

Peru

Bolivia

“ANÁLISIS ESPACIAL Y MULTITEMPORAL DE LA DINÁMICA DE LOS INCENDIOS FORESTALES ENTRE LOS AÑOS 1986 – 2012 EN LA CUENCA DE ZAPOCÓ, SANTA CRUZ, BOLIVIA”



IBIF
INSTITUTO BOLIVIANO DE
INVESTIGACION FORESTAL



**AUTORES: Limber Sadaña Morón,
Tahia Devisscher
y Daniel Espinoza**

Santa Cruz de la Sierra – Bolivia
2014

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS.....	3
2.1.	Objetivo general.....	3
2.2.	Objetivos específicos.....	3
3.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1.	Incendios forestales y áreas quemadas.....	4
3.2.	Teledetección.....	4
3.2.1.	Principios de Teledetección.....	4
3.2.2.	Elementos de un sistema de Teledetección.....	5
3.2.3.	Espectro Electromagnético.....	6
3.3.	Características espectrales de las áreas quemadas.....	8
3.3.1.	Visible (0,4-0,7 μm).....	8
3.3.3.	Infrarrojo de onda corta (SWIR) (1,1 -2,0 μm).....	8
3.3.4.	Infrarrojo térmico (TIR) (8,0 -15 μm).....	9
3.4.	Características de las imágenes usadas para la cartografía de área quemada (Landsat TM y ETM+).....	9
3.5.	Índices y métodos para la discriminación y cartografía de áreas quemadas.....	11
3.5.1.	Normalized Burn Ratio (NBR).....	11
3.5.2.	Spectral Mixture Analysis (SMA).....	11
3.5.3.	Automatic Burned Area Mapping Software (ABAMS).....	12
3.5.3.1.	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	13
3.5.3.2.	Global Environmental Monitoring Index GEMI.....	13
3.5.3.3.	Burnt Area Index BAI.....	13
3.5.3.4.	Modified Burned Area Index BAIM.....	14
3.5.3.5.	Mid-Infrared Burn Index MIRBI.....	14
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
4.1.	Área de estudio.....	15
4.1.1.	Ubicación del área de estudio.....	15
4.1.2.	Clima.....	16
4.1.3.	Fisiografía y geología.....	16
4.1.4.	Hidrografía.....	16
4.1.5.	Vegetación.....	17

4.2.	Métodos	18
4.3.	Análisis de datos	22
4.3.1.	Análisis visual de áreas quemadas.....	22
4.3.2.	Selección de áreas quemadas para validación	22
4.3.3.	Evaluación y comparación de metodologías	24
5.	RESULTADOS	27
5.1.	Detección de áreas quemadas por medio de ABAMS, NBR y SMA	27
5.2.	Evaluación y comparación de metodologías	31
5.2.1.	Cartografía de áreas quemadas por medio de análisis visual	31
5.3.	Obtención de áreas quemadas	37
6.	DISCUSIÓN.....	44
7.	CONCLUSIONES.....	46
8.	RECOMENDACIONES	47
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
	ANEXOS	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Características de las imágenes Landsat TM (Bastarrika 2009)	10
Tabla 2: Características de las imágenes Landsat ETM+ (Bastarrika 2009).....	10
Tabla 3: Áreas quemadas por metodología.....	27
Tabla 4: Medida de concordancia entre NBR y áreas quemadas de validación	32
Tabla 5: Medida de concordancia entre ABAMS y áreas quemadas de validación	32
Tabla 6: Firmas espectrales a ser usadas en SMA /MESMA y clases seleccionadas como área quemada por medio de clasificación no supervisada (Iso-Data)	34
Tabla 7: Medida de concordancia entre SMA1 y áreas quemadas de validación.....	35
Tabla 8: Medida de concordancia entre SMA2 y áreas quemadas de validación.....	35
Tabla 9: Medida de concordancia entre MESMA2 y áreas quemadas de validación.....	36
Tabla 10: Medida de concordancia entre MESMA2 y áreas quemadas de validación.....	36
Tabla 11: Resumen de resultados índice Kappa	37
Tabla 12: Tipo de vegetación quemada durante los años 1986 a 1999.....	39
Tabla 13: Tipo de vegetación quemada durante los años 2000 a 2012.....	39
Tabla 14: Tipo de vegetación quemada durante los años 1986 a 2012.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espectro Electromagnético	7
Figura 2: Ubicación de la cuenca de Zapocó, provincia Ñuflo de Chávez, departamento de Santa Cruz	15
Figura 3: Temperaturas promedio estación meteorológica de Concepción.....	16
Figura 4: Esquema metodológico para utilizar ABAMS.....	19
Figura 5: Esquema metodológico para la determinación de áreas quemadas por medio de SMA	21
Figura 6: Densidad de focos de calor con los sensores NOAA y MODIS.	24
Figura 7: Esquema metodológico para el análisis espacial y multitemporal de los incendios forestales en la Cuenca de Zapocó.	25
Figura 8: Áreas quemadas de NBR, ABAMS	28
Figura 9: : Áreas quemadas de SMA con suelo, vegetación y agua, SMA con área quemada, suelo y vegetación.	29
Figura 10: Áreas quemadas de MESMA con suelo, vegetación y agua, MESMA con área quemada, suelo y vegetación.....	30
Figura 11: Densidad de focos de calor y áreas quemadas seleccionadas	31
Figura 12: Áreas quemadas en hectáreas por año.....	38
Figura 13: Repetitividad de áreas quemadas en la cuenca de Zapocó entre los años 1986 al 2012.	40
Figura 14: Histórico 1986 a 2012.....	41
Figura 15: Histórico 1986 a 1999.....	42
Figura 16: Histórico 2000 a 2012.....	43

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Listado de imágenes obtenidas y procesadas.....	49
---	----

RESUMEN

Los incendios forestales suponen serias alteraciones e impactos sobre los ecosistemas, siendo la Chiquitania en el oriente boliviano, una de las regiones mayormente afectadas por este fenómeno. Para entender mejor el régimen de perturbación de los incendios forestales en esta región, la Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano (FCBC), en el marco del proyecto EcoAdapt, solicitó un estudio espacial y temporal de los incendios forestales en la cuenca del río Zapocó, localizada en un área central de la Chiquitania y en uno de los Municipios más afectados por incendios. El presente trabajo consiste en un análisis espacial y temporal (1986 al 2012) de la ocurrencia de los incendios forestales en la cuenca Zapocó. Los incendios se caracterizan por medio de la cartografía de áreas quemadas. Para mapear las áreas quemadas, se aplicó y se comparó tres métodos (NBR, SMA y ABAMS) con áreas quemadas cartografiadas visualmente por tres evaluadores. En la validación, se obtuvieron mejores resultados con el programa ABAMS, por lo que se lo utilizó para realizar la cartografía de áreas quemadas en 76 imágenes satelitales. Los resultados arrojaron que existe una tendencia cíclica en la ocurrencia de incendios en la cuenca estudiada, así mismo se evidencia la relación de las quemadas con la habilitación de áreas antrópicas.

PALABRAS CLAVE: incendios forestales, áreas quemadas, ABAMS, SMA, NBR, Kappa.

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales suponen alteraciones serias e impactos negativos sobre los ecosistemas. Estos impactos van desde la pérdida de la cobertura vegetal, impactos en el uso del suelo, en la productividad, en la biodiversidad y hasta alteraciones en el funcionamiento de ecosistemas, claramente en función de la intensidad y extensión del fuego (Roy *et al.* 2002, Bastarrika 2009). En el departamento de Santa Cruz, el fuego es usado normalmente como un medio al momento de habilitar el terreno para otro tipo de uso, ya sea para uso agrícola extensivo e intensivo, agrosilvopastoril o para la cría de ganado y otros animales (DIRENA 2006). El fuego es también utilizado en la quema de pastizales naturales, buscando su rebrote con las primeras lluvias.

Uno de los departamentos del país con mayor incidencia de incendios forestales ha sido Santa Cruz. Entre los años 2000 y 2010 se han quemado 3.144.634 Ha, siendo la región más afectada la Chiquitania (Rodríguez Montellano 2012). Esto se debe en gran medida, a que en esta región existe una relación entre la quema y los mecanismos de habilitación de nuevas tierras para expandir áreas antrópicas, puesto que los incendios forestales están relacionados a la proximidad de dichas áreas (Pinto & Alvarado 2007). Además de esto, esta zona presenta un sotobosque con abundantes gramíneas, sabanas arboladas y pastizales naturales, lo cual hace que estos ambientes sean propicios para la acumulación de hojarasca y otros materiales vegetales muertos y secos, constituyéndose en un almacén de material combustible, que sumado a las condiciones climáticas, favorecen a los incendios forestales (DIRENA 2006).

Dada la incidencia de incendios forestales en la Chiquitania y sus impactos negativos, es necesario disponer de información detallada sobre la localización, extensión e intensidad de los incendios forestales a lo largo del tiempo. Esta información permitirá monitorear los cambios en los usos y cubiertas de suelo, evaluar las pérdidas económicas, los efectos ecológicos y poder realizar una planificación con vista a la prevención de riesgos ambientales.

Bajo el marco del proyecto EcoAdapt, la Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano (FCBC) trabaja en el sistema socio-ecológico de la Cuenca de Zapocó con el fin

de realizar un análisis de la relación entre los diferentes actores territoriales y el uso de los recursos naturales, los cambios biofísicos y socio-económicos en el tiempo. El estudio de los incendios forestales de 1986 a 2012 en la cuenca Zapocó es parte de este análisis y es de suma importancia para entender el régimen de los incendios y su incidencia en los cambios de estado del sistema socio-ecológico de la cuenca.

Una de las herramientas que facilita el estudio espacial y temporal de los incendios forestales es la cartografía de áreas quemadas a través de la teledetección. Este estudio se ha desarrollado rápido en los últimos años debido a la facilidad de adquisición de imágenes satelitales como Landsat TM y ETM+ (Shimabukuro *et al.* 2006, Bastarrika 2009, Rodríguez Montellano 2012). La teledetección permite aplicar diferentes análisis y algoritmos a estas imágenes, los cuales en el presente estudio serán utilizados para responder a la siguiente pregunta: ¿Cuál ha sido el comportamiento espacial de los incendios forestales en la cuenca de Zapocó entre los años 1986 al 2012?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Analizar la dinámica espacial y temporal de los incendios forestales en la cuenca de Zapocó, departamento de Santa Cruz, entre los años 1986 al 2012, mediante la cartografía de áreas quemadas y el análisis multi-temporal de estas áreas.

2.2. Objetivos específicos

- Analizar y comparar la efectividad y eficiencia de tres métodos (Normalized Burn Ratio, Automatic Burned Area Mapping Software y Spectral Mixture Analysis) para la determinación de áreas quemadas en imágenes satelitales Landsat TM y ETM+.
- Caracterizar espacial y temporalmente la ocurrencia de áreas quemadas entre 1986 al 2012 por medio de su cartografía automática en imágenes Landsat TM y ETM+.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Incendios forestales y áreas quemadas

Los incendios forestales son entendidos como fuegos, ya sean de origen natural o por acción humana, que se extienden por la vegetación de los ecosistemas terrestres, ya sean bosques, sabanas, matorrales, pastizales, humedales, turberas, etc. (Pausas 2012).

En el contexto de la región de la Chiquitania, los incendios forestales se inician en proximidad a las áreas deforestadas o de caminos, en su mayoría áreas agrícolas que se propagan sin control al bosque o predios vecinos (Souza *et al.* 2005).

La evaluación del área afectada por un incendio forestal es un factor decisivo para comprender este fenómeno, tanto desde el punto de vista de la prevención como desde el de la planificación y restauración. En los últimos años, el análisis del efecto de incendios sobre un determinado ecosistema se ha beneficiado por la cartografía de área quemada por medio del uso de imágenes satelitales que permite realizar mapas más precisos, rápidos y dinámicos (Shimabukuro *et al.* 2006, Bastarrika 2009, Rodríguez Montellano 2012)

3.2. Teledetección

3.2.1. Principios de Teledetección

La teledetección en un sentido estricto es entendida como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales (Chuvieco 1996). Esta definición supone la existencia de una interacción energética entre estos sensores y la Tierra, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o en algunos casos por emisión propia. A su vez, ese haz energético recibido por el sensor es transmitido a la superficie terrestre, donde es almacenada e interpretada.

La teledetección como tal y como se entiende en esta definición, comenzó en el periodo de 1946 a 1950, cuando se lanzaron desde Nuevo México (EE.UU.) los primeros cohetes V-2 con pequeñas cámaras fotográficas instaladas en ellos como sensores remotos (Labrador *et al.* 2012).

No obstante la observación sistemática de la Tierra comenzó en el año 1960 con el lanzamiento del TIROS-I (Television Infrared Observation Satellite-I) conocidos desde 1970 como NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) continúan hasta nuestros días. Los buenos resultados obtenidos condujeron a la implementación del Programa de Observación ERTS (Earth Resources Technology Satellites), conocido con el nombre de LANDSAT. El primer satélite de esta serie se lanzó el 23 de julio de 1972 y operó hasta el 6 de enero de 1978 (Labrador *et al.* 2012). Este proyecto ha resultado ser uno de los más fructíferos hasta el momento. El último satélite de esta serie, el LANDSAT 8, fue lanzado el

3.2.2. Elementos de un sistema de Teledetección

Un sistema de Teledetección, tal como se ha definido, tiene los siguientes elementos:

- **Fuente de energía**, la cual es el origen del flujo energético detectado por el sensor. La fuente de energía más importante es la energía solar, pero puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por éste, en el caso de la teledetección activa.
- **Cubierta terrestre**, formada por distintas coberturas que existen en la tierra, tales como las masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas. Estas coberturas reciben la señal energética del sensor y emiten una nueva señal de acuerdo a sus particulares características físicas.
- **Sistema sensor**, compuesto por el sensor y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las coberturas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- **Sistema de recepción-comercialización**, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado, y, tras correcciones, se distribuye a los intérpretes o usuarios.
- **Intérprete**, el cual analiza la información ya sea en forma de imágenes analógicas o digitales, convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio(Chuvienco 1997).

- **Usuario final**, encargado de analizar el documento elaborado por el intérprete.

3.2.3. Espectro Electromagnético

Existen muchas formas de radiación electromagnética, como la luz visible y el color, que son percibidos por el ojo humano, pero existen otras que no son percibidas a simple vista como las ondas de radio, el calor, los rayos ultravioleta o los rayos X. No obstante, es posible describir cualquier energía radiante de acuerdo a su longitud de onda o frecuencia, pudiendo dividir estas frecuencias en diferentes bandas para su análisis, la organización de estas bandas se denomina espectro electromagnético (Chuvieco 1997, Labrador *et al.* 2012).

La teledetección parte de este hecho para dividir este espectro electromagnético en una serie de bandas (Figura 1), siendo la terminología más usada la siguiente: El visible (VIS) es una pequeña región del espectro electromagnético que apenas abarca desde los 0,4 μm hasta los 0,7 μm , puede ser percibida por el ojo humano y abarca tres bandas azul (0,4 a 0,5 μm), verde (0,5 a 0,6 μm) y rojo (0,6 a 0,7 μm). La energía ultravioleta (UV) se encuentra inmediatamente por debajo del color azul. Por encima del rojo se sitúa la región infrarroja (IR), que a su vez está dividida en tres categorías: IR próximo (NIR) (0,7 – 1,3 μm), IR medio (SWIR) (1,3 – 3 μm) e IR térmico (TIR) (3– 100 μm). La porción de microondas se encuentra más allá del IR, a longitudes de onda mucho más grandes (1 mm – 1 m), que son las longitudes de onda más largas usadas en teledetección (Chuvieco 1997, Labrador *et al.* 2012).

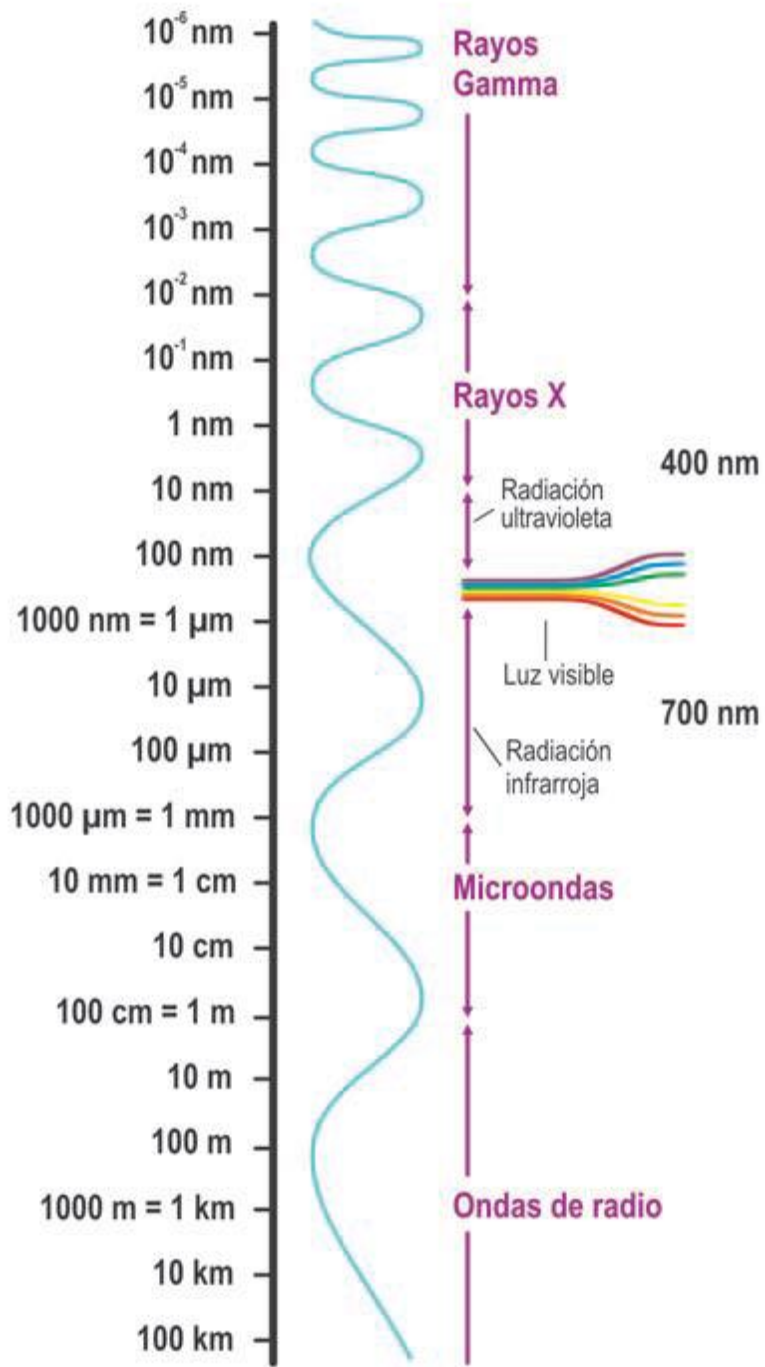


Figura 1: Espectro Electromagnético
Fuente: Labrador *et al.* 2012

3.3. Características espectrales de las áreas quemadas

El conocimiento de las características espectrales de las áreas quemadas es un punto crítico si se espera realizar con éxito su cartografía por medio de imágenes satelitales. Un factor determinante en estas características es el tiempo transcurrido después del disturbio, debido a que las cubiertas quemadas evolucionan mostrando claras diferencias a corto y largo plazo.

A continuación se hace una revisión de estas características y los factores determinantes que inciden en ellas (Pereira *et al.* 1999, Roy 2002, Bastarrika 2009)

3.3.1. Visible (0,4-0,7 μm)

Este espectro corresponde a las bandas 1, 2 y 3 en Landsat TM y ETM+, generalmente la vegetación no afectada por el fuego tiene una respuesta baja en el visible, esto dependiendo del nivel de clorofila que contiene, y muestra un pico de reflectividad cercano a 0,55 μm (región espectral Verde). No obstante este comportamiento general no se cumple en algunas cubiertas como sabanas y pastizales (Roy 2002).

3.3.2. Infrarrojo cercano (NIR) (0,7-1,3 μm)

Este espectro corresponde a la banda 4 en Landsat TM y ETM+, en este rango espectral las áreas quemadas post incendio presentan una fuerte caída de la reflectividad debido a la deposición de cenizas y carbón en el suelo (Bastarrika 2009), especialmente cuando la cantidad de combustible previa es elevada.

No obstante como ocurre en el caso anterior debido a que la producción de carbón y la pérdida de biomasa es menor en áreas con vegetación poco densa, ocasiona que la signatura espectral se asemeje más a la observada antes del incendio (Pereira *et al.* 1999).

3.3.3. Infrarrojo de onda corta (SWIR) (1,1 -2,5 μm)

Este espectro corresponde a la banda 5 en Landsat TM y ETM+, para la cartografía de áreas quemadas esta región espectral ha resultado muy adecuada, ya que esta menos afectada por los aerosoles que el Visible y el NIR (Bastarrika 2009), además de esto es más sensible al contenido de humedad de la vegetación (Pereira *et al.* 1999). La respuesta esperada de la

reflectividad en el SWIR, es decreciente después de ocurrido el incendio, debido esto a la fuerte absorción del carbón, no obstante esta tendencia general del SWIR presenta algunas inconsistencias ya que esta región espectral está muy influenciada por otros factores como el color del suelo y la estructura del dosel (Pereira *et al.* 1999).

3.3.4. Infrarrojo térmico (TIR) (8,0 -15 μm)

Este espectro corresponde a la banda 6 en Landsat TM y ETM+, este espectro no es de utilidad para el enfoque de este trabajo debido ya que no se tiene en cuenta la señal térmica generada durante el incendio, sino solamente la relacionada con el oscurecimiento del suelo o la reducción de la reflexión como consecuencia de la disminución de la cubierta vegetal (Pereira *et al.* 1999).

3.4. Características de las imágenes usadas para la cartografía de área quemada (Landsat TM y ETM+)

Existen varios satélites que proveen imágenes de media-alta resolución usadas para la cartografía de áreas quemadas, no obstante las imágenes adquiridas desde los satélites Landsat desarrollados por la NASA han sido, sin duda alguna, la fuente principal de datos de media-alta resolución espacial para estas aplicaciones, esto debido en gran medida a su acceso gratuito.

Es por este motivo, además de la fácil aplicabilidad de diferentes análisis y algoritmos, que el presente trabajo se realizó con estas imágenes. Los satélites Landsat constan de tres tipos de sensores: el Multiespectral Scanner (MSS) y el Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper (ETM+). Estos sensores funcionan a través de la radiación solar que reflejan los objetos desde la superficie terrestre, por lo cual los datos de reflexión dependen de la composición de estos objetos. El programa Landsat fue desarrollado específicamente para estudio de recursos naturales de la tierra y se inició en julio de 1972 (Chuvieco 1996).

A continuación se detallan las características de las imágenes que fueron utilizadas.

3.4.1. Landsat TM

En abril de 1984 se hizo el lanzamiento del satélite LANDSAT TM, una imagen cuya cuenta con 7 bandas espectrales (Tabla 1) y cubre 185x185 km. El satélite encuentra a una altura nominal de órbita de 705 Km, logra cubrir el planeta o en otras palabras tiene una resolución temporal de 16 días. La órbita es descendente, o sea de norte a sur pasando por el Ecuador a las 9:30 a.m. su órbita es sincrónica con el sol con el fin de tener iluminación constante y con una duración de 98.88 minutos (Chuvieco 1996, Bastarrika 2009).

Tabla 1: Características de las imágenes Landsat TM
Fuente: Bastarrika 2009)

MODO ESPECTRAL	ESPACIAL (metros)	ESPECTRAL (micras)		RADIOMETRIA	TEMPO REAL
Mjliespectral	30	Banda 1 azul	0,45 -0,52	8 BITS	16 Dias
		Banda 2 verde	0,52 -0,60		
		Banda 3 roja	0,63 -0,69		
		Banda 4 Infrarrojo cercano NIR	0,76 -0,90		
		Banda 5 Infrarrojo cercano2 SWIR	1,55 -1,75		
		Banda 7 Infrarrojo medio SWIR	2,08 -2,35		
Termal	120	Banda 6 Infrarrojo térmico	10,4-1,25		

3.4.2. Landsat ETM+

El satélite Landsat ETM+ fue lanzado en abril de 1999. Una imagen de este satélite está compuesta por 8 bandas (Tabla 2) y tiene el mismo tamaño que Landsat TM. La órbita de este satélite es realizada en aproximadamente en 99 minutos, permitiendo al satélite dar 14 vueltas a la Tierra por día al igual que Landsat 5, y cubrir la totalidad del planeta en 16 días. El satélite cruza la línea del Ecuador entre las 10:00 y 10:15 (hora local) (Bastarrika 2009).

Tabla 2: Características de las imágenes Landsat ETM+
Fuente: Bastarrika 2009)

MODO ESPECTRAL	ESPACIAL (metros)	ESPECTRAL (micras)		RADIOMETRIA	TEMPO REAL
Mjliespectral	30	Banda 1 azul	0,45 -0,52	8 BITS	16 Dias
		Banda 2 verde	0,52 -0,60		
		Banda 3 roja	0,63 -0,69		
		Banda 4 Infrarrojo cercano NIR	0,76 -0,90		
		Banda 5 Infrarrojo cercano2 SWIR	1,55 -1,75		
	Banda 7 Infrarrojo medio SWIR	2,08 -2,35			
	15	Banda 8 Pancromática	0,52 -0,90		
Termal	120	Banda 6 Infrarrojo térmico	10,4-1,25		

3.5. Índices y métodos para la discriminación y cartografía de áreas quemadas

3.5.1. Normalized Burn Ratio (NBR)

El Normalized Burn Ratio (NBR) se desarrolló para distinguir las áreas que se han quemado así como para definir la gravedad de una quemadura usando imágenes Landsat TM. La fórmula para el NBR es muy similar a la de NDVI salvo que utiliza el infrarrojo cercano banda 4 (NIR) y la banda del infrarrojo de onda corta 7 (SWIR) (Norton 2006, Rodríguez Montellano 2012):

$$NBR = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR})}{(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR})}$$

La ecuación NBR fue diseñada para ser calculada a partir de una imagen en reflectancia, pero puede calcularse a partir de la luminosidad y digital number (dn) con cambios en los índices de gravedad de la quemadura.

3.5.2. Spectral Mixture Analysis (SMA)

Spectral Mixture Analysis (SMA) es una técnica que facilita la estimación de la proporción de las coberturas conocidas que componen cada píxel en una imagen satelital (Shimabukuro *et al.* 2006), en otras palabras, trata de determinar la posible composición de cada píxel de la imagen. Los píxeles que contienen más de un tipo de cobertura se denominan píxeles mixtos y puros aquellos que tienen una sola composición.

Esta técnica ayuda a determinar los componentes de píxeles mixtos mediante la predicción de la proporción de un píxel que pertenece a una clase o característica en particular sobre la base de las características espectrales de sus endmembers, lo cuales son firmas espectrales asociadas a componentes puros en la imagen, siendo las clases mas usadas suelo, sombra y vegetación (Shimabukuro 2006, Roberts *et al.* 2007, Bastarrika 2009).

Idealmente, los endmembers espectrales representan la mayor parte de la variabilidad espectral de la imagen y sirven como referencia para determinar la composición de los píxeles mixtos (Roberts *et al.* 2007). Para facilitar la identificación de endmembers óptimos se han desarrollado varias técnicas, siendo la mas efectiva según la literatura Count-based

Endmember Selection (CoB) (Roberts *et al.* 2007), el cual selecciona aquellos pixeles que modelen la mayor cantidad de pixeles dentro (in_Cob) y fuera de una clase (out_Cob), mediante la determinación de la raíz del error cuadrático medio del espectro “ $\hat{\theta}$ ” modelo menos el espectro “ θ ” modelado. Los pixeles modelos serán aquellos que tengan un mayor en in_CoB.

$$\text{RMSD}(\hat{\theta}) = \sqrt{\text{MSE}(\hat{\theta})} = \sqrt{E((\hat{\theta} - \theta)^2)}.$$

Minimum Average Spectral Angle (MASA) es otro método para identificar endmembers óptimos que está diseñado para seleccionar firmas espectrales con el mejor ajuste promedio dentro de una clase. Se diferencia de CoB en que la medida de ajuste utilizado es el ángulo espectral, no la RMSE. Por lo cual cada firma espectral se utiliza para calcular el ángulo espectral entre sí y todos los demás miembros de la biblioteca espectral. MASA dentro de una clase se calcula como el ángulo espectral promedio entre el espectro de referencia (modelo candidato) y todos los demás espectros dentro de la misma clase. El mejor candidato MASA se selecciona como el que produce el ángulo espectral promedio más bajo (Roberts *et al.* 2007).

3.5.3. Automatic Burned Area Mapping Software (ABAMS)

ABAMS es una herramienta enfocada a generar perímetros de áreas quemadas a partir de imágenes Landsat TM y Landsat ETM+, el único prerequisite de esta herramienta es contar con los metadatos de las imágenes en cuestión y tener instalado ArcGis 9.3 en el ordenador (Bastarrika 2009).

Una ventaja importante de usar esta herramienta es que permite realizar comparaciones unitemporales y multitemporales de imágenes de diferentes fechas, además de su nivel de automatización, dado que es capaz de procesar la radiancia y la reflectancia de cada imagen, así como los siguientes índices: NDVI, GEMI, BAI, NBR, BAIM y MIRBI.

3.5.3.1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Este índice es uno de los más usados en todos los estudios de vegetación, fue propuesto por Krielger (citado por Bastarrika 2009) se adapta muy bien a las características estadísticas que se desea para el crecimiento de la vegetación y produce un valor de = +1 (cubierta vegetal sana y densa) -1 (que no tiene ninguna vegetación):

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{ROJO})}{(\rho_{NIR} + \rho_{ROJO})}$$

3.5.3.2. Global Environmental Monitoring Index GEMI

Este índice de vegetación propuesto por Pinty y Verstraete (1992) fue diseñado para reducir al mínimo la influencia relativa de los efectos atmosféricos, a través de una combinación de bandas no lineal. Estos efectos son especialmente importantes cuando se observan superficies oscuras, como aquellas recientemente quemadas. A diferencia del anterior índice este comportamiento no lineal permite disminuir la confusión entre las superficies quemadas y otras cubiertas más claras cercanas a la línea 1:1 en el espacio espectral Rojo-NIR (Bastarrika 2009).

$$GEMI = \frac{\eta(1 - 0,25\eta) - (\rho_{ROJO} - 0,125)}{(1 - \rho_{ROJO})} \quad \eta = \frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_{ROJO}^2) + 1,5\rho_{NIR} + 0,5\rho_{ROJO}}{(\rho_{ROJO} + \rho_{NIR} + 0,5)}$$

Donde η es una "transmisión", que se define como la relación entre el índice de vegetación en la parte superior de la atmósfera sobre su valor en la superficie.

3.5.3.3. Burnt Area Index BAI

Es un índice de vegetación diseñado para realizar combinaciones de bandas para discriminar áreas recientemente quemadas, calculando la inversa del cuadrado de la distancia biespectral a un punto de convergencia de las áreas quemadas, que ha sido establecido según la literatura y análisis empíricos de áreas quemadas (Martin citado por Bastarrika 2009)

$$BAI = \frac{1}{(\rho_{NIR} - \rho_{cNIR})^2 + (\rho_{ROJO} - \rho_{cROJO})^2}$$

donde ρ_{NIR} y ρ_{ROJO} es la reflectividad en la región espectral NIR y Rojo; y ρ_{cNIR} y ρ_{cROJO} , son los valores de convergencia establecidos en 0,06 y 0,1 (valores de reflectividad) respectivamente.

3.5.3.4. Modified Burned Area Index BAIM

Fue diseñado para discriminar áreas quemadas en MODIS, es similar a la del BAI salvo la sustitución de la banda del Rojo por el SWIR y ajustando los valores del punto de convergencia NIR a 0,05 (Banda 2 MODIS) y SWIR a 0,2 (Banda 7 MODIS) (Bastarrika 2009):

$$BAIM = \frac{1}{(\rho_{NIR} - \rho_{cNIR})^2 + (\rho_{SWIR} - \rho_{cSWIR})^2}$$

Donde ρ_{NIR} y ρ_{SWIR} , es la reflectividad en la región espectral del NIR y SWIR; y ρ_{cNIR} y ρ_{cSWIR} , son los valores de convergencia, establecidos en 0,05 y 0,2 (valores de reflectividad) respectivamente.

3.5.3.5. Mid-Infrared Burn Index MIRBI

Determina la separabilidad de áreas quemadas en el espacio espectral SMIR-LMIR (Bastarrika 2009):

$$MIRBI = 10\rho_{LMIR} - 9.8\rho_{SMIR} + 2$$

Donde ρ_{LMIR} y ρ_{SMIR} se refieren a la reflectividad de LMIR y SMIR

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

4.1.1. Ubicación del área de estudio

La cuenca de Zapocó se encuentra ubicada en el municipio de Concepción, provincia Ñuflo de Chávez, departamento de Santa Cruz (Entre $-15^{\circ} 50' 56$ y $-16^{\circ} 15' 20$ Latitud Sur y $-62^{\circ} 21' 20$ y $-61^{\circ} 58' 26$ Longitud Oeste) (Figura 2).

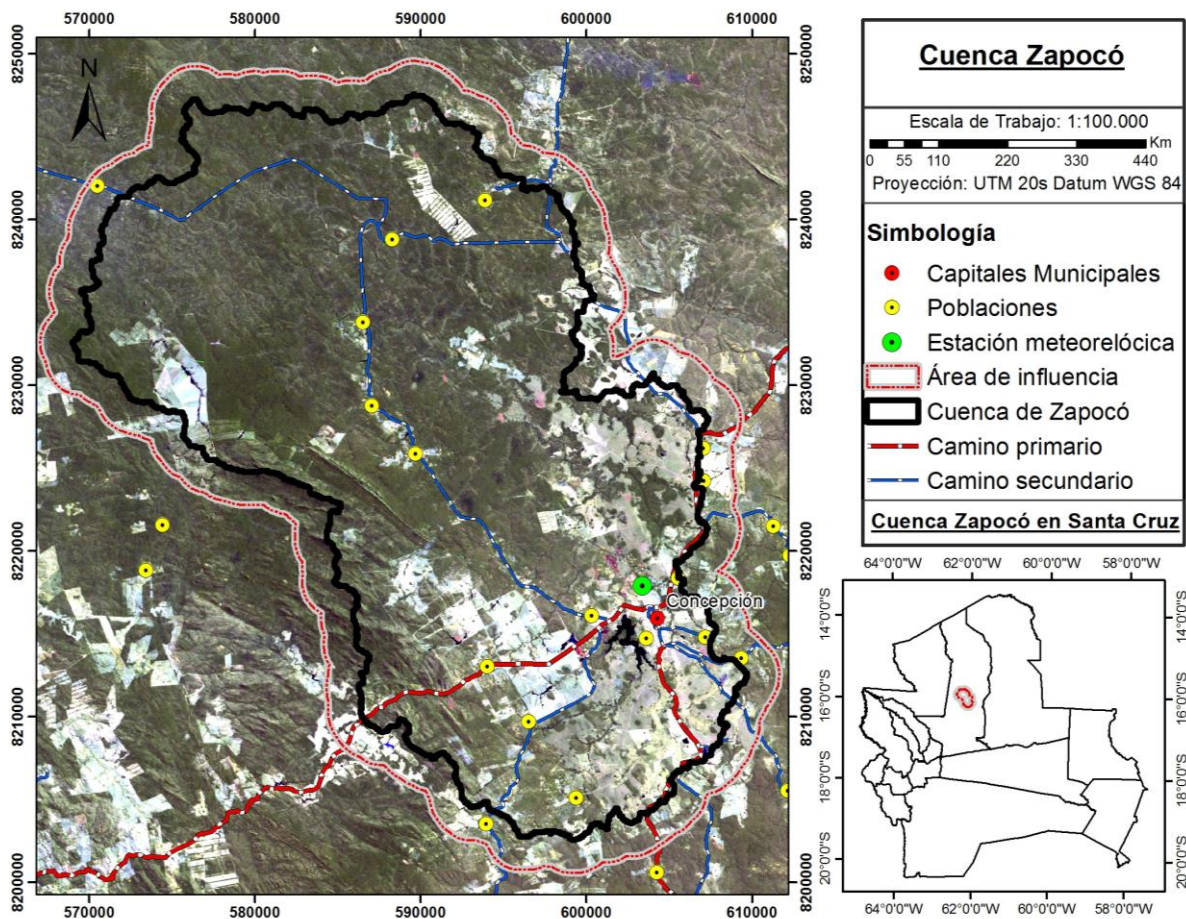


Figura 2: Ubicación de la cuenca de Zapocó, provincia Ñuflo de Chávez, departamento de Santa Cruz.

Fuente: Elaboración propia

Esta cuenca abarca una extensión de 101.128 ha (SITAP 2009), no obstante para el presente estudio se decidió establecer un área de influencia aumentando dos kilómetros al límite de la

cuenca, con el fin de tomar áreas antrópicas que se intersectan y cortan con el límite de la cuenca, siendo el área resultante 133.618 ha.

4.1.2. Clima

Debido a diversos factores como la orografía, vegetación y la altitud y latitud, el clima predominante de la región es tropical con una estación seca que va desde los meses de mayo a noviembre (EcoAdapt 2012). Presenta una temperatura media anual de 24 °C (Figura 3) y una precipitación media anual que va desde los 1123,98 hasta los 1162,52 mm (Zambrana *et al.* 2008).

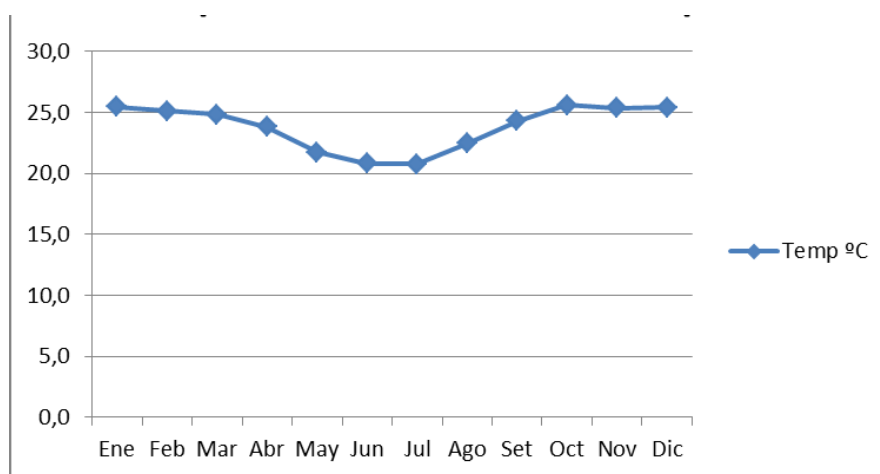


Figura 3: Temperaturas promedio estación meteorológica de Concepción.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Estación meteorológica de Concepción desde 1949 a 2011.

4.1.3. Fisiografía y geología

El relieve está constituido por el Escudo Chiquitano (Serranías Chiquitanas) y las llanuras amazónicas, con una altitud que va desde los 400 msnm en la parte noroeste hasta los 783 msnm en la parte suroeste. Presenta dos tipos de paisajes principales (MDSP–BID 2002): Serranías bajas con disección moderada (planicies y llanuras) y serranías bajas con disección fuerte y moderada, con superficies erosionables.

4.1.4. Hidrografía

De acuerdo al Sistema de Información Territorial de Apoyo a la Producción (SITAP 2009), hidrológicamente Zapocó pertenece a la cuenca Blanco, sub-cuenca Blanco Zapocó y a la

micro-cuenca UH 70625 Lajitas Arjantu. El principal río de esta cuenca es el río Zapocó, ubicado al sur del municipio de Concepción a 520 msnm. Su primer y principal tramo se desarrolla con dirección sur a norte, recibe aportes de los ríos Suruberebo, El Puquio y Pozo Eugenia, de las quebradas Limoncito y Honda, drenan sus aguas por su margen izquierdo y el río La Junta por su margen derecho. El río Zapocó continúa su curso en dirección este a oeste y desde sus cabeceras hasta el límite de la cuenca, alcanzando una longitud aproximada de 94 km (Zambrana 2008).

4.1.5. Vegetación

De acuerdo a Navarro & Ferreira (2008) las unidades de vegetación predominantes en la cuenca de Zapocó son:

- Vegetación acuática y palustre neotropical de la Chiquitania.
- Bosque de las serranías chiquitanas occidentales, sobre suelos profundos bien drenados.
- Bosque sobre suelos mesotróficos bien drenados de la Chiquitania Norte.
- Bosque de serranías sobre suelos profundos no calcáreos de la Chiquitania Central, Oriental y Sur.
- Bosque bajo sobre suelos pedregosos de la Chiquitania centro-occidental
- Cerrado del planalto de la Chiquitania central.

No obstante, de acuerdo a la Dirección de Ordenamiento Territorial y Cuencas (DIORTECU 2009) la mayoría de estas unidades de vegetación presentan, en el área de la cuenca, la categoría de bosque medianamente degradado a bosque muy degradado.

4.2. Métodos

Para caracterizar espacialmente la ocurrencia de áreas quemadas se recurrió a la elaboración de la cartografía de estas áreas entre los años 1986 al 2012, dividiendo el estudio de las imágenes satelitales en periodos de un año. Para esto se obtuvo una colección de 2 a 4 imágenes satelitales por cada año. Las imágenes fueron captadas en los meses de julio a octubre debido a la temporada de quema de la zona (Ver anexo 1). De esta colección de imágenes para 24 años, las imágenes Landsat Thematic Mapper (TM) corresponden al periodo comprendido entre 1986 al 2001 y 2003 al 2011. Debido a la no disponibilidad de imágenes Landsat TM para los años 2002 y 2012 se optó por usar imágenes Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). Todas las imágenes están ubicadas en el Path 230 y Row 071.

Para realizar la cartografía se realizó primero la aplicación, comparación y elección entre tres herramientas o algoritmos (Ver análisis de datos), mediante su aplicación a una imagen Landsat TM (Correspondiente al 6 de Septiembre de 2010) por medio de la siguiente metodología:

1) Normalized Burn Ratio (NBR), se utilizó este algoritmo con la ayuda de un Toolbox de “Monitoreo de Incendios Forestales” (Rodríguez Montellano 2012) dentro programa ArcGIS 9.3, para su uso se trabajó con las bandas 4 y 7 de la imagen seleccionada procesada y transformada en valores de reflectancia, obteniendo una cobertura raster la cual fue reclasificada para establecer los umbrales para separar los valores de quemado y no quemado. Posteriormente se transformó la cobertura al formato vectorial.

2) Automatic Burned Area Mapping Software (ABAMS), el cual requiere la herramienta Spatial Analyst de ArcGIS 9.3 (Bastarrika 2009). Para procesar la imagen fue necesario tener sus metadatos, los cuales están disponibles en la página del USGS Global Visualization Viewer (<http://glovis.usgs.gov/>). Cabe recalcar que antes de poder utilizar una imagen dentro de este software es necesario realizar un preprocesamiento, el cual consiste en el cálculo de diferentes índices a la imagen Pre y Post incendio (Figura 4), puesto que se trabajó utilizando una estrategia multitemporal, para lo cual se utilizó como imagen Pre incendio una imagen correspondiente al 1 de mayo de 2010. Una vez hecho el preprocesamiento se ejecutó el

Algoritmo de Áreas Quemadas (BA) utilizando para identificar las áreas quemadas los siguientes valores: NBR menor a 0, una resta entre NDVI post incendio y el NDVI pre incendio menor a -0,18, una resta entre BAIM post incendio y BAIM pre incendio mayor a 40, MIRBI mayor a 1,68. Una vez identificadas las áreas quemadas para agregarlas unas con otras de manera adecuada se utilizó LR¹ mayor a 35 y los valores menores a 0,2 en la banda 4 (Bastarrika 2009).

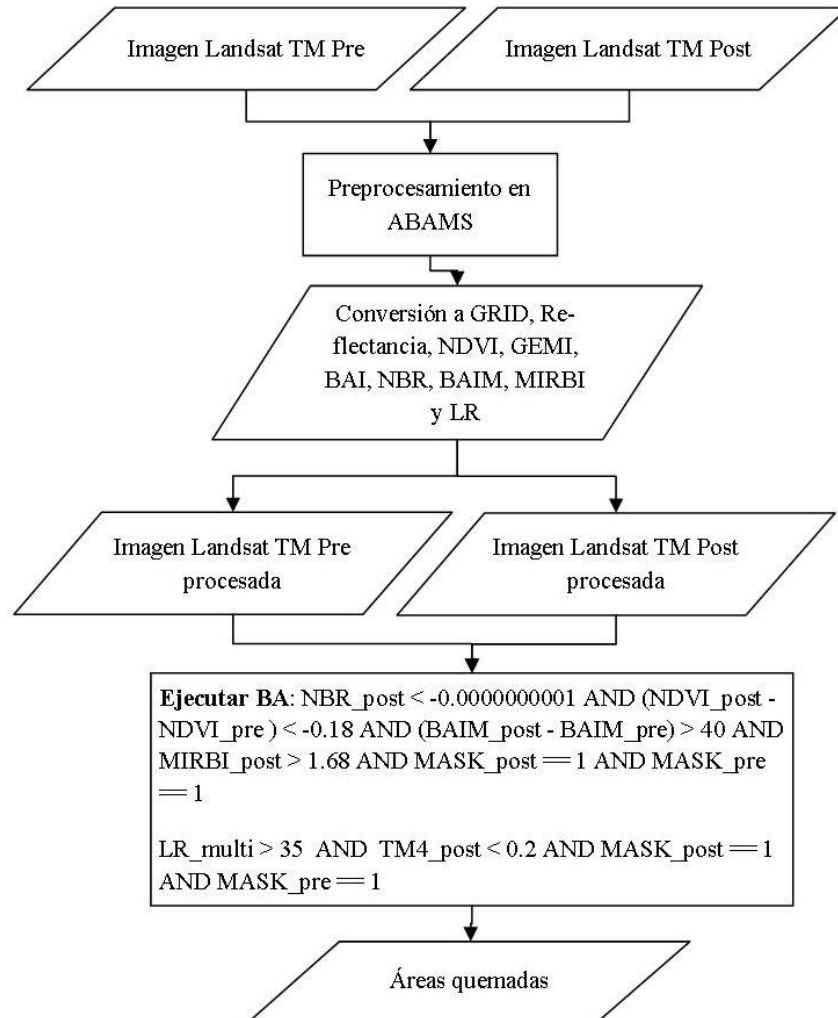


Figura 4: Esquema metodológico para utilizar ABAMS.
Fuente: Elaboración propia

¹ Regresión Logística: Se emplea en la cartografía de áreas quemadas como técnica de detección de cambios, en este caso se utiliza una regresión multitemporal que se basa en un modelo lineal ($t_2 = a + b \cdot t_1$) donde la imagen posterior al incendio (t_2) se estima a partir de la imagen adquirida antes del incendio (t_1). Este modelo puede ser ajustado con las bandas originales (Bastarrika 2009).

3) Spectral Mixture Analysis (SMA), el cual se trabajó mediante la herramienta VIPER Tools dentro del programa ENVI 4.7 (Roberts *et al.* 2007, Shimabukuro *et al.* 2006). Para realizar este análisis se recopiló una serie de firmas espectrales de diferentes coberturas de la imagen satelital en reflectancia, esto por medio de la herramienta Pixel Purity Index con la ayuda de la herramienta Spectral Hourglass Wizard (Figura 5). Posteriormente se realizó una colección de firmas espectrales mediante n-Dimensional Visualisation, esta colección está compuesta por las siguientes clases: Área quemada, Suelo descubierto, Vegetación, Agua y un pixel con valor 0 para la sombra. Para la selección de las firmas espectrales adecuadas a ser usadas en el modelo, se recurrió a las herramientas Count-based Endmember Selection (CoB) y Minimum Average Spectral Angle (MASA) dentro de Viper Tools. Se seleccionaron aquellas firmas que presentaron un RMSE² menos a 0,025 y luego se seleccionaron las firmas espectrales para cada variante de SMA (SMA1 Suelo, Vegetación y Agua, SMA2 Área quemada, Suelo y Vegetación, MESMA1: Suelo, Vegetación y Agua, MESMA2 Área quemada, Suelo y Vegetación) mediante la herramienta Count-based Endmember Selection (CoB) dentro de Viper Tools. Finalmente, se corrieron 4 modelos diferentes y se clasificaron las imágenes Fraction resultantes.

² La desviación de la raíz cuadrada media (RMSD) o error de raíz cuadrada media (RMSE) es una medida de uso frecuente de las diferencias entre los valores pronosticados por un modelo o un estimador y los valores efectivamente observados. Básicamente, el RMSD representa la desviación estándar de la muestra de las diferencias entre los valores predichos y los valores observados. Estas diferencias individuales se denominan residuos cuando los cálculos se realizan sobre la muestra de datos que se utilizó para la estimación, y se denominan *errores de predicción* cuando se calcula fuera de la muestra. El RMSD sirve para agregar las magnitudes de los errores en las predicciones para las varias horas en una sola medida de la capacidad de predicción. RMSD es una buena medida de la precisión, pero sólo para comparar los errores de predicción de diferentes modelos para una variable en particular y no entre las variables, ya que es dependiente de la escala

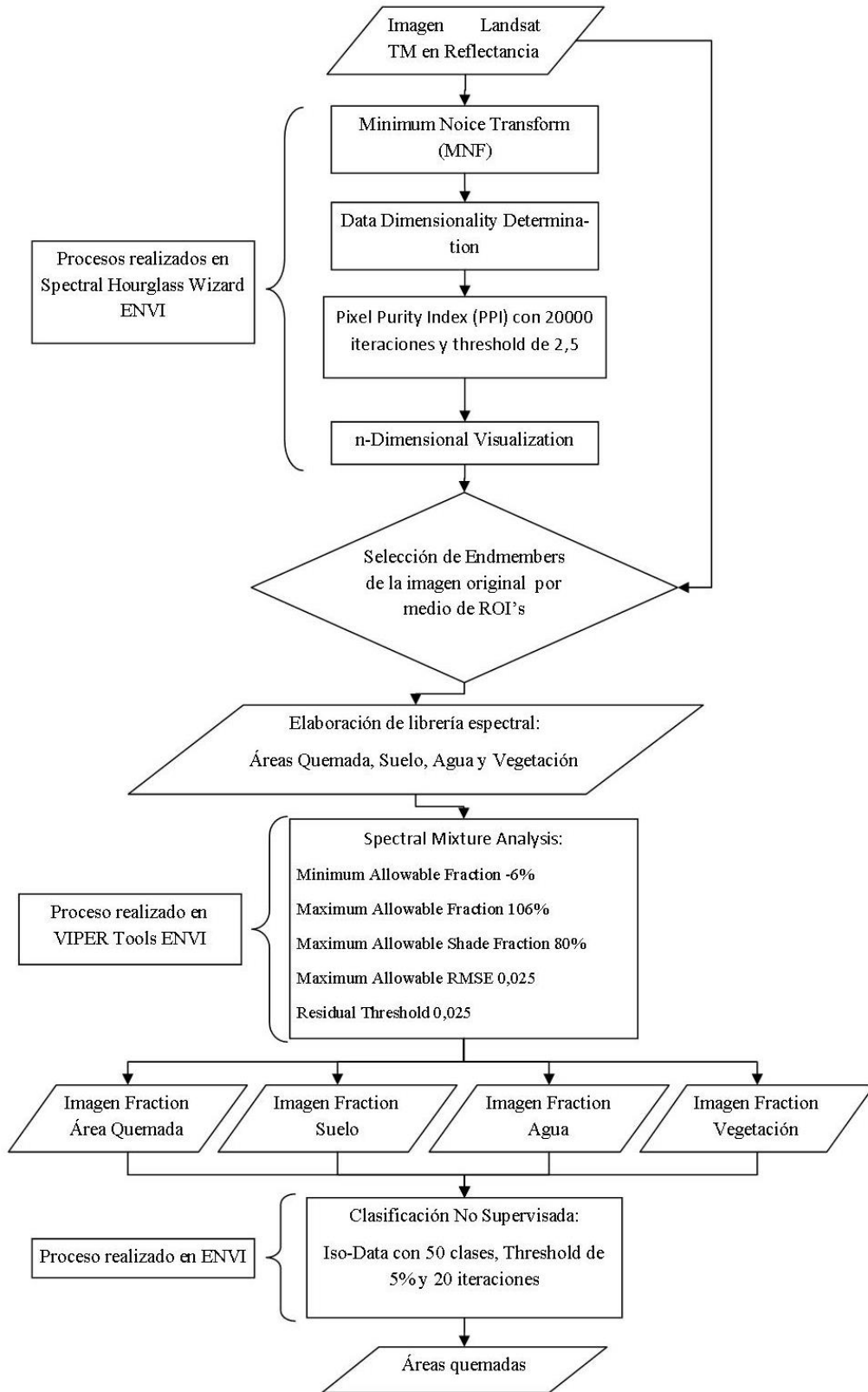


Figura 5: Esquema metodológico para la determinación de áreas quemadas por medio de SMA
Fuente: Elaboración propia

Después de comparar los tres métodos aplicados a la imagen Landsat TM, se seleccionó el que presentó los mejores resultados (Ver análisis de datos). El método seleccionado fue luego aplicada a las 76 imágenes de la colección, obteniendo así un mapa multitemporal en formato vectorial de las áreas quemadas entre 1986 al 2012.

4.3. Análisis de datos

4.3.1. Análisis visual de áreas quemadas

Como fuente de verificación y validación de los resultados de los tres métodos anteriormente descritos, se obtuvo cartografía de las áreas quemadas de una imagen Landsat TM (Correspondiente al 6 de Septiembre de 2010) mediante el análisis visual o fotointerpretación de la misma, esto debido a que es difícil y costoso el contar con datos de campo. No obstante, esta metodología reviste de bastante validez ya que se ha demostrado que el análisis visual de estas imágenes permite una cartografía precisa de las áreas quemadas (Bastarrika 2009).

Este proceso contó con la colaboración de expertos en áreas quemadas del Instituto Boliviano de Investigación Forestal (IBIF), con los cuales se seleccionó las áreas quemadas bajo los siguientes criterios:

- Cercanía a vías de acceso (Caminos principales, vecinales privados y sendas).
- Cercanía a centros poblados.
- Cercanía a áreas antrópicas (Cultivos, ganadería extensiva con pastos cultivados).
- Cuerpos de agua.

4.3.2. Selección de áreas quemadas para validación

Para realizar la selección de áreas quemadas para validación se recurrió a la utilización de focos de calor obtenidos de los sensores Aqua y Terra (MODIS) además de NOAA 15 y 16, disponible en la página web del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE, <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>).

Se realizó la adquisición de focos de calor entre el 22 de julio y el 6 de septiembre del 2010, es decir 44 días antes de la fecha de la imagen satelital Landsat TM, esto debido a que antes de la fecha inicial indicada no se registró una concentración mayor a 2 focos de calor en el área de estudio. Además de este motivo se optó por este espacio de tiempo debido a que un factor determinante para la identificación certera de áreas quemadas es el tiempo transcurrido después del disturbio.

Para obtener las áreas quemadas de validación se aplicó el algoritmo Kernel en ArcGIS, el cual calcula la densidad de puntos en un área determinada, a los focos de calor de MODIS y NOAA de manera separada, obteniendo dos coberturas diferentes de la densidad de focos de calor, las cuales fueron superpuestas con las áreas quemadas identificadas en el apartado anterior, para seleccionar aquellas que se crucen como áreas quemadas de validación (Figura 6).

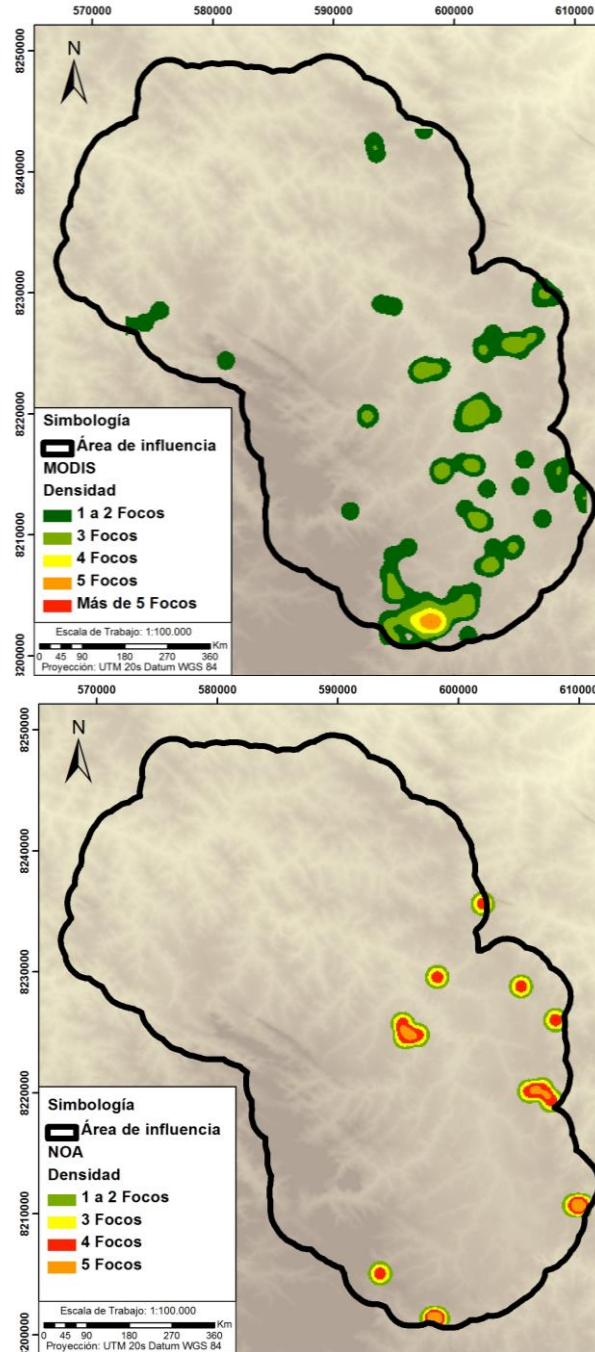


Figura 6: Densidad de focos de calor con los sensores NOAA y MODIS.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Evaluación y comparación de metodologías

Para comparar y validar los resultados de cada uno de los tres métodos (NBR, ABAMS y SMA) se realizó su aplicación en una imagen satelital (Correspondiente al 6 de Septiembre de 2010), posteriormente se verificaron los errores de omisión y comisión de cada producto

obtenido, mediante su comparación con el resultado del análisis visual de las áreas quemadas descrito anteriormente (Figura 7).

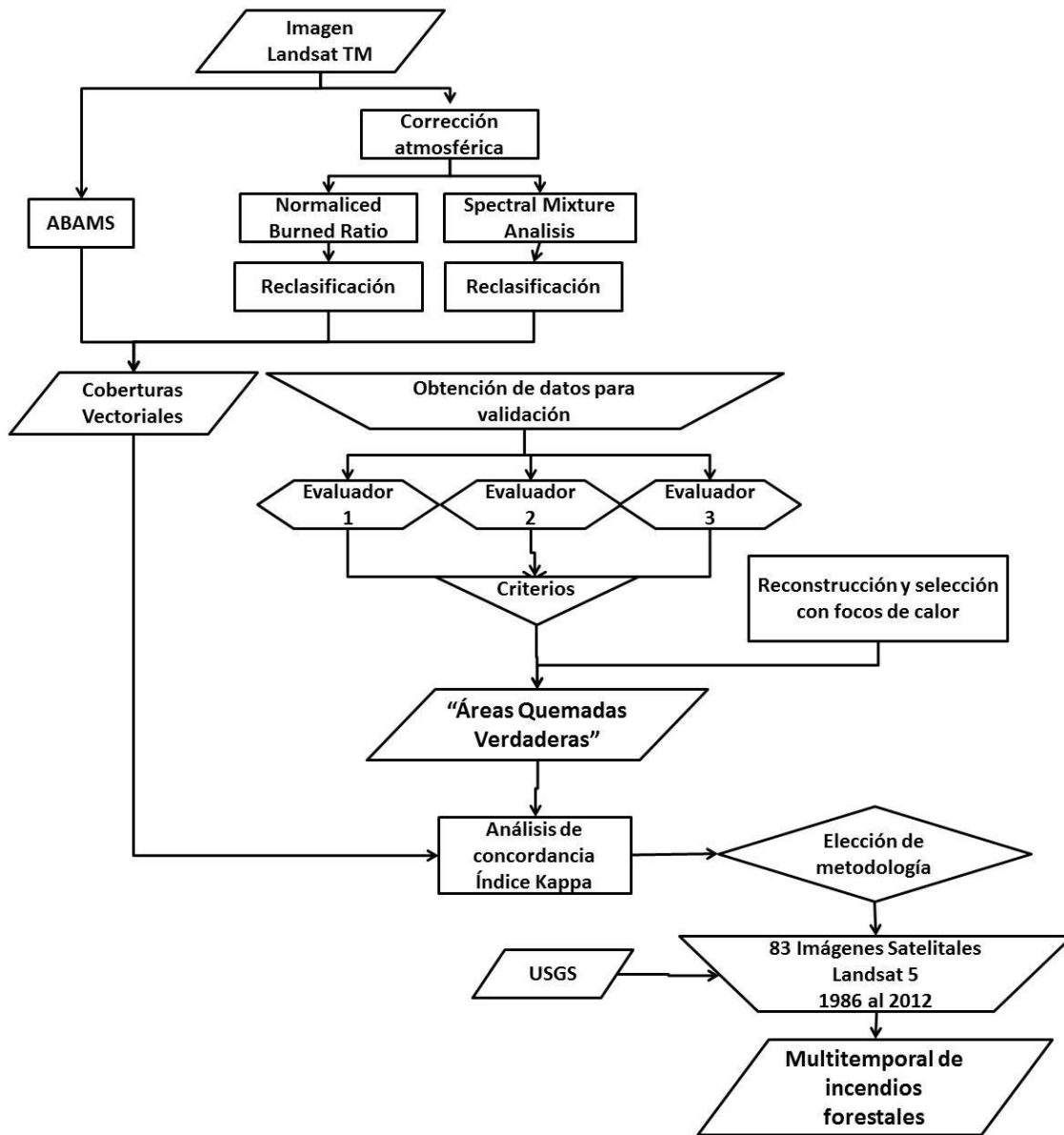


Figura 7: Esquema metodológico para el análisis espacial y multitemporal de los incendios forestales en la Cuenca de Zapocó.
Fuente: Elaboración propia.

Para realizar esta comparación se realizó un análisis de concordancia utilizando el índice Kappa (Abraira & Vargas 2009) dentro del programa SPSS 19. Este índice es utilizado al momento de realizar el análisis de fiabilidad de un método, herramienta o técnica de medida utilizada, especialmente si los datos son de tipo categórico. Se utilizó como información de

validación la cobertura resultante del análisis visual de las áreas quemadas, cruzando esta información con las seis coberturas obtenidas mediante los tres métodos. Se obtuvieron tres tablas que mostraron el grado de acuerdo o concordancia de cada método con la información tomada para la validación (Ver anexo análisis de datos).

5. RESULTADOS

5.1. Detección de áreas quemadas por medio de ABAMS, NBR y SMA

Estos resultados corresponden a la aplicación de ABAMS, NBR y SMA a la imagen Landsat TM del 6 de Septiembre de 2010. Los resultados de los diferentes métodos empleados para la estimación de áreas quemadas arrojaron resultados diferentes, tanto en la cantidad de cicatrices identificadas como en su extensión, como se puede observar en la Tabla 3:

Tabla 3: Áreas quemadas por método

Metodo	Superficie HA
NBR	2.814
ABAMS	4.783
SMA: Suelo, Vegetación y Agua	4.968
SMA: Área quemada, Suelo y Vegetación	5.204
MESMA: Suelo, Vegetación y Agua	6.741
MESMA: Área quemada, Suelo y Vegetación	5.538

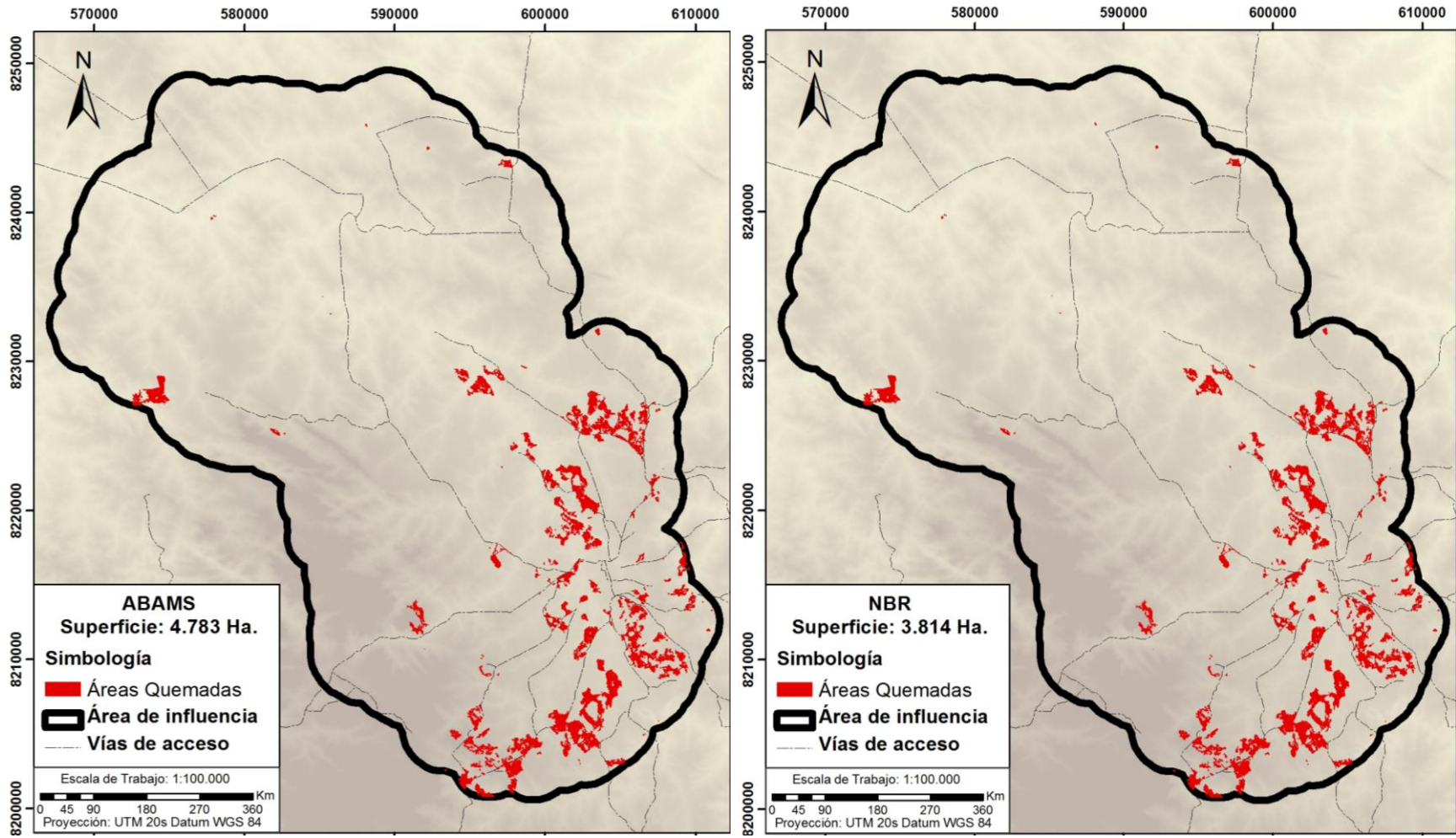


Figura 8: Áreas quemadas de NBR, ABAMS
 Fuente: Elaboración propia.

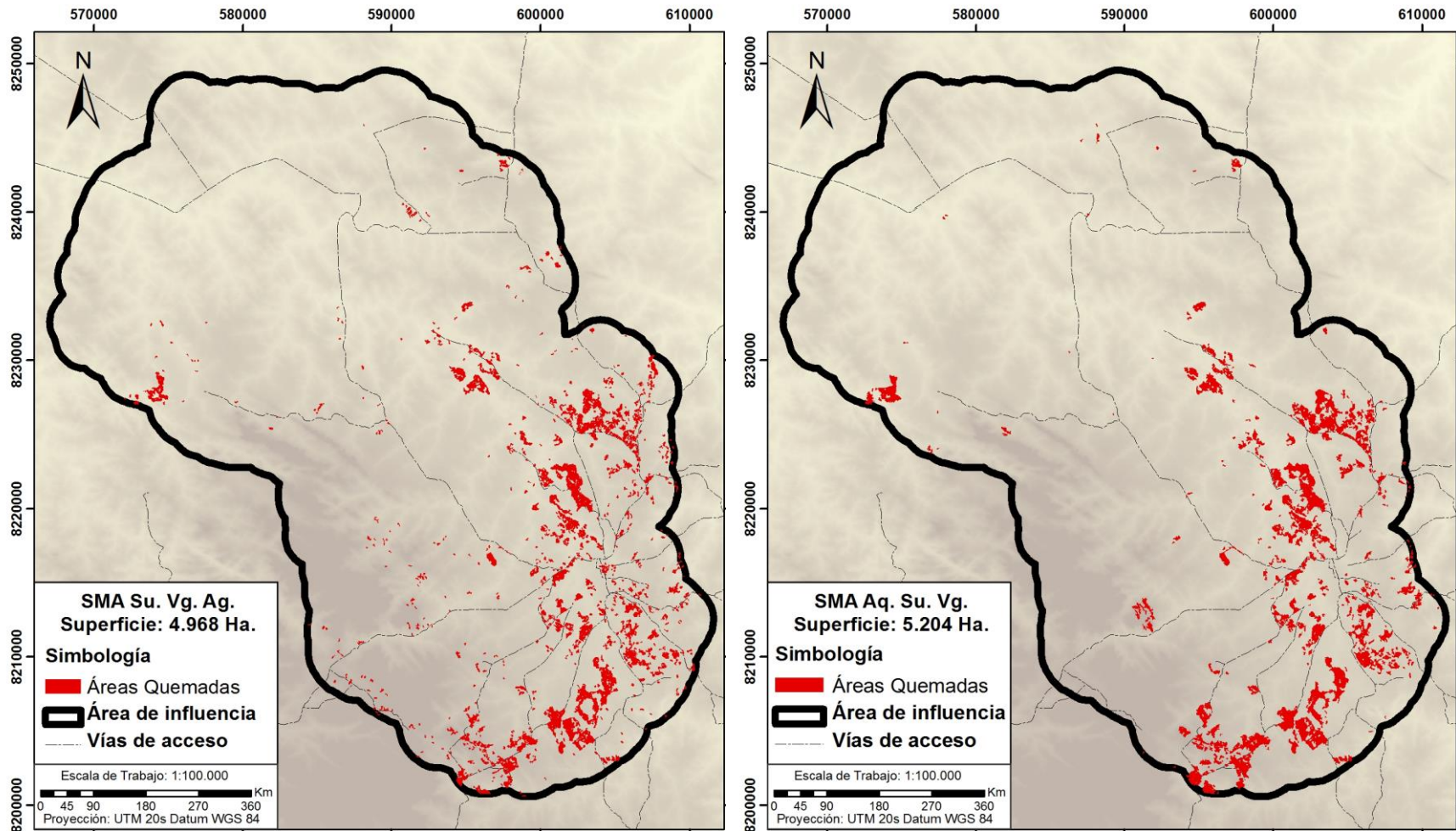


Figura 9: : Áreas quemadas de SMA con suelo, vegetación y agua, SMA con área quemada, suelo y vegetación.
 Fuente: Elaboración propia.

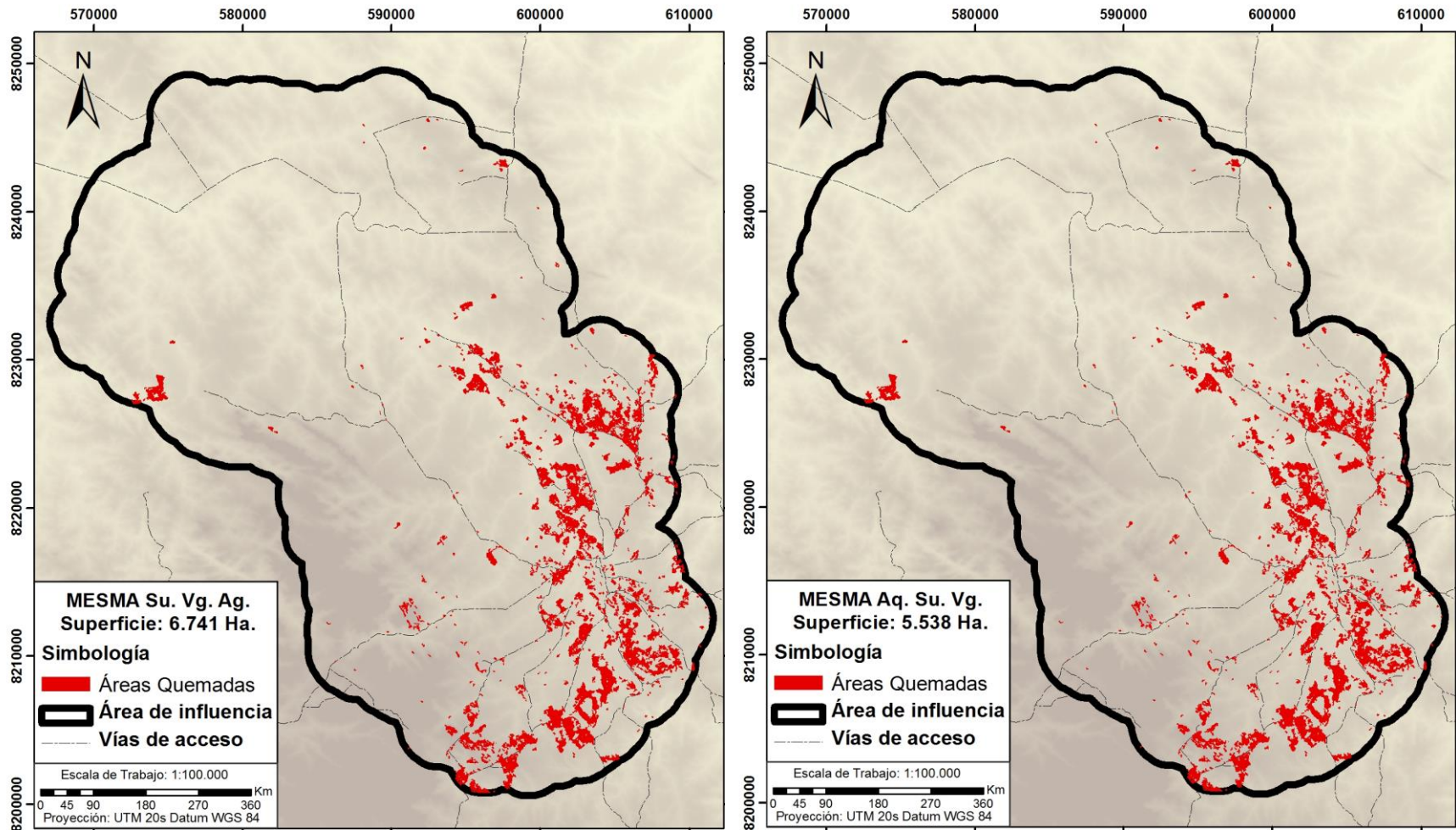


Figura 10: Áreas quemadas de MESMA con suelo, vegetación y agua, MESMA con área quemada, suelo y vegetación.
Fuente: Elaboración propia.

5.2. Evaluación y comparación de metodologías

5.2.1. Cartografía de áreas quemadas por medio de análisis visual

Por medio del análisis visual se cartografiaron 184 áreas quemadas, las cuales hacen un total de 9.699 hectáreas, abarcando el 7.25% de la cuenca. Una vez cruzadas con las áreas de densidad de focos de calor (Figura 6) se seleccionaron un total 86 áreas con un total de 5.309 hectáreas, correspondientes al 4% de la superficie de la cuenca (Figura 11).

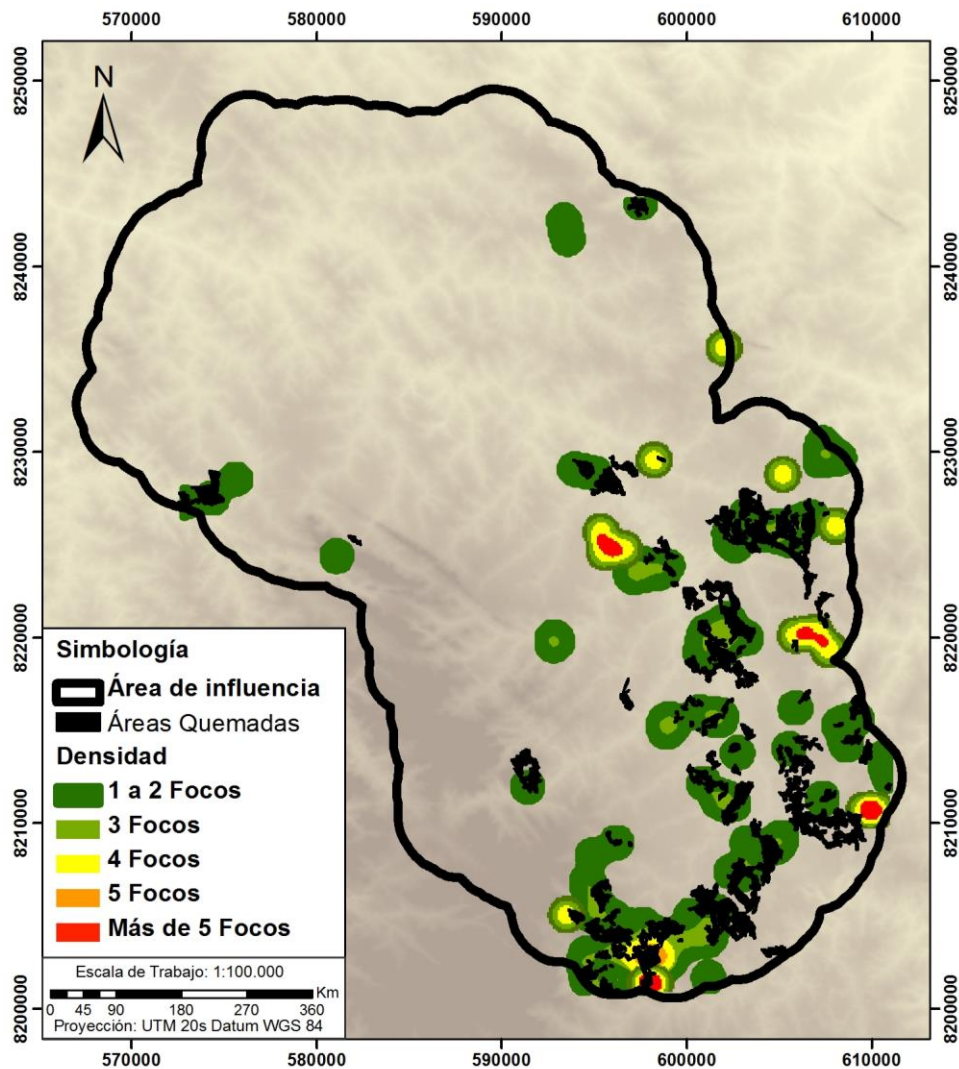


Figura 11: Densidad de focos de calor y áreas quemadas seleccionadas

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Análisis de concordancia

Posteriormente se procedió a realizar el análisis de concordancia mediante el índice Kappa (Abraira & Vargas 2009) entre los resultados de los seis métodos con las áreas quemadas de validación, de esta manera se obtuvieron los siguientes resultados:

- a) **NBR:** Se obtuvieron un total de 3.814 hectáreas quemadas por medio de esta metodología, realizando el análisis de concordancia se pudo constatar que este algoritmo detecto el 51% de las áreas y omitió el 49% de las áreas quemadas de validación. Además de esto se observó que el 3% de las áreas quemadas detectadas por el algoritmo corresponden a no quemadas, en cuanto a las áreas no quemadas de validación existe un acuerdo del 99%. En total se obtuvo una medida de concordancia de 0,582.

Tabla 4: Medida de concordancia entre NBR y áreas quemadas de validación

		Datos de referencia		Total
		Quemado	No quemado	
Datos de metodología	Quemado	2.718	96	3.814
	No quemado	2.591	127.212	129.804
Total		5.309	128.308	133.618

Categoría	Hectáreas	%
a) Quemado	2.718	51%
b) Comisión	96	3%
c) Omisión	2.591	49%
d) No quemado	127.212	99%
	133.618	

- **ABAMS:** Se obtuvieron un total de 4.783 hectáreas quemadas por medio de este software, de acuerdo al análisis de concordancia se observó que detecto el 82% de las áreas y omitió el 18% de las áreas quemadas de validación. Arrojo que solo 10% de las áreas quemadas detectadas por el algoritmo corresponden a no quemadas y que existe un acuerdo del 99% en las áreas tomadas como no quemadas. Para los resultados de este software se obtuvo una medida de concordancia de 0,822.

Tabla 5: Medida de concordancia entre ABAMS y áreas quemadas de validación

		Datos de referencia		Total
		Quemado	No quemado	
Datos de metodología	Quemado	4.327	456	4.783
	No quemado	982	127.853	128.835
Total		5.309	128.308	133.618

Categoría	Hectáreas	%
%a) Quemado	4.327	82%
b) Comisión	456	10%
c) Omisión	982	18%
d) No quemado	127.853	99%
TOTAL	133.618	

- **SMA:** Antes de describir los resultados obtenidos en las variantes empleadas en este método, es necesario mencionar que, como se puede apreciar en la tabla 6, para la variante MESMA se utilizaron colecciones espectrales con algunas variaciones. Esto debido a que al momento de realizar el cálculo de CoB y MASA para obtener firmas espectrales representativas de cada clase, los resultados son diferentes en las dos colecciones de firmas espectrales, debido esto a la variación en una clase diferente en MESMA1 (vegetación) y en MESMA2 (Áreas quemadas).

Tabla 6: Firmas espectrales a ser usadas en SMA /MESMA y clases seleccionadas como área quemada por medio de clasificación no supervisada (Iso-Data)

Variante de SMA/MESMA	Firmas espectrales	Clases clasificación no supervisada
SMA: Suelo, Vegetación y Agua	Suelo_X1319_Y1187, Vegetacion_X181_Y1117 Agua_X4578_Y3085	55, 70, 72, 73, 77, 79, 80,
SMA: Área quemada, Suelo y Vegetación	Fuego_X995_Y1561, Suelo_X1319_Y1187, Vegetacion_X181_Y1117	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 24.
MESMA: Suelo, Vegetación y Agua	Area_quemada_X1221_Y1435 Area_quemada_X985_Y1627 Area_quemada_X983_Y1627 Fuego_X995_Y1559 Fuego_X991_Y1561 Fuego_X1309_Y359 Rocas_X1115_Y1131 Rocas_X319_Y1501 Suelo_X177_Y1583 Suelo_X857_Y1113 Suelo_X837_Y1111 Vegetacion_rala_X367_Y573 Vegetacion_rala_X171_Y1081 Vegetacion_rala_X175_Y1091 VEgetacion_sombra_X293_Y157 VEgetacion_sombra_X329_Y575 VEgetacion_sombra_X363_Y573	5, 7, 9, 12, 16, 17,
MESMA: Área quemada, Suelo y Vegetación	Area_quemada_X955_Y1523 Area_quemada_X1_Y1253 Area_quemada_X1225_Y1459 Fuego_X995_Y1559 Fuego_X991_Y1561 Fuego_X1309_Y359 Rocas_X1115_Y1131 Rocas_X319_Y1501 Rocas_X1437_Y591 Suelo_X177_Y1583 VEgetacion_sombra_X329_Y575 VEgetacion_sombra_X363_Y573 VEgetacion_sombra_X293_Y157 Vegetacion_rala_X171_Y1081 Vegetacion_rala_X175_Y1091 Vegetacion_rala_X367_Y573 Area_quemada_X3_Y1243 Area_quemada_X977_Y1621	6, 10, 12, 19, 20,

- **SMA1:** Se obtuvieron un total de 4.969 hectáreas quemadas por medio de esta variante de SMA, de acuerdo al análisis de concordancia se observó que detecto el 64% de las

áreas y omitió el 32% de las áreas quemadas de validación. Arrojo que solo 36% de las áreas quemadas detectadas por el algoritmo corresponden a no quemadas y que existe un acuerdo del 99% en las áreas tomadas como no quemadas. Se obtuvo una medida de concordancia de 0.642.

Tabla 7: Medida de concordancia entre SMA1 y áreas quemadas de validación

		Datos de referencia		Total
		Quemado	No quemado	
Datos de metodología	Quemado	3.372	1.597	4.969
	No quemado	1.937	126.712	128.649
Total		5.309	128.308	133.618

Categoría	Hectáreas	%
a) Quemado	3.372	64%
b) Comisión	1.597	32%
c) Omisión	1.937	36%
d) No quemado	126.712	99%
	133.618	

- **SMA2:** Se obtuvieron un total de 5.205 hectáreas quemadas por medio de esta variante de SMA, de acuerdo al análisis de concordancia se observó que detecto el 75% de las áreas y omitió el 23% de las áreas quemadas de validación. Arrojo que solo 25% de las áreas quemadas detectadas por el algoritmo corresponden a no quemadas y que existe un acuerdo del 99% en las áreas tomadas como no quemadas. Se obtuvo una medida de concordancia de 0.751.

Tabla 8: Medida de concordancia entre SMA2 y áreas quemadas de validación

		Datos de referencia		Total
		Quemado	No quemado	
Datos de metodología	Quemado	4.002	1.203	5.205
	No quemado	1.308	127.105	128.413
Total		5.309	128.308	133.618

Categoría	Hectáreas	%
a) Quemado	4.002	75%
b) Comisión	1.203	23%
c) Omisión	1.308	25%
d) No quemado	127.105	99%
	133.618	

- **MESMA1:** Se obtuvieron un total de 5.205 hectáreas quemadas por medio de esta variante de MESMA, de acuerdo al análisis de concordancia se observó que detecto el 75% de las áreas y omitió el 23% de las áreas quemadas de validación. Arrojo que solo 25% de las áreas quemadas detectadas por el algoritmo corresponden a no quemadas y que existe un acuerdo del 99% en las áreas tomadas como no quemadas. Se obtuvo una medida de concordancia de 0.724.

Tabla 9: Medida de concordancia entre MESMA2 y áreas quemadas de validación

		Datos de referencia		Total
		Quemado	No quemado	
Datos de metodología	Quemado	4.436	2.305	6.741
	No quemado	874	126.003	126.877
Total		5.309	128.308	133.618

Categoría	Hectáreas	%
a) Quemado	4.436	84%
b) Comisión	2.305	34%
c) Omisión	874	16%
d) No quemado	126.003	98%
	133.618	

- **MESMA2:** Se obtuvieron un total de 5.538 hectáreas quemadas por medio de esta variante de SMA, de acuerdo al análisis de concordancia se observó que detecto el 75% de las áreas y omitió el 23% de las áreas quemadas de validación. Arrojo que solo 25% de las áreas quemadas detectadas por el algoritmo corresponden a no quemadas y que existe un acuerdo del 99% en las áreas tomadas como no quemadas. Se obtuvo una medida de concordancia de 0.761.

Tabla 10: Medida de concordancia entre MESMA2 y áreas quemadas de validación

		Datos de referencia		Total
		Quemado	No quemado	
Datos de metodología	Quemado	4.181	1.358	5.538
	No quemado	1.129	126.951	128.079
Total		5.309	128.308	133.618

Categoría	Hectáreas	%
a) Quemado	4.181	79%
b) Comisión	1.358	25%
c) Omisión	1.129	21%
d) No quemado	126.951	99%
	133.618	

Como podemos ver en los resultados expuestos anteriormente, de acuerdo al Índice Kappa la metodología que presenta un mayor grado de concordancia es ABAMS (0,822), no obstante los modelos de SMA2 (0,751) y MESMA2 (0,761), presentaron mayor grado de concordancia en comparación a los otros dos modelos de mezclas espectrales utilizados (SMA1 y MESMA2), esto debido a que se utilizó firmas espectrales de áreas quemadas para realizar el análisis.

Tabla 11: Resumen de resultados índice Kappa

Metodología	Índice Kappa	Error Típico	Grado de Acuerdo	Tiempo
NBR	0,582	0,006	Moderado	3 horas
ABAMS	0,822	0,004	Casi perfecto	4 horas
SMA1	0,642	0,006	Sustancial	8 horas
SMA2	0,751	0,005	Sustancial	8 horas
MESMA1	0,724	0,005	Sustancial	8 horas
MESMA2	0,761	0,005	Sustancial	8 horas

Otro factor que influyó en la elección de ABAMS para realizar todo el estudio fue el tiempo necesario para aplicar cada metodología a la imagen, debido a que esta metodología resulta ser el doble de eficiente en comparación con las variantes de SMA utilizadas, dado que es necesario solo la mitad de tiempo.

5.3. Obtención de áreas quemadas

Validadas las metodologías para obtener áreas quemadas, se procedió a la obtención de áreas quemadas por medio del programa ABAMS en 5 imágenes Landsat ETM+ y 77 imágenes Landsat TM, las cuales están distribuidas en los 26 años del estudio (Ver anexo 1).

Se obtuvo la superficie de las áreas quemadas para cada año, las cuales son expuestas en la Figura 12, estos resultados muestran un promedio de 4.088 ha, los años donde se registró una mayor extensión de áreas quemadas fueron el 2001, 2004 y 2006.

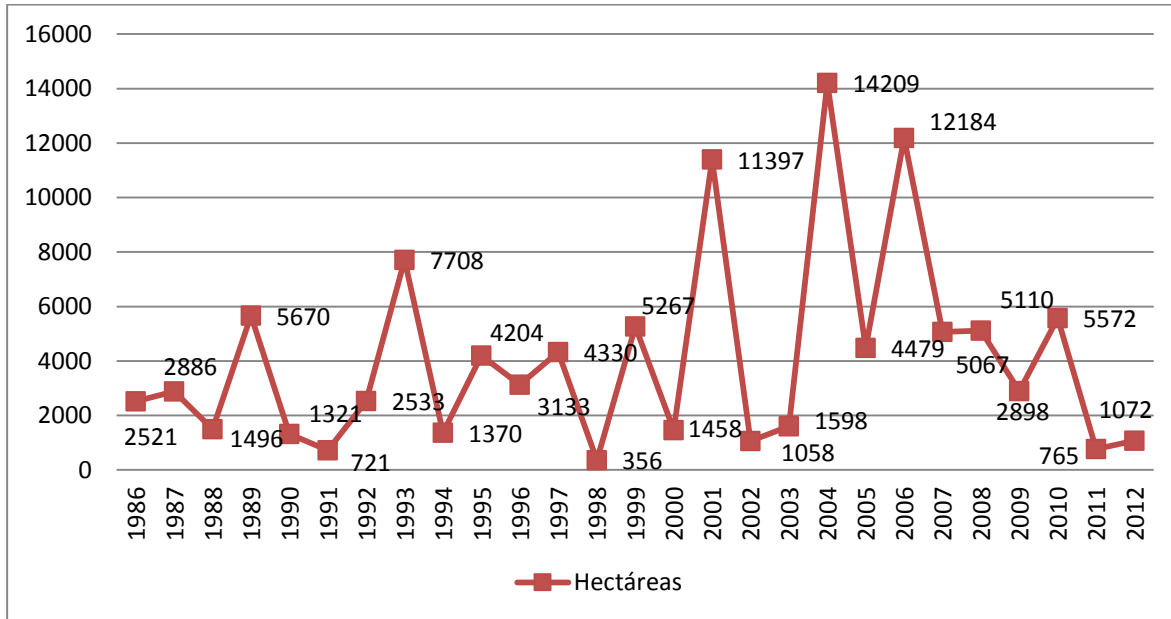


Figura 12: Áreas quemadas en hectáreas por año.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados reportan un total de 58.492 ha de áreas quemadas en todo el periodo del estudio (Ver tabla 14). No obstante, si analizamos cada uno de los dos subperiodos en los cuales se dividieron los resultados, vemos que existió una mayor extensión de áreas quemadas entre los años 2000 a 2012, en el cual se reportó 51.114 ha frente a 20.459 ha en los años 1986 a 1999 (Ver tabla 12 y 13).

Utilizando como base un mapa de vegetación (DIORTECU 2009), se pudo apreciar que del total de áreas quemadas, el 73% corresponden a incendios en algún tipo de bosque de la Chiquitanía, siendo los más afectados Bosques subhúmedos semidecíduos de la Chiquitanía, con 33.797 ha (Ver tabla 14).

Tabla 12: Tipo de vegetación quemada durante los años 1986 a 1999

Tipo de Vegetación	Hectáreas
Bosques subhúmedos semidecíduos de la Chiquitanía.	8.715
Bosque bajo sobre suelos pedregosos de la Chiquitanía.	880
Cerrado	5.817
Bosque hidrofítico de los valles de la Chiquitanía central.	7
Complejo de vegetación antrópica.	5.040
Total Superficie Quemada	20.459

Tabla 13: Tipo de vegetación quemada durante los años 2000 a 2012

Tipo de Vegetación	Hectáreas
Bosques subhúmedos semidecíduos de la Chiquitanía.	31.186
Bosque bajo sobre suelos pedregosos de la Chiquitanía.	8.702
Cerrado	5.169
Bosque hidrofítico de los valles de la Chiquitanía central.	32
Complejo de vegetación antrópica.	6.024
Total Superficie Quemada	51.114

Tabla 14: Tipo de vegetación quemada durante los años 1986 a 2012

Tipo de Vegetación	Hectáreas
Bosques subhúmedos semidecíduos de la Chiquitanía.	33.797
Bosque bajo sobre suelos pedregosos de la Chiquitanía.	9.052
Cerrado	6.739
Bosque hidrofítico de los valles de la Chiquitanía central.	35
Complejo de vegetación antrópica.	8.869
Total Superficie Quemada	58.492

Con respecto al comportamiento espacial de áreas quemadas en la cuenca, se pudo observar que los lugares con mayor repetitividad son los que se encuentran alrededor de la ciudad de Concepción y a los costados de los caminos principales y secundarios que conectan los diferentes centros poblados dentro de la cuenca (Figura 13).

Así mismo, realizando un análisis histórico en todo el periodo de estudio, es decir estableciendo el año donde se observó el primer año de ocurrencia para un área quemada obviando las áreas quemadas de siguientes años en la misma área, se observó una tendencia similar a la descrita anteriormente, puesto que las primeras áreas quemadas en el periodo de estudio se registran en las áreas cercanas al centro urbano y a los costados de las vías de acceso primarias y secundarias (Ver figura 14).

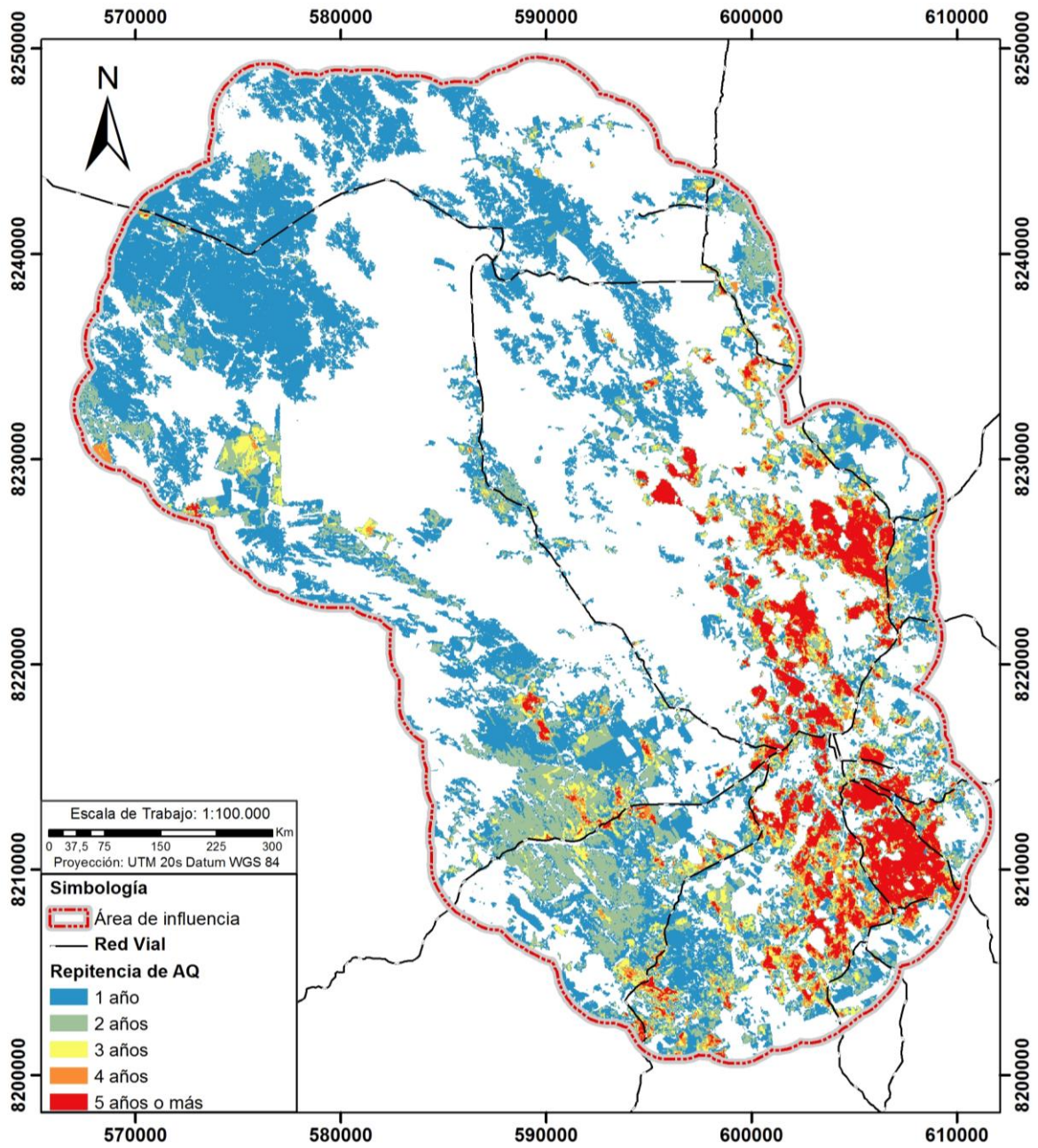


Figura 13: Repetitividad de áreas quemadas en la cuenca de Zapocó entre los años 1986 al 2012.
 Fuente: Elaboración propia.

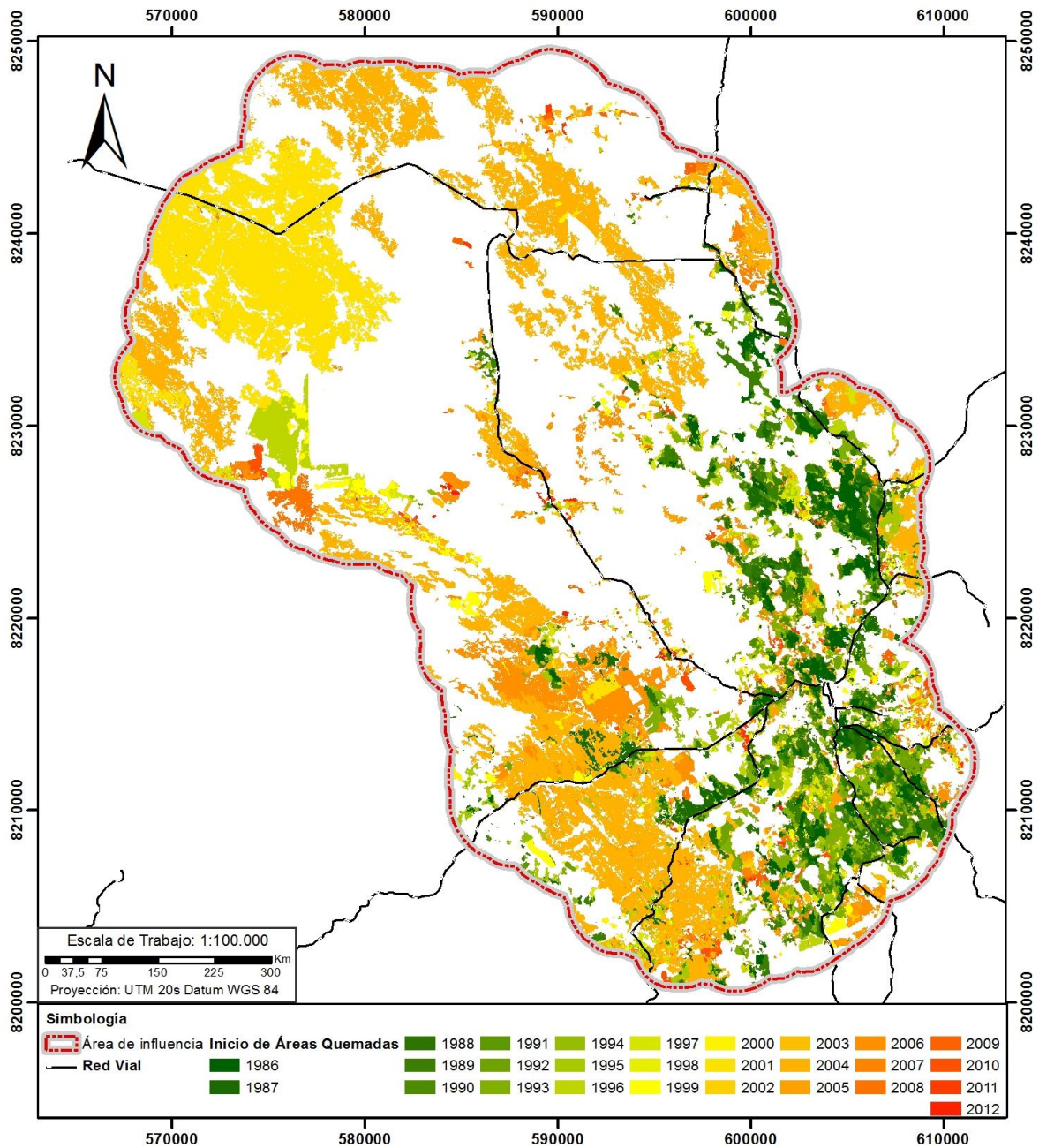


Figura 14: Histórico 1986 a 2012.
 Fuente: Elaboración propia.

Esta tendencia es más acentuada en el primer subperiodo de estudio que en el segundo (Ver Figuras 15 y 16), esto deja claro que en entre los años 1986 y 1999 se dieron los primeros procesos de habilitación de terreno para usos agrícolas.

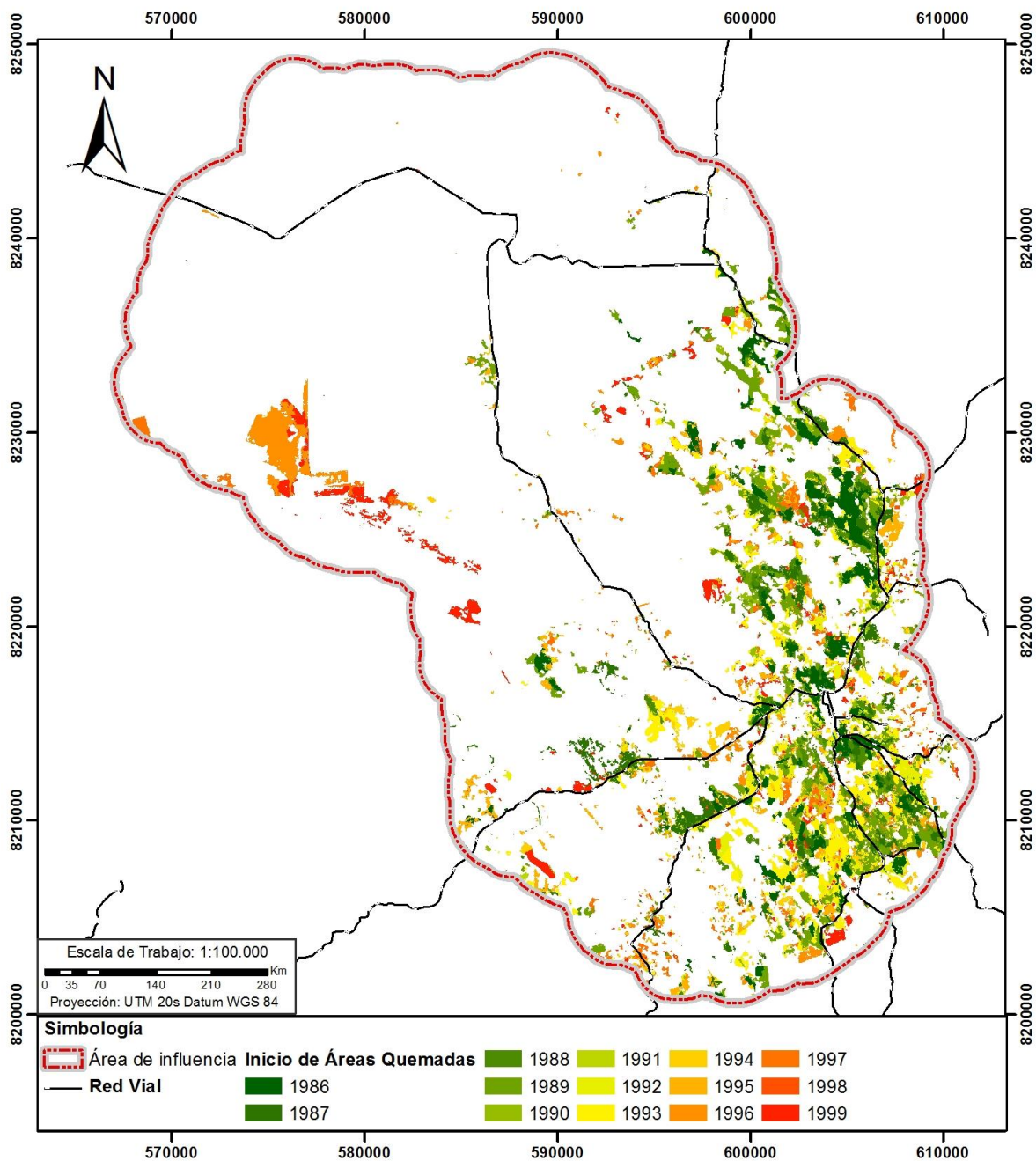


Figura 15: Histórico 1986 a 1999.
 Fuente: Elaboración propia.

Una vez consolidadas estas actividades alrededor del centro urbano y las vías de acceso primarias, se procedió a habilitar más terreno en lugares más alejados, cercanos a zonas boscosas, lo cual aumento la cantidad y extensión de incendios forestales de gran magnitud, como se evidencio en los apartados anteriores (Ver figura 16).

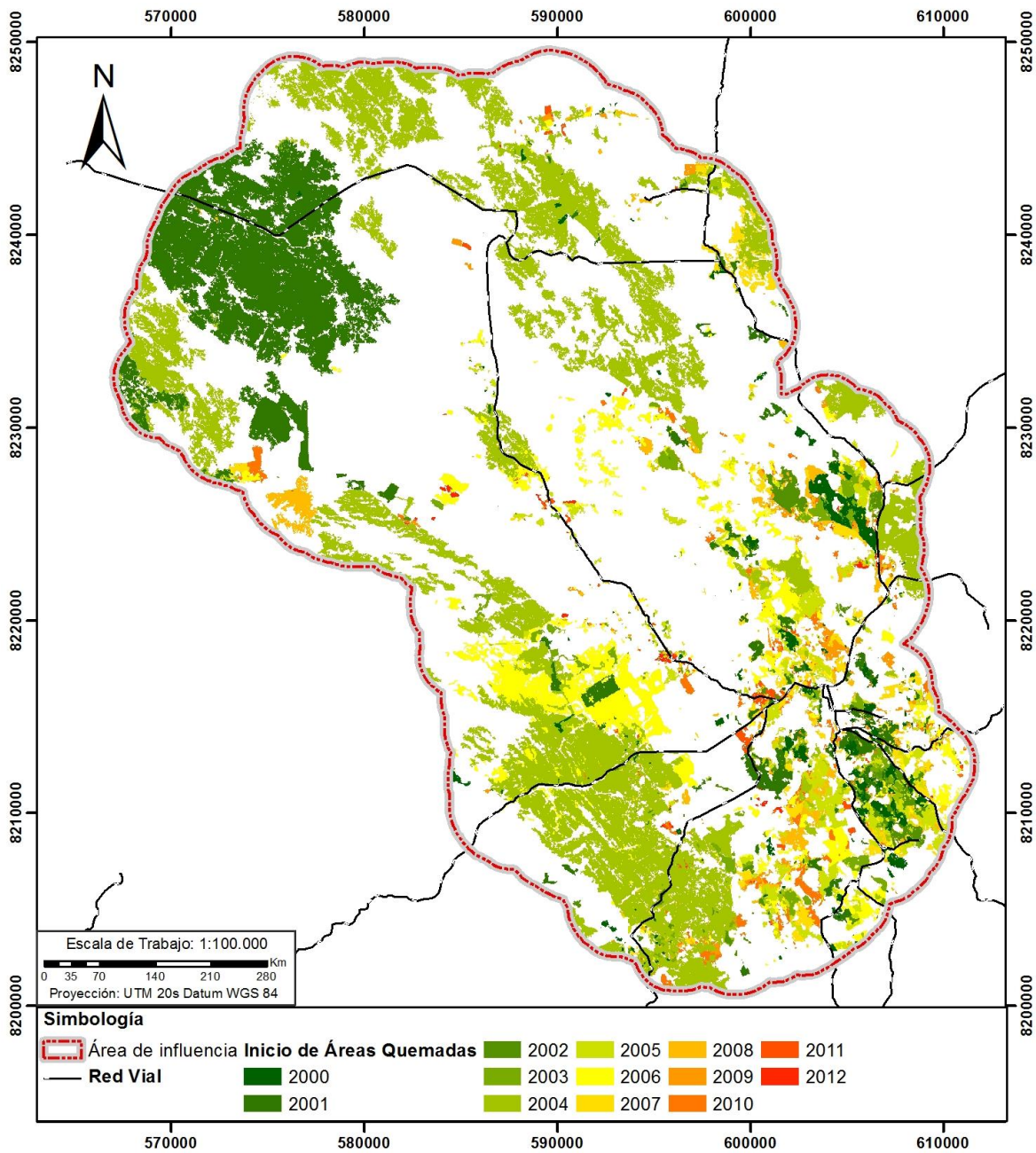


Figura 16: Histórico 2000 a 2012.
 Fuente: Elaboración propia.

6. DISCUSIÓN

Al iniciar este estudio, un aspecto crítico fue la elección de una metodología certera para estimar las áreas quemadas en la Chiquitania. Pese a que existen trabajos realizados en la región y a una escala multitemporal con NBR estos fueron realizados con MODIS (Rodríguez Montellano 2012), suponiendo grandes diferencias de escala frente a imágenes Landsat TM y ETM+, siendo que el primer sensor tiene una resolución de 1000 metros por cada lado del píxel y los últimos tienen una resolución más fina de 30 metros.

Así mismo, existen varias investigaciones que plantean la validez del uso de mezclas espectrales (SMA) en la estimación de áreas quemadas, principalmente en la península Ibérica. Estas investigaciones evidencian una gran robustez puesto que llegan a obtener un índice Kappa ligeramente superior a 0,85 (Quintano *et al* 2003, Fernandez-Manzo *et al.* 2009).

Pese a estas experiencias previas, no se contaba con una investigación que se acercara al contexto del área de estudio, por lo cual fue necesario escoger y evaluar tres métodos (NBR, ABAMS y SMA), con el objetivo de ver cuál estimaba de mejor manera las áreas quemadas en el área, la cual presenta ciertas particularidades como la presencia de varios cuerpos de agua así como pastizales naturales y de origen antrópico, siendo estos susceptibles de ser confundidos con áreas quemadas (Bastarrika 2009).

Los resultados de esta evaluación arrojaron datos distintos a los obtenidos por Quintano *et al.* (2003) con SMA alcanzando un Kappa de 0.75 en el mejor de los casos. En cuanto a NBR, se evidenció que presenta el menor grado de comisión de las cuatro metodologías y el mayor grado de omisión lo cual repercutió presentando un Kappa de 0.58.

ABAMS fue la metodología que presentó los mejores resultados, alcanzando un Kappa de 0,82 que si bien es inferior a los resultados obtenidos por Bastarrika (2009) en la Península Ibérica, con un Kappa de 0,96, es bastante superior a los Kappa de las otras dos metodologías evaluadas. Además es un método que requiere dos veces menos tiempo que las otras metodologías.

No se pretende concluir que ABAMS es mejor que las otras dos metodologías evaluadas, no obstante a partir de los resultados encontrados es la que mejores resultados presentó estimando áreas quemadas en el área específica de estudio, esto tanto en cuanto a eficacia como a eficiencia.

De acuerdo a los resultados evidenciados, se puede afirmar que al igual que otros estudios realizados a una escala mayor (Rodríguez Montellano 2012), la dinámica de los incendios sigue una trayectoria cíclica, debido a que después de un gran incendio, como en los años 2001, 2004 y 2006, le sigue una disminución en la superficie de áreas quemadas en los años siguientes. Además de esto, se corrobora la predicción hecha por Rodríguez Montellano (2012), que afirma que el año 2011 iba a darse una disminución importante de incendios.

El análisis histórico de las áreas quemadas en la cuenca, evidencia que entre los años 1986 y 1999 se dieron los primeros procesos de habilitación de terreno para usos agrícolas, y una vez consolidadas estas actividades alrededor del centro urbano y las vías de acceso primarias, se procedió a habilitar más terreno en lugares más alejados, cercanos a zonas boscosas. Es evidente que el fuego ha sido utilizado en la cuenca como un método para la habilitación del terreno para usos agrícolas, a medida que al pasar los años existió una demanda creciente de nuevas tierras destinadas a estas actividades, tendencia que Killeen *et al.* (2007) describe para el municipio de Concepción.

,

7. CONCLUSIONES

La metodología que presentó mejores resultados fue ABAMS. Pese a presentar un índice Kappa un poco inferior a los observados en otras investigaciones, su fiabilidad tomando en cuenta las particularidades del área de estudio, es bastante superior a los otros dos métodos evaluados.

Utilizando ABAMS, se pudo analizar que en toda la cuenca se han quemado 58.492 ha entre 1986 y 2012, no obstante existió una mayor extensión de áreas quemadas entre los años 2000 a 2012, en el cual se reportó 51.114 ha, mientras que entre los años 1986 a 1999 la superficie quemada fue de 20.459 ha. Así mismo, se pudo apreciar que del total de áreas quemadas entre 1986 y 2012, el 73% (33.797 ha) corresponden a incendios en algún tipo de bosque de la Chiquitanía, siendo los más afectados Bosques subhúmedos semidecíduos de la Chiquitanía.

A partir de los resultados obtenidos se puede evidenciar que en la cuenca Zapocó existe una tendencia cíclica en la quema de grandes extensiones. Así mismo, examinando los datos de inicio y ocurrencia de las áreas quemadas en el periodo de estudio, es evidente la creciente demanda de nuevas áreas que son quemadas debido a que las áreas quemadas más recientes se encuentran en zonas alejadas de la ciudad de Concepción y los caminos de acceso.

A partir de los datos de repetitividad de las áreas quemadas es posible establecer zonas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de incendios o zonas con mayor presión antrópica. Estas zonas en la cuenca se encuentran alrededor del centro urbano y las vías de acceso primarias y secundarias.

8. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos se recomienda:

Utilizar Imágenes Landsat TM y ETM+ y ABAMS para el análisis de áreas quemadas en la región de la Chiquitania.

Realizar un estudio multitemporal para analizar la posible influencia de factores ambientales o climáticas en la dinámica de áreas quemadas en la cuenca.

Realizar estudios sobre el impacto de la repetitividad de incendios en el bosque subhúmedo semideciduo de la Chiquitania y ciertas áreas de alto valor para la conservación de la cuenca.

Analizar si existe relación entre procesos migratorios a la zona y la mayor ocurrencia de incendios forestales.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraira, V. & A. Pérez de Vargas. 1999. Generalization of the kappa coefficient for ordinal categorical data, multiple observers and incomplete designs. *Qüestiió* 23: 561-571.
- Bastarrika, A. 2009. Cartografía automática de área quemada a nivel local-regional mediante algoritmos de contexto espacial. Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, España. 293 p.
- Chuvieco, E. S 1996. Fundamentos de Teledetección espacial. Ediciones Rialp. Madrid España
- DIRENA. 2006. Programa estratégico de prevención y control de incendios forestales en el departamento de Santa Cruz. Documento técnico. SATIF. Santa Cruz, Bolivia.
- EcoAdapt. 2012. Análisis del Sistema Socio Ecológico (SSE) de la cuenca Zapocó: Interacciones a diferentes escalas y valoración de los servicios ecosistémicos. Documento técnico. FCBC. Santa Cruz, Bolivia.
- DIORTECU. 2009. Mapa de Vegetación de Santa Cruz-Bolivia (Shapefile). Dirección de Ordenamiento Territorial. Santa Cruz, Bolivia.
- Fernandez-Manzo, Ó, C. Quintano y A. Fernández-Manzo. 2009. Combining spectral mixture analysis and objet-based classification for fire severity mapping. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 18(3): 296-313.
- Killeen, T. J, Villegas Z, Soria L y Soares-Filho B. 2005. Tendencias de la deforestación en los Municipios de San Javier y Concepción. MHNNKM. Santa Cruz. Bolivia.
- Labrador, M., J. A. Évora & M. Arbelo. 2012. Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. Proyecto SATELMAC. Canarias, España.
- MDSP – BID. 2002. Mapa Fisiográfico de Bolivia y memoria técnica. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. La Paz, Bolivia.
- Norton, J.M. 2006. The use of remote sensing indices to determine wildland burn severity in semiarid sagebrush steppe rangelands using Landsat ETM+ and SPOT 5. Tesis de Maestría, Idaho State University. Estados Unidos. 42 p.
- Pausas, J. G. 2012. Incendios Forestales, una introducción a la ecología del fuego. Catarata y CSIC. España 128 p.
- Pereira, M. C. y A. W. Setzer .1993. Spectral characteristics of deforestation fires in NOAA-AVHRR images. *International Journal of Remote Sensing* 14: 583-597.

- Pinto, C. & E. Alvarado. 2007. Efectos del fuego en bosque de producción forestal en Bolivia. pp. 24. Instituto Boliviano de Investigación Forestal, Santa Cruz. 53 p.
- Pinty, B. y M. M. Verstraete. 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio* 101: 15-20.
- Quintano, C., J. Delgado, O. Fernández, J. Ramírez y A. Fernández-Manzo. 2003. Estimación del área quemada por incendios forestales empleando el modelo de Mezclas Espectrales desde una perspectiva Multitemporal. *Teledetección y Desarrollo Rural*. X Congreso de Teledetección. Cáceres, España.
- Roberts, D., K. Halligan & P. Dennison. 2007. *VIPER Tools User Manual: Version 1.5*. Creative Commons. California, Estados Unidos.
- Rodríguez Montellano, A. 2012. Cartografía multitemporal de quemas e incendios forestales en Bolivia: Detección y validación post-incendio. *Ecología en Bolivia* 47(1): 53-71.
- Roy, D., P. E. Lewis & C. O. Justice. 2002. Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data bi-directional reflectance model-based expectation approach. *Remote Sensing of Environment* 83: 263-286.
- Shimabukuro, Y. E., C. Quintano, A. Fernández-Manso & O. Fernández-Manso. 2006. Mapping burned areas in Mediterranean countries using spectral mixture analysis from a unitemporal perspective. *International Journal of Remote Sensing* 27: 645-662.
- Souza, C. M., D. A. Roberts & A. Monteiro. 2005. Multitemporal analysis of degraded forests in the southern Brazilian Amazon. *Earth Interactions* 9: 1-25.
- SITAP. 2009. Plan Nacional de Manejo de cuencas hidrográficas (Shapefile). Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural. La Paz, Bolivia.
- Zambrana, V., J. Céspedes, A. Crespo & D. Espinoza. 2008. Estudio de recursos hídricos, biológicos y de clima para la formulación de planes municipales de ordenamiento territorial del municipio de Concepción. Informe Técnico. FCBC. Santa Cruz, Bolivia.

Anexos

Anexo 1: Listado de imágenes obtenidas y procesadas

Código USGS	No	Sensor	Fecha	Path	Row	Stack	ABAMS
LT52300711986119CUB01	I4	TM	29-abr-86	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711986151CUB00	I5	TM	31-may-86	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711986199AAA04	I1	TM	18-jul-86	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711986215XXX04	I2	TM	03-ago-86	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711986263XXX03	I3	TM	20-sep-86	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711987186CUB00	I41	TM	05-jul-87	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711987234CUB00	I42	TM	22-ago-87	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711987266CUB00	I43	TM	23-sep-87	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711988205CUB00	I44	TM	23-jul-88	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711988237CUB00	I45	TM	24-ago-88	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711988253CUB00	I46	TM	09-sep-88	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711989223CUB00	I47	TM	11-ago-89	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711989271CUB00	I48	TM	28-sep-89	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711989287CUB00	I49	TM	14-oct-89	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711990210CUB00	I50	TM	29-jul-90	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711990226CUB00	I51	TM	14-ago-90	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711990258CUB00	I52	TM	15-sep-90	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711991197CUB00	I53	TM	16-jul-91	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711991229CUB00	I54	TM	17-ago-91	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711991309CUB00	I55	TM	05-nov-91	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711992216CUB00	I56	TM	03-ago-92	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711992264CUB00	I57	TM	20-sep-92	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711992296CUB00	I58	TM	22-oct-92	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711993202CUB00	I59	TM	21-jul-93	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711993218CUB00	I60	TM	06-ago-93	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711993250CUB00	I61	TM	07-sep-93	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711994269CUB00	I62	TM	26-sep-94	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711994285CUB00	I63	TM	12-oct-94	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711995208CUB00	I64	TM	27-jul-95	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711995224CUB00	I65	TM	12-ago-95	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711995256CUB00	I66	TM	13-sep-95	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711996227XXX01	I68	TM	14-ago-96	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711996291XXX01	I69	TM	17-oct-96	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711997245AAA02	I70	TM	02-sep-97	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711997261XXX01	I71	TM	18-sep-97	230	71	Hecho	Hecho

Código USGS	No	Sensor	Fecha	Path	Row	Stack	ABAMS
LT52300711997277XXX03	I77	TM	04-oct-97	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711998200XXX02	I78	TM	19-jul-98	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711998232XXX01	I72	TM	20-ago-98	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711999235CPE00	I74	TM	23-ago-99	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711999251COA01	I75	TM	08-sep-99	230	71	Hecho	Hecho
LT52300711999283XXX00	I76	TM	10-oct-99	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712000190CUB03	I22	TM	08-jul-00	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712000238XXX01	I23	TM	25-ago-00	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712000254CUB02	I24	TM	10-sep-00	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712001224COA00	I34	TM	12-ago-01	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712001272COA00	I35	TM	29-sep-01	230	71	Hecho	Hecho
LE72300712002219EDC00	I39	ETM+	07-ago-02	230	71	Hecho	Hecho
LE72300712002251AGS00	I40	ETM+	08-sep-02	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712003230CUB00	I25	TM	18-ago-03	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712003262CUB00	I26	TM	19-sep-03	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712003294COA00	I27	TM	21-oct-03	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712004217COA00	I6	TM	04-ago-04	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712004233CUB00	I7	TM	20-ago-04	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712004265COA00	I8	TM	21-sep-04	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712005235COA00	I9	TM	23-ago-05	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712005251COA00	I10	TM	08-sep-05	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712005283COA00	I11	TM	10-oct-05	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712006238CUB00	I31	TM	26-ago-06	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712006254CUB00	I32	TM	11-sep-06	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712006270CUB00	I33	TM	27-sep-06	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712007225CUB00	I13	TM	13-ago-07	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712007257CUB00	I14	TM	14-sep-07	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712007273CUB00	I15	TM	30-sep-07	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712008228CUB00	I16	TM	15-ago-08	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712008244CUB00	I17	TM	31-ago-08	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712008260CUB00	I18	TM	16-sep-08	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712009182COA00	I36	TM	01-jul-09	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712009230COA02	I37	TM	18-ago-09	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712009278COA01	I38	TM	05-oct-09	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712010121CUB00	I1*	TM	01-may-10	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712010185CUB00	I19	TM	04-jul-10	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712010233CUB00	I20	TM	21-ago-10	230	71	Hecho	Hecho

Código USGS	No	Sensor	Fecha	Path	Row	Stack	ABAMS
LT52300712010249CUB00	I21	TM	06-sep-10	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712011204CUB01	I28	TM	23-jul-11	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712011236CUB00	I29	TM	24-ago-11	230	71	Hecho	Hecho
LT52300712011300CUB00	I30	TM	27-oct-11	230	71	Hecho	Hecho
LE72300712012215EDC00	I79	ETM+	02-ago-12	230	71	Hecho	Hecho
LE72300712012183EDC00	I80	ETM+	01-jul-12	230	71	Hecho	Hecho
LE72300712012247EDC00	I81	ETM+	03-sep-12	230	71	Hecho	Hecho

No. Corresponde al número de procesamiento dentro de ABAMS.

* Esta imagen tiene esta numeración debido a que fue procesada como referencia dentro de la herramienta ABAMS al momento de realizar el análisis entre las tres metodologías.