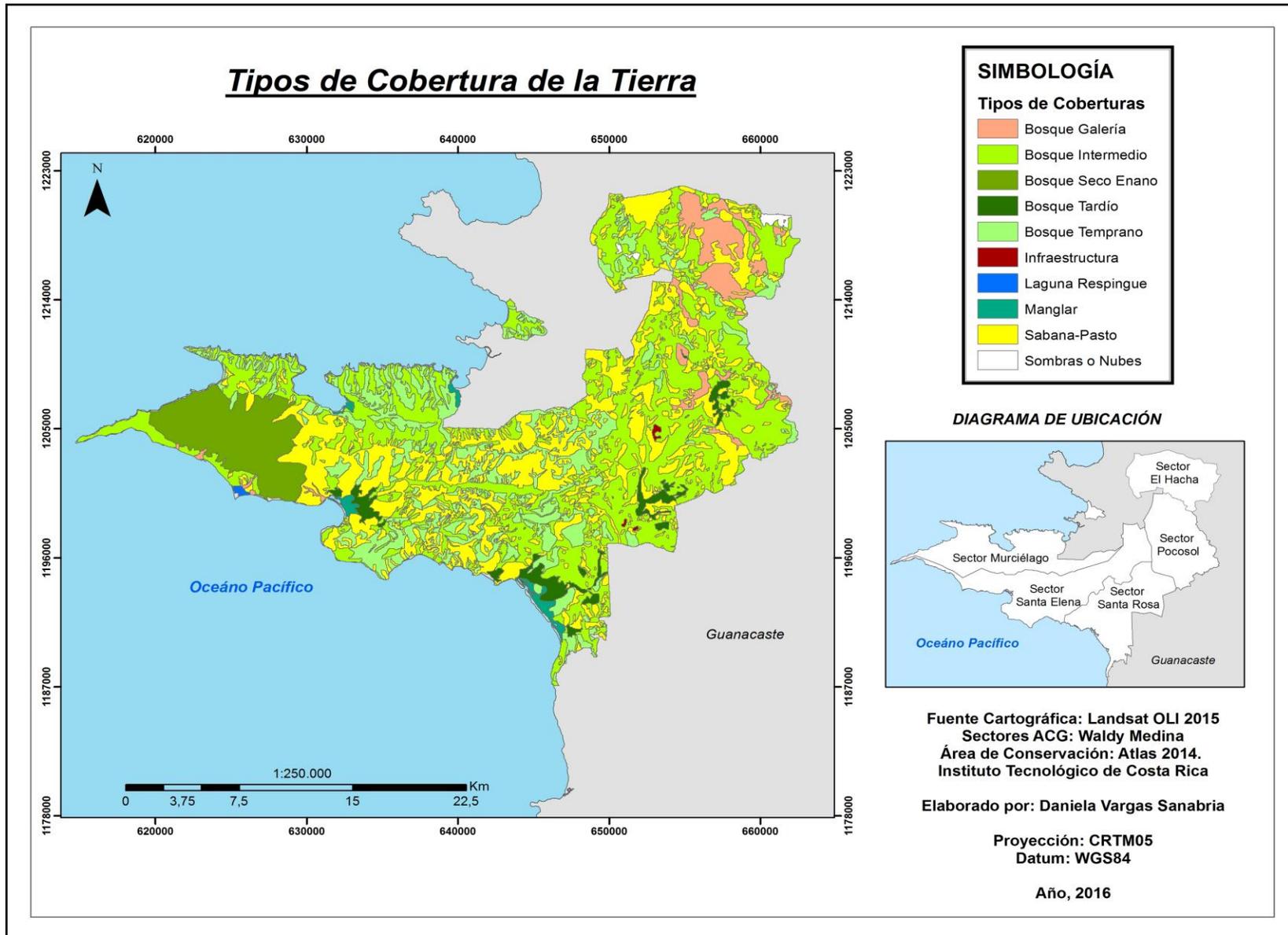


Figura 19. Mapa de cobertura de la tierra 2015 para los sectores de estudio Santa Rosa, Santa Elena, Murciélago, Junquillal, Pocosal y El Hacha.

La sucesión de bosque intermedio es la más dominante en el área de estudio, cerca de 22253,67 hectáreas (38.91%), seguido de las sabanas y pastos que tienen una extensión de 16079,22 hectáreas (28.1%); es importante aclarar que las categorías sabana y pasto se incluyeron en una sola, debido a que, presentaban una baja discriminación entre ambas, ya que, los píxeles y las firmas espectrales eran muy similares. En el mapa se presenta una distribución geográfica de coberturas vegetales, donde puede notarse el dominio del bosque seco enano en el sector de Murciélago y sector Santa Elena. Este bosque enano se extiende alrededor de 4529,7 hectáreas que corresponden a un 7.92% del área de estudio (Cuadro 20).

Cuadro 20. Cantidad de hectáreas y porcentaje por tipo de cobertura en el área de estudio, 2015.

Cobertura	Hectáreas (ha)	Porcentaje (%)
Bosque Intermedio	22253,67	38.91
Sabana-Pasto	16079,22	28.1
Bosque Temprano	9458,1	16.53
Bosque Enano Seco	4529,7	7.92
Bosque de Galería	2611,08	4.56
Bosque Tardío	1505,7	2.63
Manglar	485,82	0.85
Nubes	185,49	0.32
Infraestructura	56,7	0.10
Laguna	47,52	0.08
TOTAL	57213 ha	100%

Nota: Los datos se obtuvieron mediante la tabla de atributos que despliega el programa *Environmental Systems Research Institute*. ArcGis 10.3. Fuente: Elaboración propia.

El bosque temprano muestra una extensión de 9458,1 hectáreas (16.53%) localizado en la parte central del área de estudio con pequeños parches cerca del sector el Hacha. Los bosques de galería ocupan alrededor de 2611,08 hectáreas (4.56%) y son más frecuentes también cerca del sector el Hacha y Pocosol con algunos parches alrededor de afluentes cercanos a los manglares y la costa.

La Laguna Respingue (sitio Ramsar) ocupa dentro del área de estudio un 0.08% correspondiente a unas 47,52 hectáreas, cerca la costa. Por otro lado, los manglares se

extienden cerca de 485,82 hectáreas (0.85%) donde se incluyen el manglar de Potrero Grande, playa Naranja, bahía Bolaños y el de bahía Santa Elena.

La presencia de manglares en el ACG muestra la variabilidad de ecosistemas del área. Estos manglares catalogados como sitios Rámsar se caracterizan por encontrarse en un bosque tropical seco. El manglar Potrero Cerrado es uno de los más importantes por ser el más desarrollado e intacto de la región. Se encuentra expuesto a condiciones de salinidad altas, fuertes vientos y altas temperaturas; además de estar rodeado de un mosaico de bosque semicaducifolio y bosque seco caducifolio el cual se asienta sobre el suelo de la península de Santa Elena compuesto por roca proveniente del manto terrestre (Blanco, 2012).

Dentro de la categoría infraestructura se incluyen las edificaciones ubicadas en el sector Pocosol, donde se encuentra el Programa de Manejo del Fuego, el centro de investigación del Bosque Seco Tropical en Santa Rosa, el comedor, habitaciones y oficinas alrededor, así como la Casona. Esta categoría cubre una extensión de 56,7 hectáreas (0,10%). Las nubes y sombras corresponden a la última categoría que consta de 185,49 hectáreas (0,32%), se incluyó debido a que genera una gran influencia a la hora de clasificar las categorías y dificulta identificar el tipo de coberturas forestales presentes en esa área.

5.2. Dinámica de los Incendios Forestales

De acuerdo al análisis realizado de polígonos desde el año 1997 al 2015 se identificó afectación de incendios forestales en los seis sectores de estudio. Los datos obtenidos de los polígonos indican que alrededor de 9368 hectáreas en el sector Murciélagos se han quemado siendo un 72% del total del área; 6310 hectáreas quemadas en el sector Pocosol correspondiente a un 66% del área; 5272 hectáreas en el sector El Hacha que representan el 65% del área total, 4058 hectáreas en el sector Santa Elena que han afectado cerca del 28% total del área; 3086 hectáreas en el sector Santa Rosa que representan un 26% del área total y por último 397 hectáreas en el sector de Junquillal que han afectado un 90% del área total del sector. En total se han afectado por incendios forestales durante los últimos 18 años un 49% del área de estudio, alrededor de 28.491 hectáreas (Cuadro 21).

El análisis estadístico de la distribución de incendios forestales de los años 1997 al 2015 determinó 4 categorías de ocurrencia y recurrencia: 1 incendio, 2 a 3 incendios, 4 a 5 incendios y mayor a 6 incendios. Existe una recurrencia en incendios forestales en los seis sectores de estudio, sin embargo la recurrencia es más evidente en los límites de los sectores El Hacha, Santa Elena y Murciélago (Figura 20). Los datos muestran que cerca de 7009.11 hectáreas quemadas donde solo ha existido 1 incendio forestal; alrededor de 3812.77 hectáreas en áreas donde hay una recurrencia de 2 a 3 incendios; 1309.46 hectáreas donde la recurrencia es de 4 a 5 incendios y 250.19 hectáreas en áreas donde existe una recurrencia mayor a 6 incendios; para un total de 12381.53 hectáreas.

Cuadro 21. Cantidad de hectáreas quemadas por sector de 1997 al 2015.

Sector	Área total (ha)	Área quemada (ha)	Porcentaje %
Murciélago	12937,423	9368	72
El Hacha	9847,841	6310	65
Pocosol	7981,854	5272	66
Santa Rosa	15288	4058	26
Santa Elena	11066,737	3086	28
Junquillal	438,463	397	90
Total	57560,318	28491	49

Fuente: Elaboración propia.

Recurrencia de Incendios entre 1997-2015

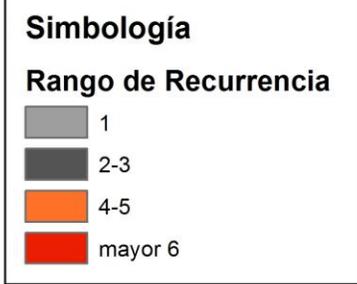
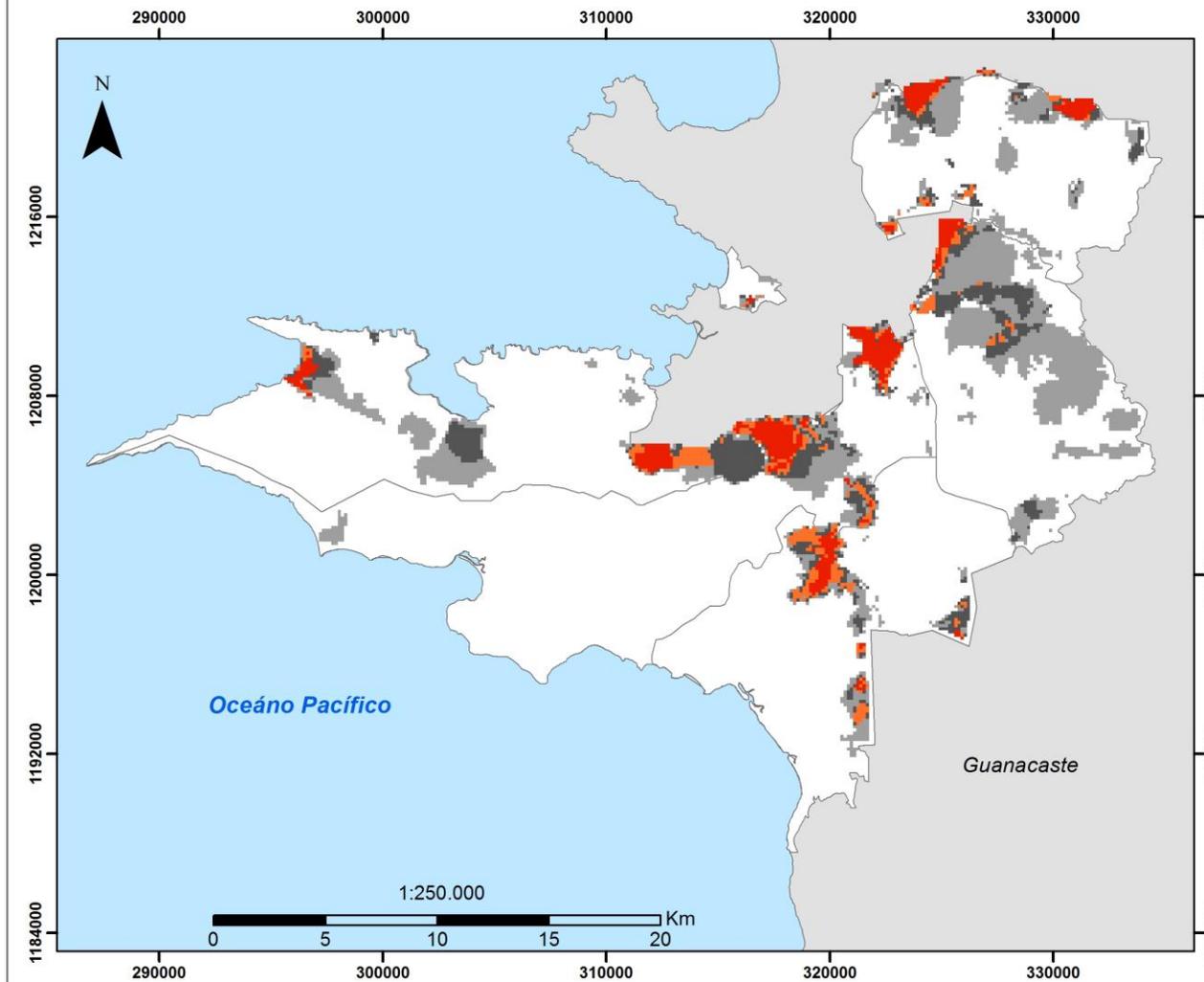


DIAGRAMA DE UBICACIÓN



Fuente cartográfica:

Sectores ACG: Waldy Medina
 Polígonos de Incendios: Didi Guadamuz
 Áreas de Conservación: Atlas 2014.
 Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Elaborado por:
 Daniela Vargas-Sanabria

**Proyección CRTM05
 Datum WGS84**

Año 2016

Figura 20. Mapa de recurrencia de incendios del área de estudio entre el periodo 1997- 2015.

De acuerdo al análisis de correlación de Pearson realizado entre el número de incendios, la cobertura de la tierra, tipo de suelo, métricas de paisaje y pendientes; se encontraron correlaciones. Correlación negativa con el índice medio de forma (Pearson, $r=-.093, n=754, p=.010$), lo que indica entre mayor sea la cantidad de incendios en un área, el índice medio de forma de los fragmentos será menor, lo que implica más regular en cuanto a su forma; Correlación negativa con bosques secundarios (Pearson, $r=-.096, n=754, p=.008$), esto indica que entre mayor número de incendios en un área, las áreas con cobertura de bosque secundario disminuyen; Correlación negativa con bosques tempranos (Pearson, $r=-.090, n=754, p=.014$), lo que muestra que entre mayor sea la cantidad de incendios en un área, las hectáreas cubiertas por bosques tempranos disminuirán; Correlación negativa con suelos Entisoles (Pearson, $r=-.083, n=754, p=.023$); y Correlación negativa con suelos Inceptisoles (Pearson, $r=-.090, n=754, p=.014$), sugiriendo que entre mayor sea la cantidad de incendios en un área, las hectáreas cubiertas por Entisoles e Inceptisoles disminuirán.

5.3. Modelo de Vulnerabilidad de Incendios Forestales

Dentro del modelo de vulnerabilidad de incendios forestales se contemplaron los componentes denominados valores ecológicos y valores socioeconómicos.

❖ Valores Ecológicos

Dentro de éste componente se logró identificar las áreas que son vistas desde puntos estratégicos y de interés para el área protegida. Las áreas en rojo indican calidad visual altamente vulnerable, estas áreas se encuentran por la carretera interamericana, la entrada al Parque Nacional Santa Rosa y la carretera a Santa Cecilia, al norte del cerro el Hacha.

Las áreas con amarillo muestran una vulnerabilidad media en áreas donde hasta cierta distancia se aprecia el paisaje sin embargo el impacto visual de un incendio forestal no tendría una relevancia como en las áreas mencionadas anteriormente. Por último las áreas de color verde muestran una calidad visual baja, es decir que son áreas que no se verían afectadas visualmente si hubiese un incendio, muchas de éstas zonas son accesibles solo para el personal del área de conservación o por la topografía del área son de difícil visibilidad (Figura 21).

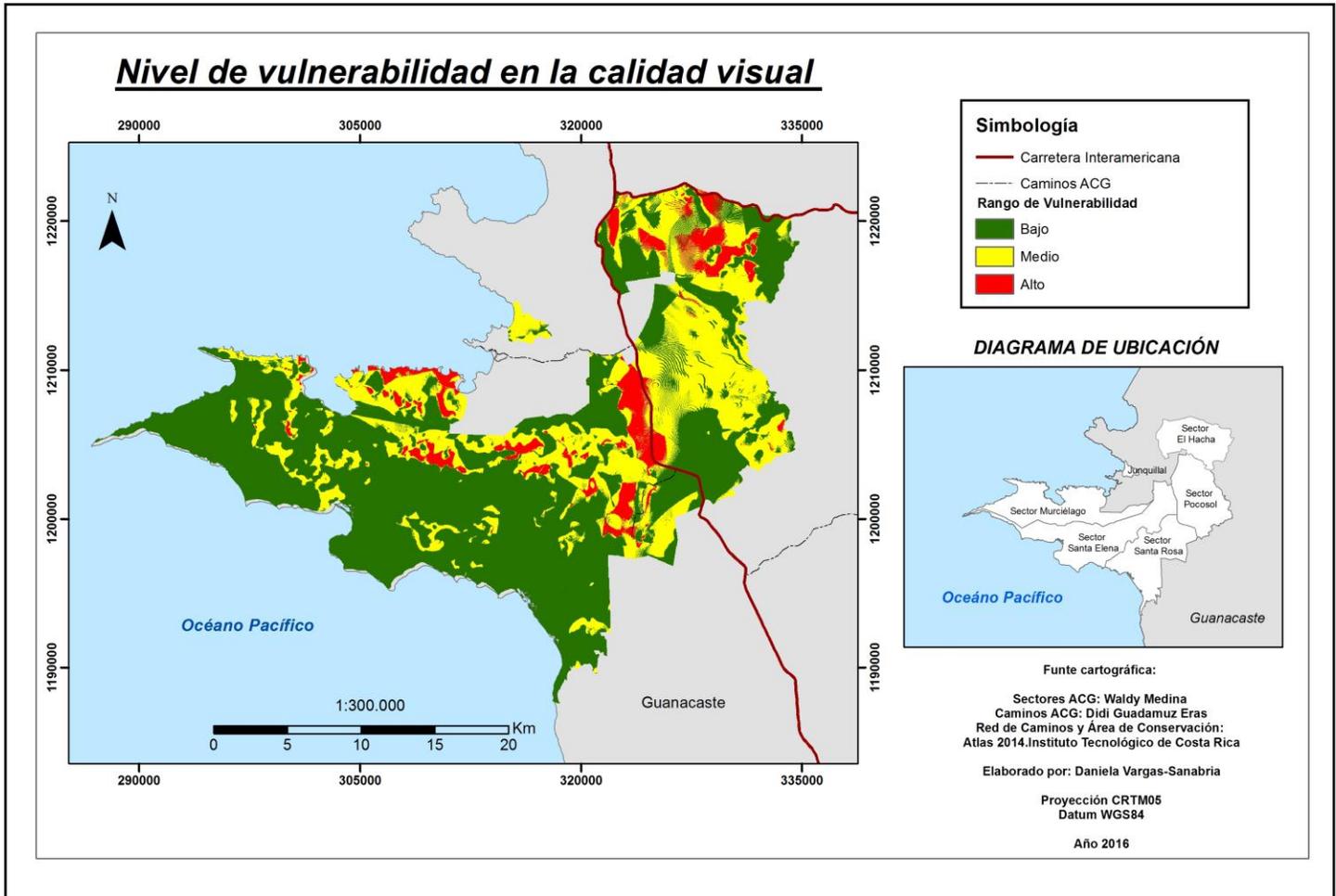


Figura 21. Mapa del nivel de vulnerabilidad en la calidad visual del sitio de estudio.

Por otro lado, se obtuvo la distribución geográfica de vulnerabilidad en áreas fragmentadas a nivel paisajístico. Las áreas con menor fragmentación son las más vulnerables ante los incendios forestales como es el caso del sector Murciélago y Junquillal que presentan áreas más homogenizadas; seguido el sector Santa Rosa, El Hacha y Pocosol. Por último en el sector Santa Elena predomina una media y baja vulnerabilidad. Las áreas con media y baja vulnerabilidad a incendios forestales son más heterogéneas y se componen por lo general de parches de cobertura como sabanas, pastos, bosques tempranos e intermedios (Figura 22).

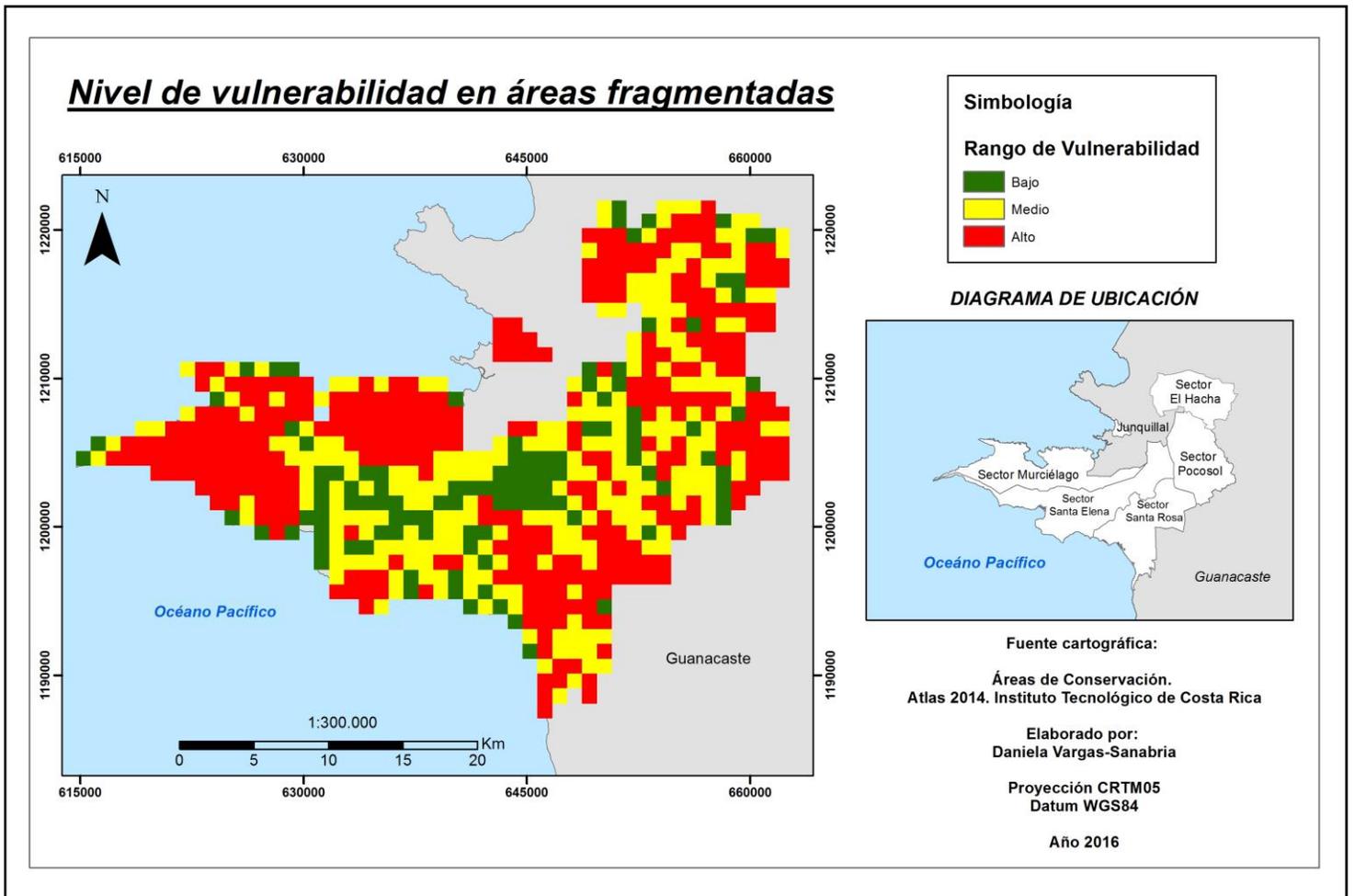


Figura 22. Mapa del nivel de vulnerabilidad en áreas fragmentadas en los sectores de estudio del ACG.

De acuerdo al análisis del tiempo en la regeneración de las especies, se determinó que existe una vulnerabilidad alta ante incendios forestales en estadios sucesionales avanzados como bosques de galería, bosque intermedio, bosque tardío y bosque seco enano. Así mismo se logró identificar una vulnerabilidad media y baja en estadios sucesionales menos avanzados como bosques tempranos, sabanas y pastos, donde existe una presencia de especies adaptadas al fuego dada la recurrencia de incendios forestales en estos sectores (Figura 23).

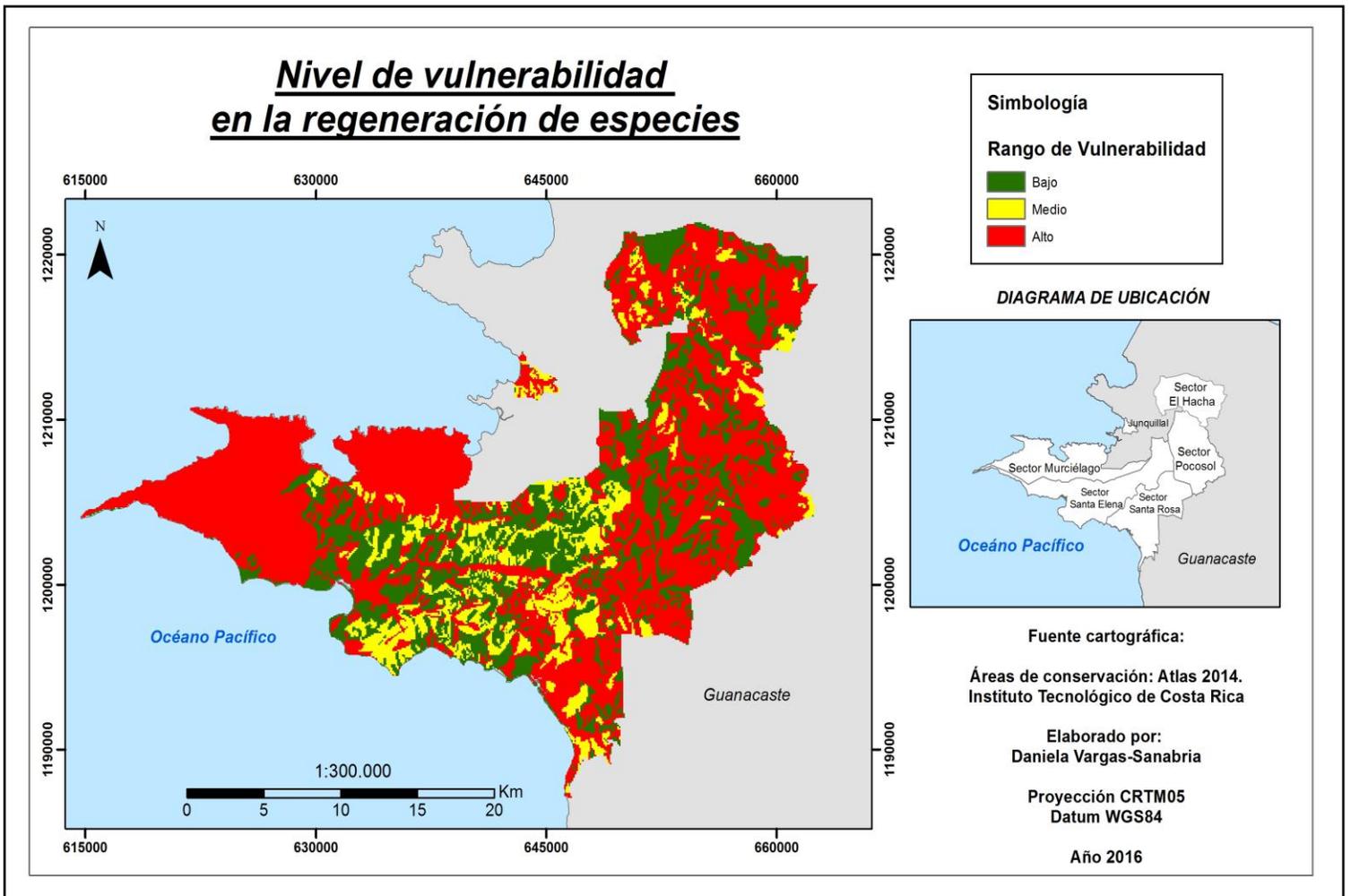


Figura 23. Mapa del nivel de vulnerabilidad en la regeneración de especies ante incendios forestales en el área de estudio.

❖ *Valores Socioeconómicos*

Como parte del componente socioeconómico se evaluó la infraestructura de los sectores de estudio. Se identificó la Casona, ubicada en el sector Santa Rosa, como una edificación muy vulnerable ante incendios forestales, seguido por una vulnerabilidad media, las edificaciones del SINAC y áreas circundantes ubicadas en los sectores Santa Rosa, Pocosol y Santa Elena (Figura 24).

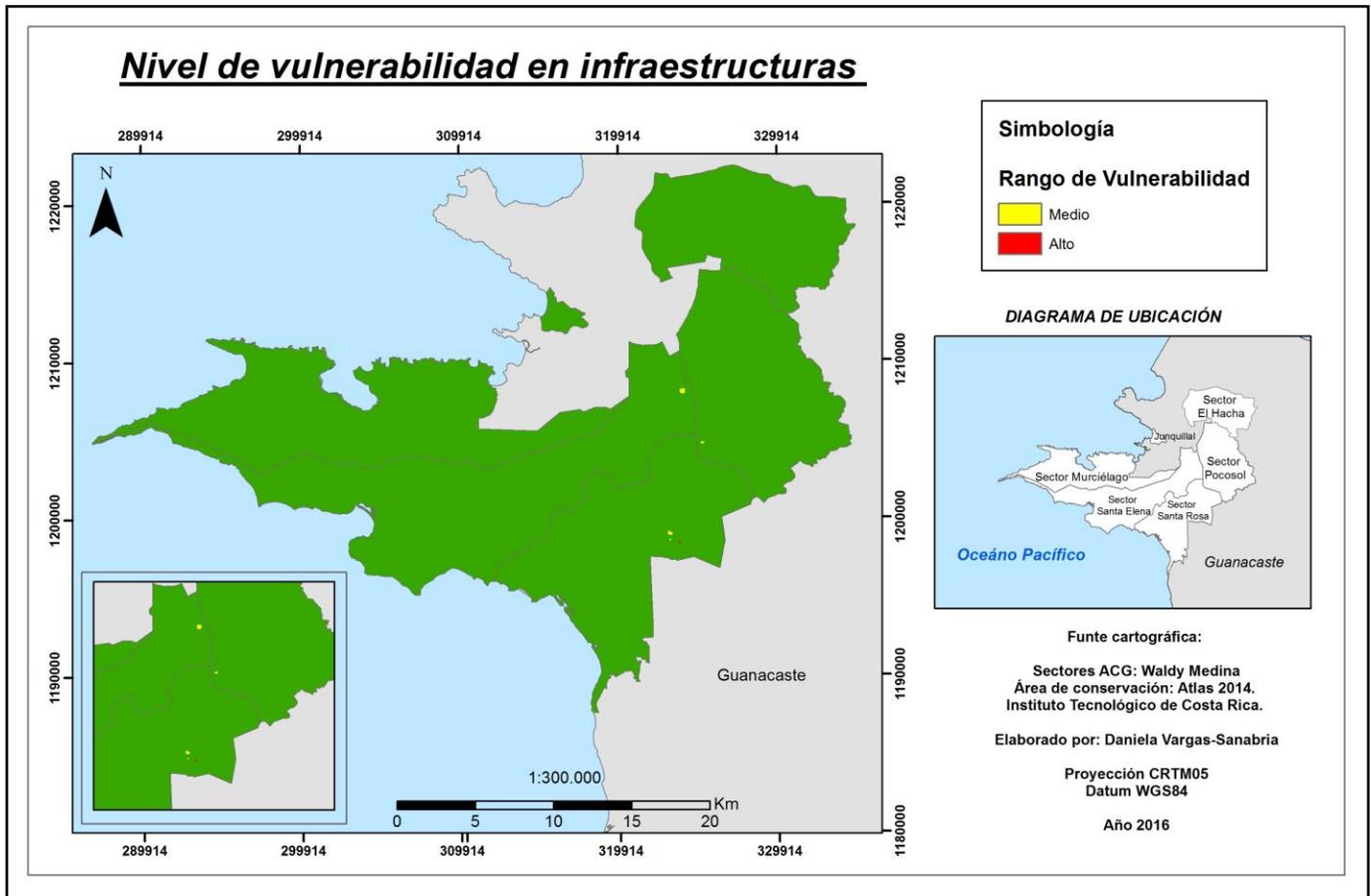


Figura 24. Mapa del nivel de vulnerabilidad en la infraestructura del sector de estudio dentro del ACG.

La distribución de la biomasa (ton/ha) se encuentra en mayor cantidad en los sectores que han sido poco impactados por incendios forestales, como es el caso del sector Murciélago y la península de Santa Elena, algunos parches de bosque de galería, bosques tardíos y en los manglares de Potrero Cerrado y Naranjo, la vulnerabilidad en estas áreas es alta debido a que representa un alto contenido de biomasa dentro del sector de estudio del ACG. Los valores de vulnerabilidad media responden a una representativa cantidad de biomasa en las áreas con bosques intermedios y se distribuyen por casi toda el área de estudio; mientras que, las áreas con baja cantidad de biomasa son las que contienen bosque temprano y extensiones de sabana-pasto donde existe más actividad de fuegos y por lo tanto una baja vulnerabilidad (Figura 25).

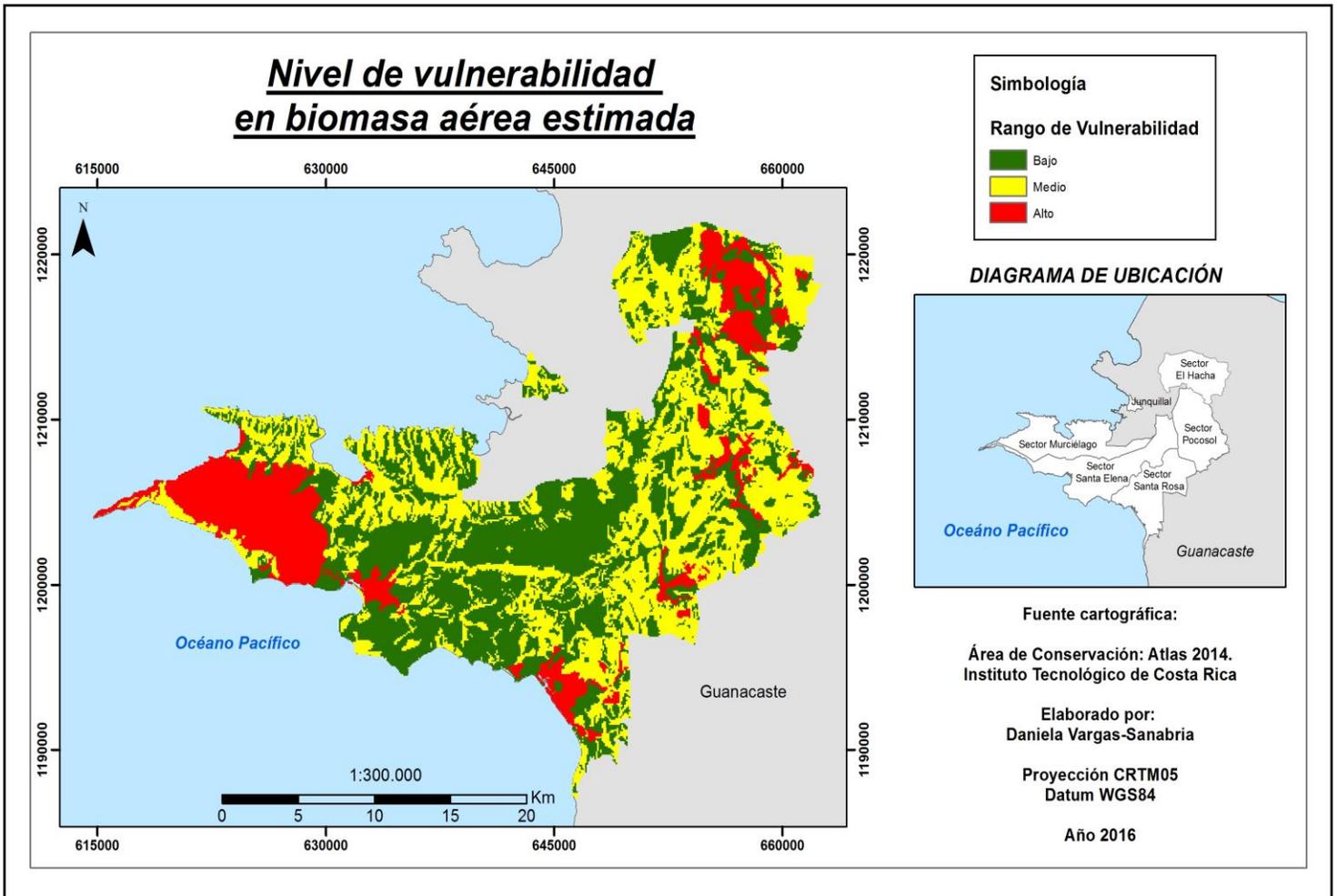


Figura 25. Mapa del nivel de vulnerabilidad en Biomasa aérea estimada (ton/ha) en los sectores de estudio del ACG.

El sector Santa Rosa presenta una vulnerabilidad alta por la afluencia de turismo debido a los distintos puntos de recreación que tiene. Con una vulnerabilidad media están los sectores Murciélago y Junquillal donde la afluencia turística es menor y por último los sectores Santa Elena, Pocosol y el Hacha no presentan desarrollo turístico por lo tanto presentan baja vulnerabilidad (Figura 26).

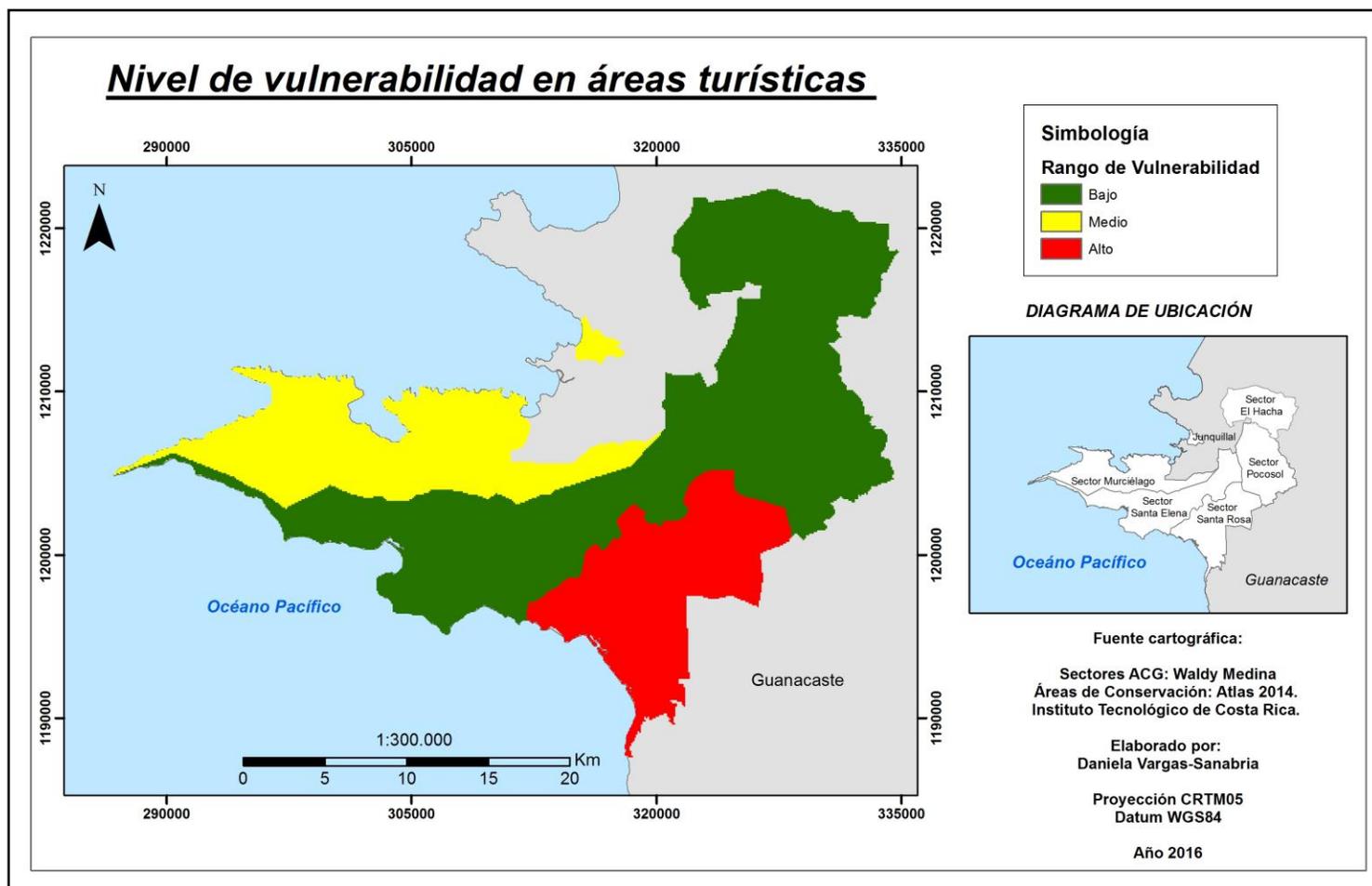


Figura 26. Mapa del nivel de vulnerabilidad ante incendios forestales en áreas de afluencia turística en los sectores de estudio del ACG.

El sector Santa Rosa se ha convertido en uno de los lugares con mayor cantidad de investigaciones, la poca perturbación de incendios forestales dentro de éste sector y la confluencia de investigadores hacen que tenga una vulnerabilidad alta. El sector Santa Elena presenta una vulnerabilidad media, por otro lado los sectores con menos desarrollo investigativo son Pocosol, El Hacha, Junquillal y Murciélago los cuales presentan una vulnerabilidad baja (Figura 27).

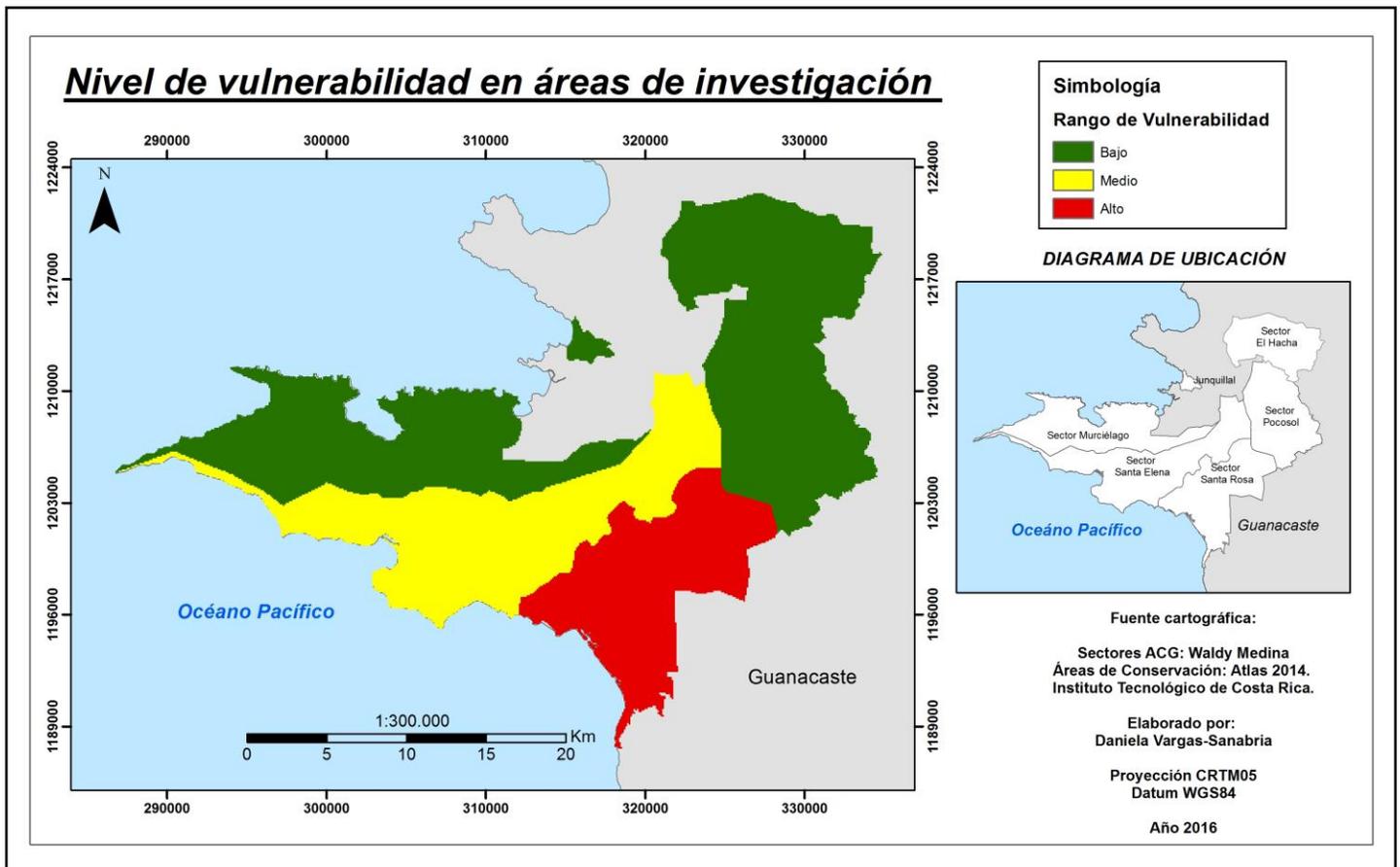


Figura 27. Mapa del nivel de vulnerabilidad en áreas con desarrollo investigativo en los sectores de estudio dentro del ACG

El desarrollo de la educación biológica dentro del ACG se ha centrado en labores en el sector Santa Rosa y la confluencia de estudiantes de distintos centros educativos es mayor que en otros sectores de estudio por lo que identificó una vulnerabilidad alta. El sector Junquillal y Murciélago representan las áreas de estudio costero, predominando una vulnerabilidad media mientras el sector Santa Elena y Pocosol presentan una vulnerabilidad baja, el desarrollo del PEB en este sector es bajo (Figura 28).

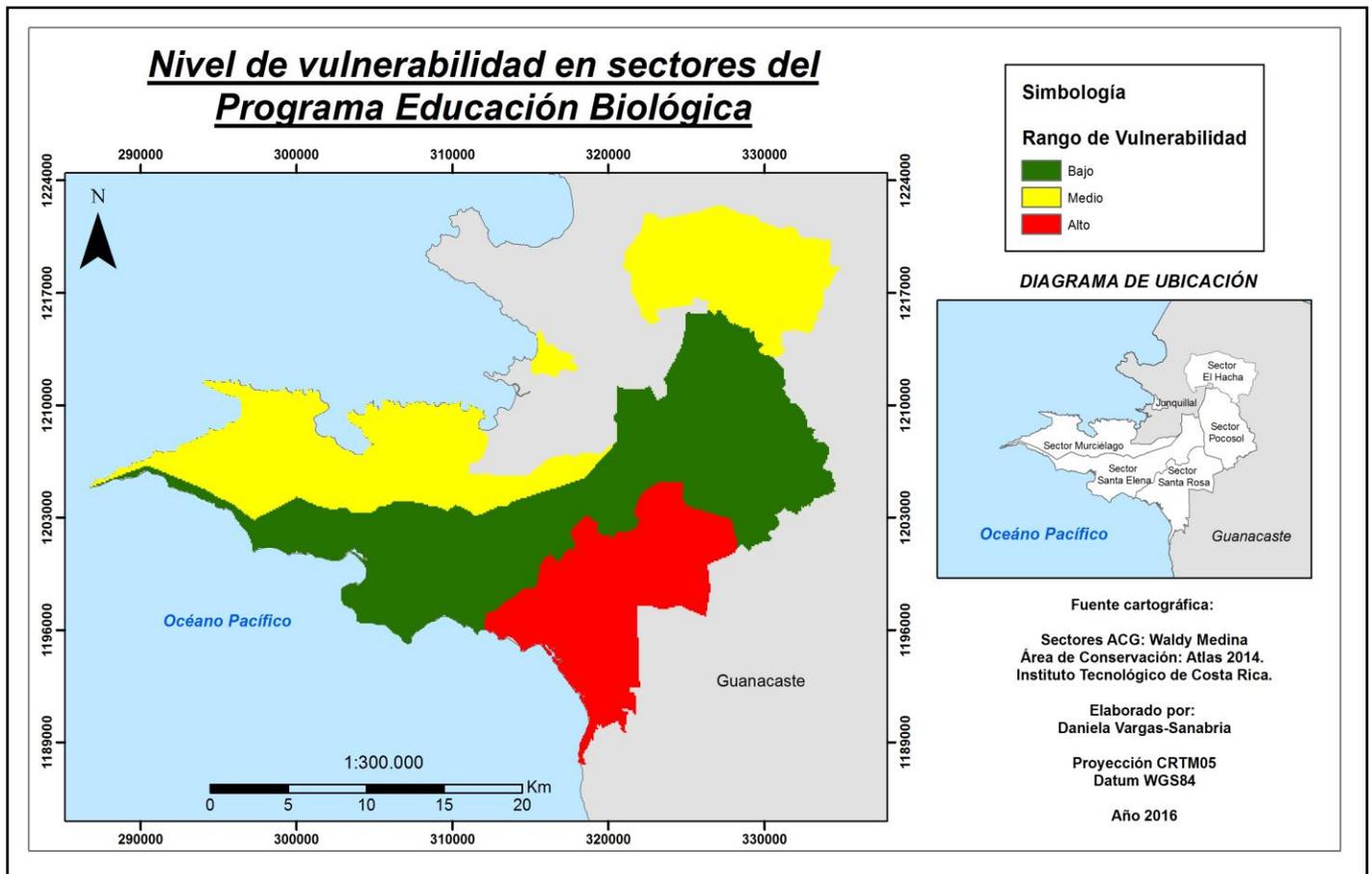


Figura 28. Mapa del nivel de vulnerabilidad según el desarrollo de actividades de Educación Biológica dentro del ACG.

Modelo final de vulnerabilidad

Se obtuvo la distribución geoespacial del nivel de vulnerabilidad a incendios forestales de los sectores de estudio, integrado por la sumatoria de factores ecológicos y socioeconómicos que serían afectados potencialmente por un incendio forestal. Las áreas más vulnerables corresponden a las regiones donde se han dado pocos o ningún incendio forestal como es el caso del sector Murciélagos y la parte oeste del sector Santa Rosa y algunas áreas del sector El Hacha. Las regiones con vulnerabilidad media como el sector Pocosol y parte de Junquillal y con baja vulnerabilidad se encontraron áreas que han sido afectadas por incendios forestales de forma recurrente como la parte central del sector Santa Elena y la parte norte del sector El Hacha (Figura 29).

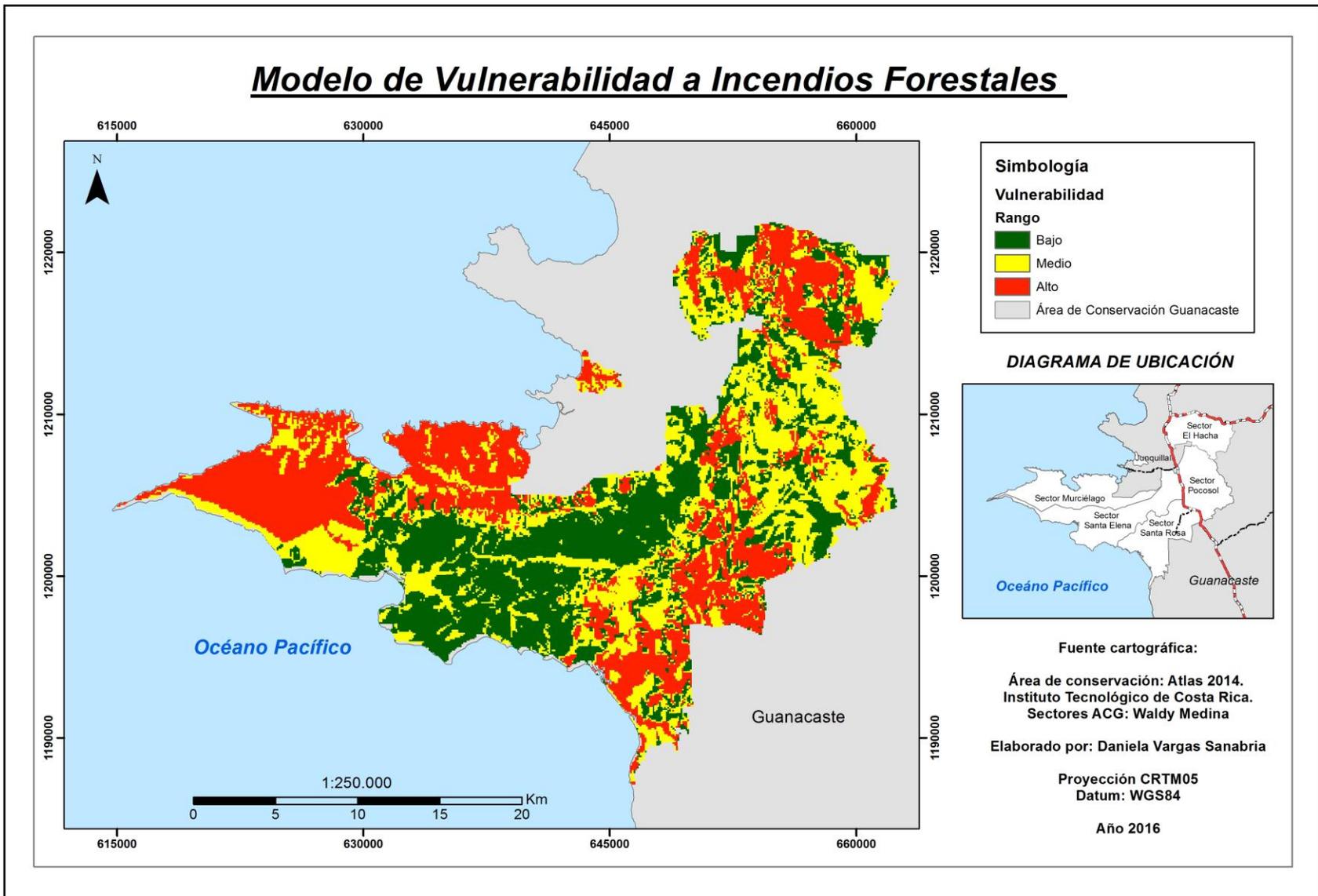


Figura 29. Mapa final de áreas vulnerables ante incendios forestales en los sectores de estudio del Área de Conservación Guanacaste.

6. Discusión

6.1. Delimitación de coberturas

Análisis de datos y clasificación

Existen tres tipos de métodos de clasificación: supervisada, no supervisado y mixto. Para el caso de estudio se utilizó el método supervisado porque se tenía conocimiento del área de estudio debido al trabajo de campo que se había realizado previamente. Chuvieco (2010) menciona la importancia de utilizar este método cuando se tiene una mayor familiaridad con el área de estudio debido a que existe una mejor interpretación sobre la delimitación de áreas de entrenamiento lo que generará una mayor fiabilidad en los datos.

Durante el proceso de clasificación supervisada se aplicaron seis algoritmos de los cuales los mejores resultados se obtuvieron con *Maximum Likelihood* y *Neural Network*. *Maximum Likelihood* es un algoritmo utilizado de manera frecuente en la percepción remota o teledetección. Es un método de fácil ejecución e interpretación de resultados, además de que mantiene una distribución original de los datos, sin embargo, García-Mora y Mas (2008) indican que en muchas ocasiones este método suele fallar en identificar categorías de uso del suelo. Los resultados de este algoritmo mostraron una buena clasificación de las coberturas con excepción del manglar, el cual fue mejor clasificado por el algoritmo *Neural Network*, procedimiento no lineal que se ajusta para que los resultados sean muy parecidos a la información que se introduce mediante el proceso de entrenamiento (García -Mora y Mas, 2008).

Estudios recientes plantean que la clasificación de imágenes satelitales con *Neural Network* presenta más ventajas comparado con los clasificadores tradicionales como el *Maximum Likelihood* debido a que hay mayor flexibilidad y adaptabilidad a los resultados y porque existe una tolerancia ante niveles altos de información (Giraldo y Barrero, 2012); además no asumen distribuciones normales de las categorías por lo que son independientes del tipo de distribución, por esto cuando son comparados con otros clasificadores resultan ser mejores.

Es importante resaltar que este algoritmo solo mostró mejores resultados en una sola categoría de las diez que se estaban analizando, esta situación puede deberse según Chuvieco (2010) a que la discriminación de las muestras de las áreas de entrenamiento

se adecuan mejor a los clasificadores convencionales y también por la cantidad de bandas y categorías analizadas, si son muchas tienden a dar resultados no tan precisos. La utilización de un árbol de decisión para la ejecución del mapa de coberturas respondió a la necesidad de solucionar algunos problemas obtenidos en la clasificación. Pal y Mather (2001) consideran que los árboles de decisión clasifican de manera eficiente los datos así como son una herramienta computacional eficaz para solucionar problemas de clasificaciones y algoritmos en la teledetección.

Análisis de coberturas de la tierra

Existe una notable presencia de bosque en sucesión intermedia dentro del área de estudio en el ACG. La misma observación fue descrita por Arroyo-Mora *et al.*, (2005a) documentando que parte de los bosques que visualizaron con más presencia en la Región Chorotega (Guanacaste) fueron bosques secundarios, los cuales crecieron en lugares donde antiguamente existía la agricultura la cual fue removida en los años 80's y 90's dando paso al proceso de sucesión que tiene alrededor de 20 años.

Es importante recordar que durante la década de los años 60's hasta los años 80's las tierras del ACG eran dedicadas exclusivamente a ganadería, agricultura y explotación maderera, los bosques eran removidos para dar paso a grandes extensiones de pastos y sabanas. Cuando se crea el Parque Nacional Santa Rosa en 1971, posteriormente se adhiere el Parque Nacional Guanacaste alrededor de 1987 y se remueve el ganado cerca del año de 1990, empieza la restauración de bloques de bosque de sucesión secundaria (Janzen, 2000).

Las sabanas-pastos ocupan un 28.1% en extensión de área de estudio en el ACG. Estos tipos de cobertura han sido parte del área durante muchos años. Las sabanas por su parte son el resultado de la constante tala y quema de bosques, por lo general están dominadas por un solo tipo de gramíneas con algunos árboles característicos como *Byrsonima crassifolia* o *Curatella americana* que presentan resistencia al fuego (Boucher *et al.*, 1991).

El pasto jaragua (*Hyparrhenia rufa*) fue introducido cerca del año 1940 (Janzen, 2000), posterior a la creación del ACG y pese a esfuerzos en restauración de bosque, sigue proliferando en ciertas áreas que constantemente están siendo impactadas por incendios forestales, estas áreas que según Kauffman *et al.*, (2003) también resultan ser los biomas

más consumidos por el fuego en el bosque seco de México. Los pastos por lo general son especies resistentes al fuego y logran mantener y extender su cobertura (Boucher *et al.*, 1991).

R. Blanco (comunicación personal, 21 de diciembre 2015) comenta que no se puede hablar de una homogeneidad en años y regeneración de los tipos de cobertura existentes para toda el área protegida debido a una mezcla de condiciones climáticas, topográficas, edáficas y geológicas en la vegetación del ACG que afecta directamente la composición florística del lugar. Por ejemplo, la península de Santa Elena alberga un parche de bosque enano seco (también es conocido como bosque de bonsai), único en la región, que presenta especies de bosque nuboso en una de las áreas más secas de país, esto se debe a que las nubes provenientes del Caribe chocan contra los cerros de la península y los vientos provenientes de la costa pacífica chocan contra esta cortina de nubes, provocando que la cubierta nubosa se estacione sobre esta área y generando condiciones aptas para estas especies (Anexo 3).

Apenas un 2.63% de las 57.213 hectáreas de los seis sitios de estudio, corresponden a un bosque tardío o viejo, dentro de esta categoría se incluye el pequeño remante de bosque que se cree es original del bosque seco tropical que existió antes de que el territorio que hoy comprende Santa Rosa fuera convertido en pasturas. Arroyo-Mora *et al.*, (2005b) menciona que en muchas ocasiones este estadio se encuentra en áreas ribereñas o áreas que presentan condiciones de micro topografía donde el nivel freático es alto, no obstante, para este estudio se creó una categoría aparte donde se incluyó la mayoría de parches de bosque de galería que componen un 4.56% (2611,08) del área.

Adicionalmente Arroyo-Mora *et al.*, (2005b) indica que estas áreas de sucesión tardía no han sido totalmente alteradas. Por otro lado, Kalacska *et al.*, (2004) señala que por lo general estos estadios avanzados poseen individuos que se distribuyen de manera más uniforme entre un número de familias, así mismo de encontrarse presencia de especies de estadios tempranos lo que sugiere es que las áreas fueron perturbadas en algún momento.

De acuerdo al estudio realizado por Kalacska *et al.*, (2004), existía menos extensión de la sucesión intermedia, mientras que la sucesión temprana tenía mayor dominancia en el área; contrario a lo reportado en esta investigación, donde se observó menor presencia de

bosque en sucesión temprana. A parte de la diferencia en los años entre ambos estudios, varios factores pueden incidir en esta disimilitud, por un lado, las metodologías empleadas (diferentes resoluciones de imágenes satelitales y tipos de sensores) y por otro, la afectación de incendios forestales ha disminuido en algunas áreas debido a estrategias de control que ha optado el área de conservación, así como las condiciones en las que se daban los incendios (cacería, venganza, negligencia); de manera que podemos suponer que parte de los parches de bosque temprano que existían durante el estudio realizado por Kalacska pudieron haber alcanzado una sucesión intermedia.

6.2. Análisis de la dinámica de los incendios forestales

El análisis de la dinámica de afectación y recurrencia de los incendios forestales muestra la presencia del fuego en los seis sectores de estudio del ACG, sin embargo hay una mayor afectación y recurrencia en los sectores Murciélagos, Pocosal, El Hacha y Santa Elena. Pausas (2004) menciona que existen tres factores relacionados al incremento de la frecuencia y extensión de los incendios forestales: el cambio de uso del suelo, el cambio climático y el aumento de la población.

En la región Chorotega el paisaje durante muchos años se ha visto afectado por incendios forestales, el uso del fuego ha sido una práctica agrícola cotidiana en estas zonas rurales; utilizado principalmente para quemar de residuos orgánicos, rastrojos, caza furtiva y quemar agrícolas para preparación del terreno (Picado y Cruz, 2014). Así mismo Guanacaste es una de las regiones del país que ha incrementado en los últimos años su extensión en áreas protegidas, aunado a esto el aumento de áreas de pastizales que han sido abandonados, condiciones climáticas y una creciente cantidad de biomasa propician la ignición de incendios forestales (Picado y Cruz, 2014).

Por otro lado, los factores climáticos influyen en el incremento de los incendios, por lo general, estos eventos se dan en época seca, cuando la precipitación es baja y la temperatura es alta, debido a esto, la vegetación presenta bajo nivel de humedad (Pausas, 2004), teniendo las condiciones apropiadas para que se propague un fuego. Es importante señalar que la principal problemática entorno a la ignición de incendios forestales en el país se debe al vandalismo y limpieza de terrenos para agricultura (Chávez, 2016). El informe de la temporada de incendios forestales 2015 indica que de los 90 incendios ocurridos en ese año, el 46% se debió a acciones por vandalismo, un

30% por quemas agropecuarias y pastos, 10% actividades de caza, 8% a cambio de uso del suelo y un 2% de forma natural por un rayo (SINAC, 2015).

Sin embargo, para Picado y Cruz (2014) la constante actividad de los incendios forestales es un escenario de conflictividad territorial y social. En la región Chorotega existen dos formas de tenencia de la tierra a lo largo de los últimos 40 años, una gran parte ha sido destinada para conservación en manos del Estado y otra parte de la tierra ha sido distribuida para asentamientos campesinos; estos dos agentes son los causantes de la dinámica territorial regional. Así mismo, el peso que tienen las causas de los incendios por vandalismo o venganza responde a tensiones entre los actores que se desenvuelven entre uno u otro tipo de territorio, en este caso funcionarios y pobladores (Picado y Cruz, 2014).

Los sectores con mayor recurrencia de incendios forestales responden a la dinámica descrita anteriormente, el sector de Santa Elena y Murciélago limitan al norte con el poblado de Cuajiniquil, asentamiento que genera conflictos con el área protegida, así mismo el camino hacia Santa Cecilia al norte del sector El Hacha, representa un área con una gran recurrencia de incendios forestales debido a su cercanía a la carretera y al fácil acceso de los pobladores al área protegida, en su mayoría con fines de caza ilegal. Sin dejar de lado que en estos sectores es donde se encuentra mayor presencia de cobertura de sabanas y pastos los cuales juegan un papel importante en la ecología del fuego debido a la constante dinámica en el contenido de humedad por las condiciones físicas y químicas que propician un fuego (Kunst *et al.*, 2015).

La constante dinámica de incendios forestales en ésta área sin duda alguna genera repercusiones sobre la ecología del paisaje. El análisis de correlación de Pearson sobre las métricas del paisaje identificó que el índice medio de forma tiene una correlación negativa con el número de los incendios; lo que indica, que entre mayor sea la cantidad de incendios en un área, el índice medio de forma de los fragmentos será menor, lo que implica más regularidad en cuanto a su forma. Costafreda (2009) menciona que en la ecología del paisaje, los disturbios como los incendios forestales pueden tener una relación entre la estructura del paisaje y el fuego, y que el paisaje por sí mismo puede influir en la ocurrencia de incendios a la vez que el número de incendios puede llegar a modificar la organización de parches del paisaje. Por otro lado Lloret *et al.*, (2002) hace referencia al papel del fuego en la promoción de la heterogeneidad del paisaje, ya que por

lo general existe una mayor transformación en áreas quemadas en bosques abiertos y pastos. Comúnmente muchos incendios de gran extensión se dan en vegetación que se encuentra en los límites (Flannigan *et al.*, 2009).

La correlación de Pearson indicó que entre mayor sea la cantidad de incendios en un área, las hectáreas cubiertas por bosques tempranos y secundarios disminuirán. Por lo tanto es importante considerar que el fuego en muchas ocasiones interrumpe el proceso de sucesión, propiciando transformaciones de bosques a pastos (Lloret *et al.*, 2002), lo que genera desde el punto de vista ecológico, una pérdida importante biodiversidad.

Se encontró estadísticamente correlación negativa con suelos Entisoles y suelos Inceptisoles, sugiriendo que entre mayor sea la cantidad de incendios en un área, las hectáreas cubiertas por Entisoles e Inceptisoles disminuirán. Dado que solo se reportan estos dos tipos de suelo en el área de estudio, la doble correlación podría indicar que los suelos de tipo inceptisoles y entisoles no tienen una estrecha relación con la cantidad de incendios forestales. Es importante mencionar que a corto y largo plazo, el fuego puede llegar a causar cambios no solo en el paisaje como se comentó anteriormente, sino también en el suelo y su composición química y física; como la pérdida de la cubierta vegetal aumentado el riesgo de erosión, la combustión de biomasa que está asociada también con la contaminación atmosférica por la emisión de gases que se genera de un incendio y la deposición de cenizas (Celis, Jordán y Zavala, 2013).

6.3. Evaluación del estado de vulnerabilidad ante incendios forestales

Dentro del contexto de la evaluación de riesgo, el modelo de vulnerabilidad de incendios forestales proporciona una herramienta de alto valor en la estimación de daños y pérdidas ecológicas y socioeconómicas en áreas afectadas por el fuego. Chuvieco *et al.*, (2013) menciona que la evaluación de vulnerabilidad a incendios forestales debería proveer un modelo potencial para el análisis de los factores socioeconómicos y ecológicos sobre los efectos del fuego. Aunque se utilizó una variedad de bases de datos para la generación de las variables del modelo, la validación de los datos con el personal del área protegida permitió una mayor estimación del modelo reflejando un escenario “real” de la situación de vulnerabilidad que presenta el área protegida.

La estimación de la pérdida de los valores ecológicos provee una visualización del posible efecto del fuego sobre la biodiversidad y calidad visual del paisaje; éste último es un

recurso natural con gran importancia hoy en día, por su valor ecológico y social. Se identificó que la cercanía a las carreteras y áreas donde hay más contacto de observadores con el paisaje son más vulnerables en relación a la afectación por incendios forestales. Estévez, Garmendia y García, (2012) consideran que cuanto más infraestructuras haya en una zona y mayor densidad de población confluya, habrá más susceptibilidad al deterioro, por ende, habrá mayor fragilidad visual. Los mismos autores se refieren a la calidad visual describiendo que las áreas más próximas a puntos donde se observa el paisaje tienen mayor valor ecológico y mayor calidad visual.

El paisaje en general de los sectores de estudio del ACG refleja una variabilidad de sucesiones vegetales las cuales son controladas por la historia de uso de la tierra, la influencia de la vegetación remanente posterior al abandono del lugar (Leiva *et al.*, 2009) y la dinámica de los incendios forestales. El suelo, el régimen de incendios, el mecanismo de reproducción y la topografía del sitio son factores que determinan las comunidades vegetales que regenerarán (Alloza y Vallejo, 2006). Por ejemplo las observaciones de campo en España mostraron una mayor regeneración en sitios donde había presencia de suelos con roca tipo caliza y en las pendientes orientadas hacia el norte (Pausas y Vallejos, 1999). La regeneración en el área de estudio se da sobre la meseta de ignimbritas de Santa Rosa, caracterizada por ser una región de subducción de placas con una constante actividad volcánica, relieve montañoso y suelos meteorizados con perfiles poco profundos (Leiva *et al.*, 2009).

El nivel de vulnerabilidad en el área de estudio se presenta en mayor grado en los sectores de Murciélago, sector oeste de Santa Elena, sector Santa Rosa y al norte del sector el Hacha. Estos sectores se encuentran dominados por especies de regeneración lenta y hábitats con baja fragmentación, lo que indica la presencia de especies de alto valor ecológico que han sido capaces de adaptarse a las condiciones climáticas, topográficas y edáficas del sitio donde la presencia de incendios forestales ha sido mínima.

Los bosques en sucesión secundaria presentan una capacidad de regeneración menor (alrededor de 5-20 años) que los bosques tardíos (20-100 años) (Guariguata y Ostertag, 2001). Sin embargo, la regeneración estará determinada por la estrategia de reproducción de las especies de plantas afectadas (si son especies germinadoras o rebrotadoras) y las condiciones climáticas del lugar; por lo general las especies con mecanismo de rebrote se

regeneran con mayor rapidez que las germinadoras debido a que la capacidad de rebrote no depende de condiciones de precipitación mientras que las especies que germinan si estarán sujetas a las lluvias (Pausas y Vallejos, 1999).

En la parte central del sector Santa Elena se presenta una mayor recurrencia en cuanto a incendios forestales. Los ecosistemas presentes como sabanas y pastos por lo general regeneran la cobertura vegetal varios meses después de un fuego. Estos ecosistemas están conformados generalmente por especies como *Bulbostylis paradoxa* adaptada para sobrevivir al fuego y responder de forma reproductiva (Myers, 2006); no obstante, la concentración de la mayoría de incendios en este sector además de los diferentes tipos de usos de la tierra han causado pérdidas y fragmentación de hábitats.

Cuando un hábitat se fragmenta genera consecuencias tanto en factores bióticos (flora y fauna) como en factores abióticos (temperaturas, viento, radiación solar y humedad) (Murcia, 1995). Por lo general existen dos parches: el fragmento y la matriz; ambos con características microclimáticas distintas, lo que produce un gradiente ambiental empezando en el borde y terminando en el interior del fragmento (Bustamante y Grez, 1995); al darse estos cambios en las condiciones climáticas, se modifica de forma significativa la luminosidad, temperatura, viento, humedad relativa y humedad del suelo de los hábitats fragmentados, puesto que los bordes se ven de manera directa afectados por la incidencia de vientos y radiación solar lo que provoca un incremento en la temperatura de los bordes modificando la vegetación e incrementando la mortalidad, generando una acumulación de combustibles en los bordes de los fragmentos que junto a épocas de sequías propician un aumento en los incendios forestales (Alvarado *et al.*, 2004).

Un incendio forestal puede generar fragmentación de nuevos hábitats y propiciar la generación de nuevos incendios alterando los regímenes normales del fuego (Fernández *et al.*, 2010). Cochrane (2003) menciona que los incendios recurrentes reducen significativamente el tamaño y la densidad de los fragmentos de bosque no quemado, destruye la vegetación en regeneración dando inicio a la colonización de especies como hierbas o pastos que disminuyen las tasas de regeneración natural aumentando la probabilidad de incendios forestales. El incremento en los incendios forestales por hábitats fragmentados también se asocia con la muerte de individuos arbóreos y la

acumulación de materia seca en los bordes de los fragmentos generando material combustible (Cochrane, 2001).

La degradación de los ecosistemas y la pérdida de biodiversidad a causa de los incendios forestales minimizan el funcionamiento del ecosistema y la resistencia de las especies, amenazando la capacidad de los ecosistemas para suministrar un flujo de servicios ecosistémicos (Groot *et al.*, 2012). Los incendios forestales constituyen uno de los grandes problemas en el mundo y generan daños personales, patrimoniales, pérdida de bienes y servicios ecosistémicos (Barrio *et al.*, 2007).

Los valores socioeconómicos de los sectores de estudio contemplan las infraestructuras y servicios ecosistémicos como turismo, biomasa, investigación y educación biológica. Dentro de esta investigación no se estima la pérdida económica de estos bienes y servicios debido a la falta de información, pero se considera que un incendio forestal dentro del sector Santa Rosa generaría pérdidas económicas importantes, debido a que es uno de los sectores con mayor afluencia de turistas, investigaciones, educación biológica y estructuras de importancia científica y patrimonial como la Casona Santa Rosa. En Costa Rica los incendios forestales no han alcanzado la interfaz urbana como en otros países donde la afectación a viviendas es constante. Por ejemplo, en Portugal en el año 2005 se contabilizaron pérdidas de alrededor de 800 millones de euros y se cobraron 13 vidas, en el verano del 2007 en Grecia hubieron 64 muertos y pérdidas de 5000 millones de euros; aunque estos casos pueden ser considerados como extremos, permiten ilustrar las consecuencias socioeconómicas de los incendios forestales (Biro, 2009).

Los servicios ecosistémicos como el turismo se ven afectados de manera directa por el fuego. Polzin, Yuan y Schuster (1993) estimaron pérdidas directas alrededor de \$21 millones de dólares en el Parque Nacional Yellowstone debido al incendio de 1988. Estos eventos no solo ocasionan una disminución en la visitación turística del área protegida sino también en comunidades aledañas que dependen de la industria turística (González-Caban, 1998). En muchas ocasiones las estadísticas de las consecuencias de un incendio forestal solo incluyen valores de bienes de mercado y servicios, sin tomar en cuenta el valor de bienes y servicios ecosistémicos que se han perdido como por ejemplo: biodiversidad, biomasa, valor histórico y cultural del área protegida (Biro, 2009).

A nivel global un alto porcentaje de pérdidas de biomasa está estrechamente relacionado con los incendios forestales (Martínez, 2003). Se estima que durante un incendio forestal la combustión de biomasa libera a la atmósfera diversos tipos de aerosoles y gases que podrían tener incidencia en la modificación de los patrones climáticos (Chávez, 2014). Sin embargo Kauffman *et al.*, (2002) indica que es muy poco el conocimiento sobre la dinámica de la biomasa asociada con fuego y en el bosque tropical seco.

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

Los mejores clasificadores fueron Maximum Likelihood y Neural Network, para determinar cuál clasificador es mejor dependerá en gran medida del estudio que se esté realizando así como de los insumos e intereses del usuario para la discriminación de cada categoría.

Las imágenes satelitales son una herramienta que brinda muchas ventajas para la clasificación de coberturas de la tierra, permiten comprender la composición y estructura de hábitats y su distribución geográfica desde un planeo aéreo ampliando la extensión de área que se podría estudiar, en comparación con métodos únicamente de campo.

Existe una dominancia de tres coberturas en el ACG: bosque intermedio, pasto-sabana y bosque temprano, juntos conforman el 83.54% del total del área de estudio.

Existe dentro de los sectores de estudio en el ACG una mayor presencia de bosque intermedio con un 38.91% (22253,67 ha), seguido de un 28.1% (16079,22 ha) de sabana-pasto. En el otro extremo la menor cobertura corresponde a la laguna con un 0.08% (47,52 ha).

Los sectores con mayor afectación de hectáreas quemadas y recurrencia de incendios forestales son Murciélagos con 9368 ha, Pocosol con 6310 ha, El Hacha con 5272 ha y por último Santa Elena con 3086 ha.

El modelo de vulnerabilidad presentado en este trabajo provee información geoespacial de la situación del fuego sobre los valores socioeconómicos y ecológicos del área de estudio siendo este un primer acercamiento a la identificación de zonas primordiales para la implementación de estrategias de control y protección ante un incendio forestal.

Se identificó vulnerabilidad alta en el sector Murciélagos y parte del sector oeste de Santa Elena de acuerdo a las variables y a los componentes bióticos y abióticos.

El sector Santa Rosa se diferencia de otros sectores por ser un área con mayor presencia remanentes de bosque tardío, de turismo, investigaciones y programas educativos es por esta razón que presenta una alta vulnerabilidad.

7.2. Recomendaciones

En vista de la gran variedad de algoritmos para la clasificación, se recomienda a la hora de trabajar con una gran variedad de clases o categorías (en especial para discriminar tipos de bosques), probar clasificadores avanzados como redes neuronales o árboles de decisión, los cuales pueden brindar mejores resultados en la clasificación.

Para tener buenos resultados en la validación de coberturas de la tierra se recomienda realizar trabajo de campo y tomar la mayor cantidad de muestras, esto permitirá una mejor verificación de lo clasificado por el programa desde la imagen comparada con la información real del campo.

Incluir a posteriori dentro del modelo las variables de salud pública, provisión de agua y cobertura eléctrica.

Estudiar el componente de biodiversidad (a nivel de especies) en todas las coberturas y áreas especificadas con vulnerabilidad alta.

Para posteriores investigaciones, se recomienda desarrollar como parte del componente de vulnerabilidad, la variable de biomasa superficial y biomasa de raíces.

Contemplar dentro del modelo de evaluación de riesgo del área de estudio, el componente de *peligro*.

8. Referencias Bibliográficas

- Aguilar, H., Mora, R. y Vargas, C. (2014). Metodología para la corrección Atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*. 53. 39-59.
- Alloza, J. A. y Vallejo, R. (2006). *Restoration of burned areas in forest managment plans*. En: Desertification in the Mediterranean Region a security issue. Valencia. España.
- Alvarado, E., Sandberg, D.V., Carvalho, J.R. JA., Gielow, R. y Santos, J.C. (2004). Landscape fragmentation and fire vulnerability in primary forest adjacent to recent land clearings in the Amazon arc of deforestation. *FLORESTA*. 32 (2). 169-174.
- Álvarez, C. y Fonnegra, D. (2011). *Los incendios forestales y el papel de los sensores remotos*. Recuperado de: <http://pasandoespanol2011.blogspot.com/2011/06/los-incendios-forestales-y-el-papel-de.html>.
- Arroyo-Mora, J.P., Sánchez-Azofeifa, A.G., Rivard, B. Calvo, J.C. y Janzen, D.H (2005). Dynamics in landscape structure and composition for Chorotega región, Costa Rica from 1960 to 2000. *Elsevier* 106. 27-39).
- Arroyo-Mora, J.P., Sánchez-Azofeifa, A.G., Kalacska, M. Rivard, B., Calvo-Alvarado, J.C y Janzen, D.H. (2005). Secondary forest detection in a Neotropical Dry Forest Landsacape Using Landsat 7 ETM + and IKONOS Imagery. *Biotropica*. 37(4): 497-507.
- Baltodano, J. (2007). *Bosque, cobertura y uso forestal*. Ponencia preparada para el Decimotercer Informe Estado de La Nación, San José. Programa Estado de la Nación.
- Barrance, A., Schreckenberg, K. and Gordo, J. (2009). *Lecciones aprendidas en el bosque seco tropical de Mesoamérica*. Overseas Developmet Institute. Londres. Reino Unido. 158 p.
- Barrio, M., Loureiro, M. y Chas, M.L. (2007). Aproximación a las pérdidas económicas ocasionadas a corto plazo por los incendios forestales en Galicia en 2006. *Economía Agraria y Recursos Naturales*. 7(14) 45-64.
- Birot, Y. (2009). *Convivir con los incendios forestales: lo que nos revela la ciencia*. European Forest Institute. Finlandia.
- Blanco, R. (2012). Manglar de Potrero Grande, Sitio Ramsar. Recuperado de: <http://www.acguanacaste.ac.cr/acq/designaciones-internacionales/manglar-de-potrero-grande-sitio-ramsar>

- Boucher, D.H., Hansen, M., Risch, S. y Vandermeer, J.H. (1991). Agricultura. En: Janzen. D.H. (Ed). *Historia Natural de Costa Rica*. 1ed. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica.
- Burley, J. (2002). Panorámica de la diversidad biológica forestal. *Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales*. 53 (209). 3-9.
- Bustamante, R. y Grez, A. (1995). Consecuencias ecológicas de la fragmentación de los bosques nativos. *Ciencia y Ambiente*. XI (2) 58-63.
- Calvo-Alvarado, J., Azofeifa-Sánchez, A. Portillo-Quintero. C. (2013). Neotropical Seasonally Dry Forest. *Encyclopedia of Biodiversity*. 5. 1-13 p.
- Casal, J. y Mateu, E. (2003). Tipos de Muestreo. *Rev. Epidem. Med. Prev.* 1. 3-7.
- Celis, R., Jordán, A. y Zavala, L.M. (2013). *Efectos del fuego en las propiedades biológicas, físicas y químicas del fuego*. In: Grandes incêndios florestais, erosão, degradação e medidas de recuperação dos solos. 145-160.
- Chander, G., Markham, B. y Helder, D. (2009). *Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETMt and EO-1 ALI sensors*. Remote sensing of environment . 133 (2009) 893-903.
- Chavez, H. Entrevista. (2016, Abril 19). Incendios Forestales Consumen al país. (Prensa Escrita) Seminario Universidad.
- Chávez Naharro, J. (2014). *Incendios forestales y cambio climático. Estimación de emisiones en los incendios forestales de Andilla y Cortes de Pallás*. Trabajo fin de Máster. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Chowdhury, E.H y Hassan, Q.K. (2014). Operational perspective of remote sensing-based forest fire danger forecasting systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. DOI.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.011
- Chuvieco, E. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 103 (1). 173-181.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Editorial Planeta S.A. Barcelona, España. 591 p.
- 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.

- Chuvieco, E., Martínez, S., Román, M.V., Hantson, S. y Pettinari, M.L. (2013). Integration of ecological and socio-economic factors to assess global vulnerability to wildfire. *Global Ecology and Biogeography*. 23. 245-258.
- Cochrane, M.A. (2001). Synergistic interactions between habitat fragmentation and fire in evergreen tropical forest. *Conservation Biology*. 15(6) 1515-1521.
- Cochrane, M.A. (2002). *Incendios en bosques tropicales en América Latina y El Caribe. Prevención, Evaluación y Alerta temprana*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Cochrane, M.A. (2003). Fire Science for rainforest. *NATURE*. 421. 913-919.
- Cochrane, M.A. (2009). *Tropical Fire Ecology. Climate change, Land Use and Ecosystem dynamic*. Praxis Publishing Ltd. Chichester. UK. 696 p.
- Comisión Nacional Forestal (2010). *Incendios Forestales: Guía práctica para comunicadores*. (Tercera edición). San Juan de Ocotán. Zopopán, Jalisco. México. 56p.
- Comisión Nacional sobre Incendios Forestales (1997). *Plan Nacional para el Manejo del Fuego en Costa Rica 1998-1999*.
- Congalton, R y Green, K. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data. Principles and practices*. (Second edition). Taylor & Francis Group, LLC. 179p.
- Costafreda Aumedes, S. (2009). *Análisis de la estructura de la vegetación y su relación con la ocurrencia de incendios forestales*. Proyecto Final de Carrera. Universidad de Lleida. España.
- Dennis, R. Applegate, G. Meijaard, E. Nasi, R. y Moore, P. (2001). *Los Incendios Forestales y la Diversidad Ecológica*. Depósito de documentos de la FAO.
- Díaz, A. (2003). *Instrumentos para la planificación integral del uso de la tierra con sistemas de información geográfica- un caso de estudio en Argentina*. Recuperado de: <http://edoc.hu-berlin.de/dissertationen/diaz-lacava-amalia-nahir-2003-07-16/PDF/Diaz-Lacava.pdf>.
- Di Gregorio, A. (2005). *Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra. Conceptos de la clasificación y manual para el usuario, versión 2 del programa*. Environment and Natural Resources Service Series, N°8 Fao-Rome. 268 p.
- ENVI (2009). *Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide*.
- Estévez, V., Garmendia, L. y García, J.C. (2012). Calidad y fragilidad visual del paisaje: MCE, fuzzy logic y GIS. Recuperado de: http://eprints.ucm.es/16016/1/Victor_TFM.pdf

- Farina, A. (1998). *Principles and methods in landscape ecology*. Kluwer Academic Publishers.
- Fernández, I., Morales, N., Olivares, L., Salvatierra, J., Gómez, M. y Montenegro, G. (2010). *Restauración ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales*. Santiago. Chile.
- Fernández, V. Iraola, P. Resnichenko, Y. Caffaro, A. Guiogo, B. Coiana, N. Fonsalía, A y López N. (2009). *Aplicación de SIG y modelos de propagación a la identificación de áreas de riesgo de incendios forestales en la zona costera*. Laboratorio de Técnicas aplicadas al análisis del territorio. Universidad de la República de Uruguay. 50 p.
- Flannigan, M.D., Krawchuk, M.A., Wotton, B.M., Groot, W. y Gowman, L.M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*. 18. 483-507.
- Flores, J.G. (2014). Sistemas de información y monitoreo de incendios forestales en México. *Revista Innovación Forestal*.
- Fuentes, H. (2011). *Monitoreo de Focos de Calor y Quemadas en el Departamento de Pando*. HERENCIA. Cobija, Pando, Bolivia.
- García-Mora, T. y Mas, J. (2008). *Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México*. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 67: 7-19
- García, W., Marchand, G; Llactayo, W; Salcedo, K; Victoria, E. y Zambrano, A. (2013). *Protocolo: Ortorectificación de imágenes Landsat*. Dirección General de Ordenamiento territorial, Lima: Ministerio del Ambiente. 32p.
- Gill, A.M., Stephens, S.L. y Cary, G.J. (2013). The worldwide “wildfire” problem. *Ecological Applications* 23 (2) 438-454.
- Giraldo, L. y Barrero, J.P. (2012). *Implementación de una red neuronal para la clasificación de coberturas terrestres en imágenes MODIS*. Anteproyecto. Universidad San Buenaventura Seccional Medellín, Medellín, Colombia.
- Gómez, E. (2006). *Guía básica de conceptos de Radiometría y fotometría*. V. 10. ESI. Universidad de Sevilla. Recuperado de: <http://laplace.us.es/campos/optica/general/opt-guia2.pdf>
- González-Caban, A. (1998). Aspectos económicos de la evaluación del daño de incendios. *Serie Geográfica*. 7. 87-95.

- Groot, R., Brander, L., Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermnadi, A., Hein, K., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., Rodríguez, L.C., Brink, P. y Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystems Service*. 1. 50-61.
- Guariguata, M.R y Ostertag, R. (2001). Neotropica secondary forest sucesion: changes in structural and functional characteristics. *Forest Ecology and Management*. 148. 185-206.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M.P. (2010). *Metodología de la investigación*. Quinta edición. McGraw-Hill/Interamericana Editors, S.A. México DF. México. 607p.
- Holdridge, L.R (1967). *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center. San José. Costa Rica. 206 p.
- Imbach, P., Coto, O. y Salinas, Z. (2005). *Valoración de los residuos biomásicos en Costa Rica usando Sistemas de Información Geográfica*. (Informe Técnico N°340) CATIE. Turrialba, Costa Rica. 41p.
- Janzen, D.H. (1986). *Parque Nacional Guanacaste: Restauración Ecológica y Cultural en el Trópico*. San José, Costa Rica.
- Janzen, D.H. (1988). Tropical Dry Forest. *Biodiversity*. EO.Wilson, Harvard University. National Academy of Sciences. 538p. Recuperado de: [https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=qACfAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT143&dq=Tropical+Dry+Forest+janzen&ots=nL0c_aCGXd&sig=6TMjCP05WMIeEa43fNF68e7CqAl&redir_esc=v#v=onepage&q=Tropical%20Dry%20Forest%20janzen&false](https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=qACfAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT143&dq=Tropical+Dry+Forest+janzen&ots=nL0c_aCGXd&sig=6TMjCP05WMIeEa43fNF68e7CqAl&redir_esc=v#v=onepage&q=Tropical%20Dry%20Forest%20janzen&=false)
- Janzen, D.H. (2000). Costa Rica's Area de Conservación Guanacaste: A long march to survival through non-damaging biodevelopment. *Biodiversity*. 1 (2). 7-20.
- Kalacska, M., Sánchez-Azofeifa, G.A., Calvo-Alvarado, J.C., Quesada, M., Rivard, B. y Janzen, D.H. (2004). Species composition, similarity and diversity in three successional stages of a seasonally dry tropical forest. *Forest Ecology and Management* 200. 227-247. DOI:10.1016/j.foreco.2004.07.001
- Kauffman, J.B. Steele, M.D. Cummings, D.L. y Jaramillo, V.J. (2002). Biomass dynamics associated with deforestation, fire and conversion to cattle pasture in a Mexico tropical dry forest. *Forest Ecology and Management*. 176. 1-12.
- Kunst, C., Ledesma, R., Bravo, S., Defossé, G., Godoy, J., Navarrete, V. y Jaime, N. (2015). Dinámica del contenido de humedad de pastos y su relación con la ecología del fuego en región chaqueña occidental. (Argentina). *RIA*. 41(1).
- 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.

- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. y Chipman, J.D. (2008). *Remote Sensing and Image Interpretation*. (6th Edition). John Wiley & Son Inc. United States of America.
- Lloret, F., Calvo, E., Pons, X. y Díaz-Delgado, R. (2002). Wildfires and landscape patterns in the Eastern Iberian Peninsula. *Landscape Ecology*. 17. 745-759.
- Lobo, S. (2005). *Situación y problemática de los Incendios Forestales, Costa Rica*. Recuperado de: http://www.sirefor.go.cr/Documentos/Manejo%20del%20Fuego/Informe_incendios_Costa_Rica_2005.pdf
- Martínez, J.A. (2003). *Fuego en el pantanal. Incendios forestales y pérdidas de recursos de biodiversidad*. Fundación Pieb. La Paz. Bolivia. 188 p.
- Martínez, J y Díaz, A. (2005). *Percepción Remota: "Fundamentos de Teledetección espacial"*. 62p.
- Martínez, R. y Rodríguez, D. (2008). *Los incendios forestales en México y América Central*. Memorias del Segundo Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección Contra Incendios Forestales: Una Visión Global. Recuperado de: http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_qtr208es/psw_qtr208es_767-780_dominquez.pdf.
- Miles, L., Newton, A., Defries, R., Ravillious, C., May, I., Blyth, S., Kapos, V. y Gordon, J. (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forest. *Journal of Biogeography*. 33. 491-505. DOI:10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x
- Moraga, J. (2010). Evaluación del Riesgo ante incendios forestales en la cuenca del Río Tempisque. *Revistas Geográfica de América Central*. 2.(45).
- Murcia, C. (1995). Edge effects in fragmented forest: implications for conservation. *TREE*. 10.58-62
- Murphy, P. y Lugo, A. (1986). Ecology of Tropical Dry Forest. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 17. 67-88.
- Myers, R.L. (2006). Convivir con el fuego –Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el manejo de integral del fuego. Iniciativa global para el manejo del fuego. *The Nature Conservancy*.
- Noches, L y Chavarría, M. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe Nacional Costa Rica*.
- Olaya, V. (2011). *Sistemas de Información Geográfica. Versión 1.0*.

- Otterstrom, S.M., Schwartz, M.W y Velázquez-Rocha, I. (2006). Responses to fire in selected tropical dry forest trees. *Biotropica*. 38. 592-598. DOI: 10.1111/j.1744-7429.2006.00188.x
- Pal, M. y Mather, P.M. (Noviembre, 2001). *Decision Tree based classification of remotely sensed data*. 22nd Asian Conference on Remote Sensing. Singapore.
- Pausas, J.G y Vallejo, R. (1999). The role of fire in European Mediterranean Ecosystems. *Remote Sensing of wildfires in the European Mediterranean basin*. 3-16. Springer-Verlag.
- Pausas, J.G. 2004. La recurrencia de incendios en el monte mediterráneo. En: Vallejo, R. (ed.). *Avances en el estudio de la gestión del monte mediterráneo*. pp. 47-64. CEAM, Valencia.
- Polzin, P.E., Yuan, M.S. y Schuster, E.G. (1993). *Some economic impacts of the 1988 fires in the Yellowstone area*. U.S Forest Service.
- Pérez, D. (2007). *Introducción a los sensores remotos: Aplicaciones en geología*. Curso Teórico-Práctico. Buenos Aires, Argentina. 45p.
- Pérez, C. y Muñoz, A.L. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. Universidad de Salamanca, Salamanca, España. 356p.
- Picado, W. y Cruz, C. (2014). El bosque seco en llamas. Estructura agraria y ecología política del fuego en Costa Rica. *Revista de Historia*. 70. 109-142.
- Rábade, J.M. y Aragonese, C. (2004). *Políticas, Planificación y Economía en la Defensa contra Incendios Forestales*. En II Simposio sobre Políticas, Planificación y Economía en la Defensa contra los Incendios Forestales. Córdoba
- Ramírez, C. (1999). *Modelo de susceptibilidad a los incendios forestales utilizando imágenes AVHRR y SIG en la reserva de la Biosfera Maya, Guatemala*. Tesis Mg.Sc. CATIE. Turrialba. Cartago, Costa Rica.
- Rejas, J. (2008). *Tratamiento digital previo de las imágenes. Módulo VII: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*. Recuperado de: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45518/componente45516.pdf
- Rodríguez Rivera, J. (2012). *Dinámica de cambios en la cobertura vegetal (1975-2005)*. Tesis de Master. Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Tegucigalpa. Honduras.
- Rodríguez, G. y Martínez, J. (2014). Informe de Visitación 2013. Área de Conservación Guanacaste: Recuperado de: <http://www.acguanacaste.ac.cr/noticias/noticias-programa-de-ecoturismo/553-informe-estadistico-de-visitacion-acg-2013>.

- Schowengerdt, R.A. (2007). *Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing*. (Third edition). Elsevier Inc. United States of America. 509p.
- Segado, F. (1996). *Principios de Teledetección*. (Edición II). Servicio de Publicaciones. Universidad de Murcia. 77p.
- SEMAR (Secretaría de Marina). (2012). *Percepción Remota*. Recuperado de: <http://www.semar.gob.mx/s/informacion-sector/ciencia/ermexs/percepcion-remota.html>.
- SINAC (Sistema Nacional de Áreas de Conservación). (2015). *Comunicado de Prensa. Costa Rica Registro Mayor Afectación por Incendios Forestales durante la temporada 2015*. Recuperado de: <http://www.sinac.go.cr/noticias/Comunicados%20PrensaSINAC/Comunicado%20de%20Prensa.Informe%20temporada%20de%20incendios%202015.pdf>.
- Sobrino, J.A. (2000). *Teledetección*. Servicio de Publicaciones. Universidad de Valencia. Valencia, España. 467p.
- Steel, R. y Torrie, J. (1988). *Bioestadística: Principios y procedimientos*. México D.F. México.
- Szek, M. (2012). *Fragmentación del paisaje en áreas protegidas*. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona. España.
- Ulate Quesada, C. (2011). *Análisis y comparación de la biomasa aérea de la cobertura forestal según zona de vida y tipo de bosque para Costa Rica*. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- U.S.G.S. (U.S. Geological Survey). *Landsat project Description*. Recuperado de: http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php.
- U.S. Geological Survey .Disponible en el sitio web: <http://earthexplorer.usgs.gov>
- 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. Heredia, Costa Rica.
- Villalobos, R., Retana, J.A y Acuña, A. (2000). El niño y los incendios forestales en Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanogr* 7 (1) 1-20.
- Wang, G y Weng, Q. (2014). *Remote Sensing of Natural Resources*. Taylor & Francis Group. Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL. 515p.

Wilson, E.O. (1997). Introduction. En: Reaka-Kudla, M.L., Wilson, D.E. y Wilson, E.O. (Eds). *Biodiversity II. Understanding and Protecting our Biological Resources*. (pp1-3). Recuperado de: https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=-X5OAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=EO+Wilson+biodiversity&ots=f1VmKE4V6t&sig=TUKq_7PTklwjT89okAWQZwZDVLl&redir_esc=y#v=onepage&q=EO%20Wilson%20biodiversity&f=false.

Anexo 2. Encuesta

NIVEL DE IMPORTANCIA DE VARIABLES EN LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN EL ACG

Nombre:

Ocupación:

Vulnerabilidad de áreas ante incendios forestales: La evaluación de la vulnerabilidad es definida como el grado de pérdidas o daños que puede sufrir la población, los bienes y el medio ambiente por un incendio forestal. Para su evaluación se requiere realizar una asignación del nivel de gravedad potencial que se alcanzaría en el caso de darse un incendio, en función de los factores intrínsecos y extrínsecos del área protegida (Aragoneses y Rábade, 2004).

➤ Instrucciones

Ordene las siguientes variables de vulnerabilidad para el área protegida según la relevancia para usted; siendo **1** el **menos importante** y **10** el **más importante** (no se pueden repetir los números).

Variable	Nivel de importancia (1 a 10)
Fragmentación de hábitats	
Reservorios de Carbono/Biomasa	
Atractivo Visual (paisaje)	
Infraestructura (Casona, estructuras del SINAC y áreas circundantes)	
Turismo	
Investigación	
Regeneración de estadios sucesionales	
Educación Biológica	

¡Muchas gracias por su colaboración!

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Fotografía de Cerro Santa Elena. Fuente: Róger Blanco, Investigador Área de Conservación Guanacaste.

