



Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción
Facultad de Ciencias y Tecnología
Centro de Tecnología Apropriada

Maestría en Gestión de Riesgo de Desastres y Adaptación al Cambio Climático

Análisis de la ocurrencia de incendios forestales y su relación con el fenómeno climático de El Niño – Oscilación Sur (ENOS) en el Paraguay 2001-2019

Pierre Álvaro Florentín Díaz

Asesor: Prof. PhD Alberto Ramírez

Tesis de Maestría

Orientación Académica

Asunción, julio de 2020



Con el apoyo de:





Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción
Facultad de Ciencias y Tecnología
Centro de Tecnología Apropriada

Maestría en Gestión de Riesgo de Desastres y Adaptación al Cambio Climático

**Análisis de la ocurrencia de incendios forestales y su relación con
el fenómeno climático de El Niño – Oscilación Sur (ENOS) en el
Paraguay 2001-2019**

Pierre Álvaro Florentín Díaz

Asesor: Prof. PhD Alberto Ramírez

Tesis de Maestría

Orientación Académica

Asunción, julio de 2020



“La presente publicación ha sido elaborada con el apoyo del CONACYT. El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva de los autores y en ningún caso se debe considerar que refleja la opinión del CONACYT”.

Dedicatoria

A todos mis mentores, quienes han despertado mi interés por el ámbito académico.

Agradecimientos

A mi tutor profesor PhD Alberto Ramírez, por confiar en mi capacidad y por sus valiosas enseñanzas y acompañamiento para la concreción de este trabajo.

A la Ing. For. Larissa Rejalaga, por haberme proporcionado el impulso para la elección del tema de investigación y por el asesoramiento técnico.

A la Ing. Andrea Espínola, por haberme asesorado técnicamente en múltiples ocasiones.

Al Lic. Freide Amarilla y al TEM. Rubén Centurión, por facilitarme el espacio laboral para la conclusión de la investigación.

A María Victoria Zavala, por inspirarme a recorrer las sendas de la ciencia y la investigación.

A la M.Sc. Karen Backes, por la valiosa ayuda técnica proporcionada.

Y a las coordinadoras y todos los docentes de la Maestría, quienes me inspiraron para el logro del presente trabajo.

Reconocimientos

A la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Facultad de Ciencias y Tecnología, Centro de Tecnología Apropiable y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por brindarme la oportunidad de desarrollar capacidades, competencias y hacer posible que se haya gestado y concretado el presente trabajo de investigación.

Índice

Índice de Figuras	x
Índice de Tablas	xi
Listado de Siglas	xii
Resumen	xiv
Abstract	xv
1. Introducción	1
2. Hipótesis y Objetivos	6
2.1. Hipótesis	6
2.2. Objetivos.....	6
2.2.1. Objetivo general	6
2.2.2. Objetivos específicos	6
3. MÉTODOS Y DATOS	7
3.1. Alcance y descripción del área de estudio	7
3.1.1. Ecorregiones del Paraguay.....	9
3.1.1.1. Bosque Atlántico del Alto Paraná.....	9
3.1.1.2. Chaco Húmedo	9
3.1.1.3. Chaco Seco	9
3.1.1.4. El Pantanal	9
3.1.1.5. El Cerrado	10
3.2. Datos y métodos de procesamiento.....	10
3.2.1. Focos de Calor.....	10
3.2.1.1. Obtención de datos.....	11
3.2.1.2. Procesamiento de datos.....	11
3.2.1.3. Cruzamiento de focos de calor con ecorregiones	11

3.2.1.4.	Elaboración de mapas de focos de calor por ecorregión.....	11
3.2.2.	Áreas quemadas	12
3.2.2.1.	Obtención de datos.....	12
3.2.2.2.	Procesamiento de datos.....	14
3.2.2.3.	Cruzamiento de áreas quemadas con ecorregiones.....	15
3.2.2.4.	Elaboración de mapas de áreas quemadas por ecorregión.....	15
3.3.	Correlación con el fenómeno ENOS.....	16
4.	Resultados y Discusión	21
4.1.	Años con más focos de calor	21
4.2.	Focos de calor por ecorregiones, periodo 2001 al 2019	22
4.3.	Focos de Calor años Niño, Niña y Neutro	24
4.4.	Años con más Áreas Quemadas.....	26
4.5.	Áreas quemadas (ha) por años y ecorregiones.....	27
4.6.	Áreas quemadas (ha) años Niño, Niña y Neutro.....	30
4.7.	Correlación ENOS con Focos de calor y Áreas quemadas.....	32
5.	Conclusiones.....	40
	Referencias Bibliográficas	43

Índice de Figuras

Figura 3.1. Ecorregiones del Paraguay.....	8
Figura 3.2. Esquema del procesamiento de Focos de Calor.....	12
Figura 3.3. Esquema de procesamiento de productos de Áreas Quemadas.	16
Figura 3.4. Región Niño 3.4, para medir el ONI. Fuente: CPC, NOAA (2020).....	17
Figura 4.1. Mapa del año 2002 con más focos de calor.	23
Figura 4.2. Focos de calor por ecorregión y año. Fuente: elaboración propia.	24
Figura 4.3. Áreas quemadas por año. Fuente: elaboración propia.	27
Figura 4.4. Áreas quemadas por ecorregiones y años. Fuente: elaboración propia.	29
Figura 4.5. Mapa del año 2007 con más áreas quemadas.	30
Figura 4.6. Diagrama de dispersión de la media de las anomalías de la SST y áreas quemadas. Fuente elaboración propia	34
Figura 4.7. Diagrama de dispersión de la media de la SST media y Focos de calor.	34
Figura 4.8. Diagrama de dispersión de la media de las anomalías SST y Áreas quemadas (ha). Fuente: elaboración propia.	36
Figura 4.9. Diagrama de dispersión de la media de las anomalías SST y Focos de calor.	37
Figura 4.10. Diagrama de dispersión de la media de las anomalías SST y Áreas quemadas (ha).	39
Figura 4.11. Diagrama de dispersión de la media de las anomalías SST y Focos de calor.	39

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Productos, programas y equipos utilizados durante el trabajo.....	7
Tabla 3.2. Índice Oceánico El Niño (ONI) por temporada, 2001-2019. Fuente: CPC, NOAA (2020).	18
Tabla 4.1. Focos de calor por año y ecorregiones.....	22
Tabla 4.2. Focos de Calor periodo Niño.	24
Tabla 4.3. Focos de Calor periodo Niña.....	25
Tabla 4.4. Focos de Calor periodo Neutro.	25
Tabla 4.5 Áreas quemadas (ha) por año y ecorregiones.	28
Tabla 4.6. Áreas quemadas periodo Niño.	31
Tabla 4.7. Áreas Quemadas periodo Niña.....	31
Tabla 4.8. Áreas Quemadas periodo neutro.	31
Tabla 4.9. Datos Fase Niño.	32
Tabla 4.10. Matriz de correlación Pearson Fase Niño.	32
Tabla 4.11. p-valor y tamaño de la muestra fase Niño.....	33
Tabla 4.12. Datos Fase Niña.	35
Tabla 4.13. Matriz de correlación de Pearson Fase Niña.....	35
Tabla 4.14. p-valor y tamaño de la muestra fase Niña.....	35
Tabla 4.15. Datos Fase Neutral (Normal).	37
Tabla 4.16. Matriz de correlación de Pearson Fase Neutral (Normal).....	37
Tabla 4.17. p-valor y tamaño de la muestra fase Neutro.....	38

Listado de Siglas

BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CPC	Centro de Predicción del Clima, NOAA USA
ENOS	El Niño Oscilación Sur, (ENSO) en inglés.
ESPSG	European Petroleum Survey Group, conjunto de datos SIG.
FIRMS	Sistema de Administración de Recursos de Información de Incendios NASA
FTP	Protocolo servidor de Transferencia de Archivos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
ONI	Índice Oceánico El Niño (Oceanic Niño Index)
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OMM	Organización Meteorológica Mundial
SEN	Secretaría de Emergencia Nacional
SIG	Sistema de Información Geográfica, (GIS) en inglés.
SRC	Sistema de Referencia de Coordenadas
SST	Temperatura de la Superficie del Mar
MODIS	Espectroradiómetro de Imagen de Resolución Moderada, NASA.
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, USA
NOAA	Administración Nacional del Océano y la Atmósfera
UTM	Proyección Universal Transversal de Mercator
UMD	Universidad de Maryland
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos

WGS	World Geodetic System, Sistema Geodésico Mundial
WWF	Fondo Mundial para la Naturaleza, World Wildlife Fund

Resumen

Los incendios forestales pueden servir como mecanismos naturales para equilibrar biomas, como así también pueden generar efectos adversos destruyéndolos. El clima y su variabilidad también presentan desafíos, manifestando cíclicamente periodos de precipitaciones y sequías. En Paraguay hay limitada información sobre la ocurrencia de incendios forestales y su relación con el clima. El presente trabajo consistió en identificar la relación entre los incendios forestales y el fenómeno El Niño Oscilación Sur (ENOS) en el Paraguay, durante el periodo 2001 – 2019. Para ello se cuantificaron focos de calor y áreas quemadas en las 5 ecorregiones del país, mediante la obtención de productos de sensores satelitales de la NASA, MODIS C6 y MCD641, y a través del procesamiento con tecnologías de Sistema de Información Geográfica (SIG). Los resultados mostraron que el año 2002 tuvo la mayor cantidad de focos de calor (85.549) y el año 2007 la mayor cantidad de áreas quemadas, (3.676.127,96 ha). Finalmente, el análisis de correlación entre la ocurrencia de incendios con años Niña, Niño y Neutro, sugiere una alta correlación negativa con el periodo Niña, produciendo evidencia que durante los periodos de sequía existe una mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

Palabras clave: incendios forestales, variabilidad climática, ENOS, focos de calor, áreas quemadas, SIG e incendios forestales.

Abstract

Forest fires can serve as both natural mechanisms to balance biomes, and to adversely affect them by destroying them. Climate and its variability also present challenges by cyclically manifesting periods of precipitation and drought. In Paraguay, there is limited information on the occurrence of forest fires and their relationship with the climate. The present work consisted of determining the relationship between forest fires and the El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon in Paraguay, during the period 2001 - 2019, as well as quantifying hotspots and burned areas in the 5 ecoregions of the country. The method consisted in the acquisition of satellite sensor products from NASA, MODIS C6 and MCD641, and its processing with Geographical Information System (GIS) technologies. Results showed that the year 2002 had the highest number of hotspots (85,549), and the year 2007 the most burned areas (3,676,127, 96 ha). Correlation of the occurrence of fires with Niña, Niño and Neutral years suggested a high negative correlation with La Niña period, providing evidence that during drought episodes there is a greater probability of occurrence of forest fires.

Key words: forest fires, climate variability, ENSO, hotspots, burned area, GIS and forest fires.

1. INTRODUCCIÓN

Desde épocas muy remotas, cuando nuestros ancestros descubrieron el fuego, éste se ha convertido en un aliado importante del ser humano y desde entonces, fue ampliamente usado para diversos fines, desde la caza, la gestión de pastura, defensa del territorio, la industria, hasta para rituales culturales. Se puede considerar que el dominio que tuvo el hombre sobre este fenómeno influyó de manera importante en su subsistencia a lo largo del tiempo. Un análisis sistémico de los factores que afectan la ocurrencia del fuego es importante para gestionar y predecir los impactos que afectan los ecosistemas, la atmósfera y el clima (Bodí, 2012; Chuvieco, 2013).

La magnitud y frecuencia de los incendios forestales, en su momento ocurrían en forma estacional, actualmente están aumentando debido al cambio climático con efectos adversos y sus consecuencias sobre pérdida de vidas, propiedades, recursos de la biodiversidad y la subsistencia. Sumado al hecho de que los incendios forestales aportan gases de efecto invernadero al medio ambiente, destruyendo los biomas y su capacidad para absorber dióxido de carbono (IPCC, 2019).

Los incendios forestales han afectado muchas partes del mundo en el 2019, por lo general a causa de las condiciones anormalmente secas o cálidas. En el Amazonas hubo más incendios que en los últimos años, principalmente en agosto, el número de incendios en la Amazonia Brasileña fue ligeramente superior al promedio de los diez últimos años y la cifra total de incendios de América del Sur fue la más alta desde el 2010 (OMM, 2020).

El fuego es uno de los principales responsables de la transformación de los ecosistemas terrestres en Latinoamérica, generando alteraciones de diferentes magnitudes, algunas de ellas son positivas (cuando actúa como factor de equilibrio) en el caso de biomas como el Cerrado, sin embargo, la mayoría de las perturbaciones son negativas, provocando deterioro y/o degradación de ecosistemas (Di Bella, 2008).

Las causas físicas y biológicas que influyen en la ocurrencia de los incendios como las condiciones climáticas, humedad y disponibilidad de material combustible, topografía y localización geográfica, rigen el régimen natural del fuego. Las estadísticas de incendios en América Latina indican que los principales desencadenantes de los incendios son las actividades de origen antrópico, como ser la agricultura, el manejo de pastizales para la

ganadería y los ocasionados por negligencia (Peña, 2004). Según Gómez (2019) el fuego dejó sus huellas en los bosques de Latinoamérica durante el 2019, entre los más afectados estuvo la Amazonía brasileña, acaparando la atención mundial, sin embargo, también se quemaron bosques y selvas en Bolivia, México y Paraguay, mostrando cómo la deforestación ha vuelto más vulnerables estos ecosistemas.

Paraguay presenta el inconveniente de contar con escasos datos con relación a la ocurrencia de incendios forestales, a pesar de que la quema representa una de las herramientas más empleadas para manejar pasturas, limpiar campos y la caza furtiva, entre otros usos (Campos, 2011). Si bien existe la plataforma desinventar.org, que consiste en una base de datos con registro de inventario histórico de desastres, es limitada la información contenida en la misma. El registro de incendios forestales de Paraguay, está constituido por cerca de 50 antecedentes comprendidos entre los años 2007 y 2012, correspondientes todos a la región oriental y las fuentes son la Cruz Roja Paraguaya, la SEN para la cartografía y diferentes periódicos nacionales, lo que deja en duda el rigor científico de los datos (BID, 2018).

Según estimaciones, la superficie total quemada en Paraguay del 2001 al 2010 fue de 21.561.500,6 ha, las ecorregiones más afectadas fueron el Chaco Húmedo con 61 % y Chaco Seco con 13 % del total quemado, las regiones con más focos de calor fueron Chaco Húmedo con 46 % y Chaco Seco con 33 % (Huespe, 2010). Así también (Benítez, 2018) reportó que del 2011 al 2018 hubo un total de 7.069.602 ha de superficies quemadas, siendo el año 2012 y la región Occidental, el año y ecorregión con más áreas quemadas, la mayor cantidad de focos de calor se registró en el Chaco Seco y en segundo lugar en el Chaco Húmedo.

Entre los meses de agosto y noviembre hay un alto riesgo de incendios en el Pantanal, debido a la extensión de periodos de sequía y la disponibilidad de biomasa seca, asociadas a la baja humedad relativa y el fuerte viento norte predominante. Se observó que la sequía es un fenómeno cíclico y se presenta en periodos de 10 años, esto tiene una correlación aparente con los eventos climáticos extremos asociados a la Oscilación Austral del Niño (Benítez et al., 2019).

Si bien se estima que el 90% de los incendios forestales en áreas tropicales son de origen antrópico, motivados por distintas razones, también se debe considerar que existen factores ambientales climatológicos que favorecen el inicio y su propagación, entre ellos los

relacionados a la variabilidad climática El Niño Oscilación Sur (ENOS) y en menor proporción las variantes de ésta y las oscilaciones del Atlántico (Román-Cuesta, 2003). El fenómeno ENOS consta de un ciclo de aproximadamente 2 a 7 años y es asociado con las anomalías de la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico ecuatorial, involucrando oscilaciones de las temperaturas de las superficies del mar entre fases de calentamiento (positiva) y enfriamiento (negativa), mientras que la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) oscila en periodos de 20 a 30 años (Kerr, 2000).

El centro de predicción del clima (CDC) de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano de los Estados Unidos de América (NOAA), cuenta con una base de datos histórica y modelos para observaciones que proporcionan herramientas e información para comprender la variabilidad y el cambio climático. Cuenta con datos de ENOS desde 1950 hasta la actualidad, monitorizando diferentes regiones, principalmente la región 3.4, que representa la principal medición para monitoreo, evaluación y predicción del ENOS. El Índice Oceánico de El Niño (ONI) se basa en la media de las desviaciones de la temperatura de la superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés) en la región de Niño 3.4 del océano Pacífico y es una medida principal para monitorear, evaluar y predecir ENOS. Definido como la SST con una media de tres meses en la región Niño 3.4., se basa en un conjunto de análisis de SST históricos homogéneos mejorados (SST reconstruido extendido - ERSST.v5), es un índice que ayuda a situar los eventos actuales en una perspectiva histórica (Huang et al., 2017).

Un trabajo llevado a cabo en Chile sobre la relación entre la ocurrencia de incendios forestales y la variabilidad climática reveló que después de periodos lluviosos (años Niño) hubo acumulación de combustible, facilitando condiciones de ignición y propagación de incendios, en algunos casos. La acumulación de combustible durante años Niño estaría acompañada al año siguiente de la ocurrencia de condiciones más secas de lo normal, asociadas al fenómeno de La Niña (González, 2011).

Se distinguen dos fases extremas ENOS, una asociada con las anomalías de temperatura caliente de la superficie del mar en el Pacífico tropical, conocido como años “Niño” y los eventos fríos, conocidos como “La Niña” o “El Viejo”, también los años que no corresponden a las fases extremas que se denominan “Neutrales”. Estos extremos climáticos

son causantes de importantes amenazas naturales, en Paraguay se manifiestan en forma de inundaciones, heladas y seguías, registrando daños en los ecosistemas (Mayeregger, 2015).

Existe un gran número de estudios ambientales que aplican la teledetección como instrumento de monitoreo y evaluación de varios procesos que involucran la superficie terrestre. La amplia capacidad de cobertura espacial y alta frecuencia de observación que proporcionan los sensores satelitales y con la rapidez que se obtienen los datos, los convierten en un recurso valioso para la detección y cartografía de incendios para gestión de áreas vulnerables (Chuvieco, 2009).

La cartografía de área quemada con imágenes satelitales ha sido abordada con diferentes sensores, existe precisión de imágenes de alta resolución, pero los sensores de mayor interés para estos modelos son de resolución más baja. Entre los productos globales desarrollados en los últimos años están los de la NASA, MCD45 y MCD64, productos con diferentes metodologías pero objetivos similares. La mayor limitación de estos es que solamente detectan fuegos activos al paso del satélite mientras no queden ocultos por nubes o humo (Ramo, 2017). Existen diversos repositorios cartográficos de Sistemas de Información Geográfica (GIS) que proporcionan datos de productos satelitales que permiten monitorizar de manera cuali-cuantitativa focos de calor y áreas quemadas en tiempo casi real, generando bases de datos confiables, con la posibilidad de realizar modelos predictivos, facilitando la gestión de riesgo de ocurrencia de incendios forestales, algunos de ellos son el INPE, NASA, USGS, Universidad de Maryland y Copernicus (Benítez, 2018).

Esta investigación fue llevada a cabo en el marco de la línea de investigación Cambio Climático y Aplicaciones Ambientales: Gestión de Riesgo de Desastres, emergencias, estudio de amenazas (inundaciones y sequías), impacto de los desastres, de la Maestría en Gestión de Riesgo de Desastres y Adaptación al Cambio Climático, ajustándose al Marco de Sendai para la Reducción de Riesgo de Desastres (2015-2030) y sus prioridades de acción, como también está alineado al Libro Blanco de CONACYT con sus ejes/líneas de acción 4.3, 4.6 y el sector priorizado 4.

El documento está organizado de la siguiente manera: Introducción. Se desarrollan de manera concisa los fundamentos teóricos que sustentan las teorías en relación con los temas abordados en el estudio.

Hipótesis y objetivos. Se establecen tres hipótesis, un objetivo general y tres objetivos específicos.

Métodos y datos. Brevemente se detalla la metodología utilizada, la obtención de los datos y su procesamiento.

Resultados y discusión. En este apartado se desarrollan los resultados del estudio y se realizan las discusiones pertinentes.

Conclusiones. Finalmente se expresan las reflexiones con relación a los resultados y su contraste con los objetivos e hipótesis de la investigación.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. Hipótesis

Se plantearon tres hipótesis:

2.1.1. Las anomalías en la temperatura generadas durante la fase caliente del ENOS (Niño) se relacionan positivamente con la mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

2.1.2 Las fases fría, cálida y neutra del ENOS, generan la misma probabilidad de ocurrencia de los incendios forestales.

2.1.3. Las anomalías en la temperatura generadas durante la fase fría del ENOS (Niña) aumentan la probabilidad de ocurrencia de los incendios forestales.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

Determinar la relación existente entre los incendios forestales y el fenómeno El Niño – Oscilación Sur (ENOS) en el Paraguay, durante el periodo 2001 -2019.

2.2.2. Objetivos específicos

2.2.2.1. Cuantificar el número de focos de calor en las ecorregiones del Paraguay durante el periodo 2001 – 2019.

2.2.2.2. Cuantificar las superficies quemadas en las ecorregiones del Paraguay durante el periodo 2001 - 2019.

2.2.2.3. Correlacionar el comportamiento del fenómeno ENOS con la ocurrencia de Incendios forestales.

3. MÉTODOS Y DATOS

En esta sección se describen los métodos y datos usados para llevar a cabo el trabajo de investigación, el área de estudio, los productos satelitales, la manera en que se obtuvieron los datos, su procesamiento y la determinación de la relación entre las variables. Los productos, equipos y otros insumos se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Productos, programas y equipos utilizados durante el trabajo.

Productos	<ul style="list-style-type: none">-Focos de calor MODIS C6 TERRA (https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/create.php)-Áreas quemadas MODIS MCD64A1 UMD (ftp://ba1.geog.umd.edu/)-Mapa de Ecorregión WWF Global 200 (https://c402277.ssl.cf1.rackcdn.com/publications/15/files/original/official_teow.zip?1349272619)
Software	<ul style="list-style-type: none">- QGis 2.18- QGis 3.12- RKWard Versión 0.6.5- Excel 365 Versión 2006- Word 365 Versión 2006
Equipos	<ul style="list-style-type: none">- Computadora portátil- Internet- Impresora- Dispositivo de almacenamiento USB

3.1. Alcance y descripción del área de estudio

El alcance geográfico del trabajo de investigación abarca el territorio nacional. El Paraguay está situado en el centro de América del Sur, entre las latitudes 19°18' y 27°31' S y los meridianos 54°15' y 62°38' W, el Trópico de Capricornio pasa por la parte media de su territorio, cuenta con una superficie de 406 752 km² y se halla dividido por el Río Paraguay en dos regiones naturales bien diferenciadas ambientalmente (FAO, 2015).

Se adoptó la clasificación Global 200 de World Wildlife Foundation para las ecorregiones, reconociéndose 5 (Figura 3.1): Pantanal, Bosque Atlántico del Alto Paraná, Cerrado, Chaco Seco y Chaco Húmedo (Olson, 2009; LIFE, 2016), las cuales se describen en detalle en las siguientes secciones.

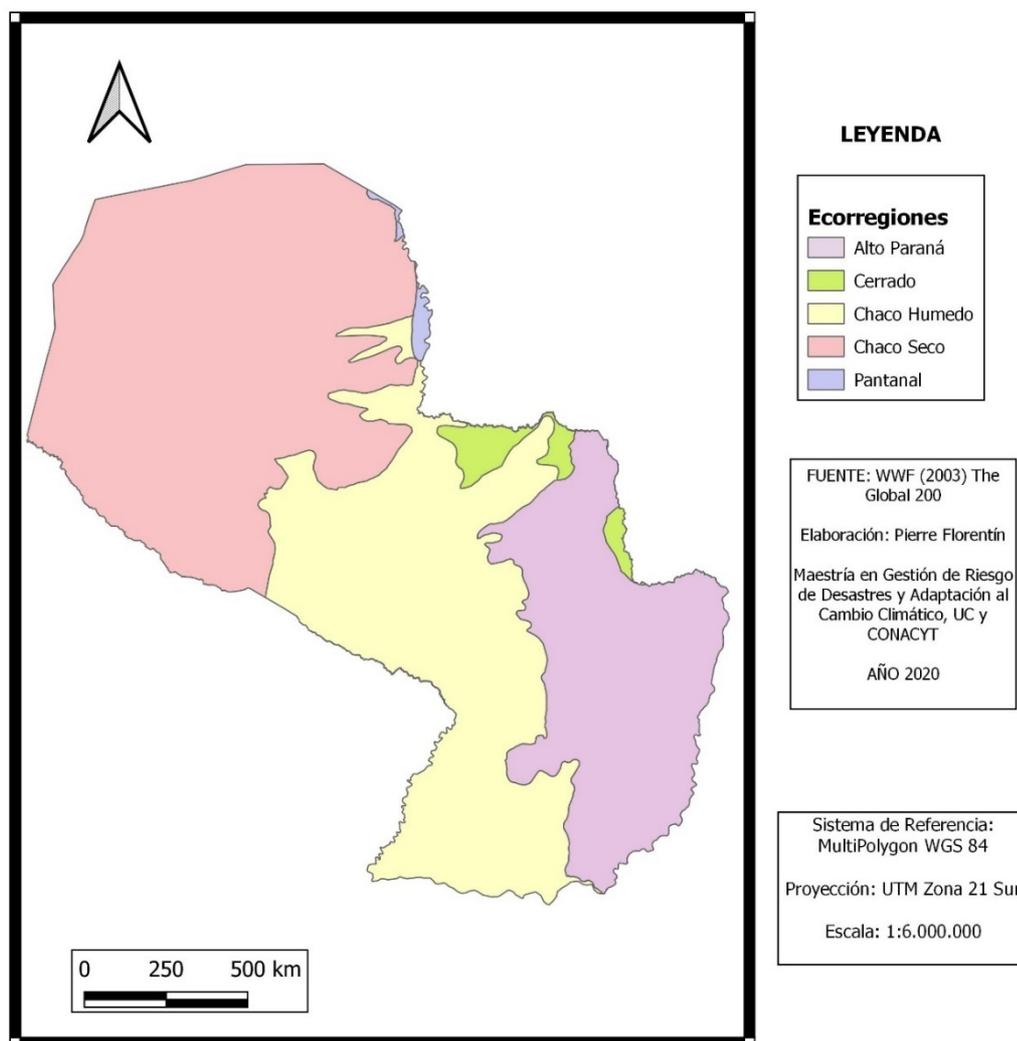


Figura 3.1. Ecorregiones del Paraguay

3.1.1. Ecorregiones del Paraguay

Según la clasificación Global 200 de World Wildlife Foundation (WWF), el Paraguay cuenta con 5 ecorregiones (Olson, 2009). Se detallan a continuación:

3.1.1.1. Bosque Atlántico del Alto Paraná

El Bosque Atlántico del Alto Paraná o BAAP, cuenta con ecosistemas particulares que no existen en otro lugar del mundo. Estos bosques contemplan pastizales y cuencas hidrográficas que se caracterizan por su ubicación, su clima y también por la fauna y flora. Entre su fauna se destacan los más grandes y espectaculares mamíferos del continente. Entre su flora podemos destacar una inmensa variedad de árboles bien conocidos. Además, a través de la preservación se garantiza la provisión de servicios ambientales.

3.1.1.2. Chaco Húmedo

Es una extensión del Pantanal hacia el sur y suroeste de la región occidental. Con una media de precipitación entre 1000mm/año y 1200mm/año, con marcadas precipitaciones estivales. Se destaca por sus inundaciones y anegabilidad, esta última temporaria o permanente presenta albardones, a veces cubiertos de arena lavada del tipo “fluvisoles” a lo largo de los numerosos ríos que riegan la región, incluido el Río Paraguay.

3.1.1.3. Chaco Seco

Es una zona de lagunas, riachos salados, paleocauces y serranías, con un gradiente de precipitaciones de 800-600mm/año con temperaturas extremas, con máximas absolutas cercanas a los 48°C y mínimas de -5°C en el invierno seco. La vegetación se denomina bosque semi caducifolio xerofítico con suelos variables. La fauna se destaca por la presencia de mamíferos medianos y grandes.

3.1.1.4. El Pantanal

El humedal más grande del mundo. Es el mayor y uno de los humedales mejor conservados del mundo. Se caracteriza por una sorprendente diversidad de flora y fauna. Además de la riqueza de especies, el Pantanal también ofrece servicios ambientales

subvalorados adicionales como el mantenimiento y purificación de las fuentes de agua necesarias para múltiples necesidades humanas, protección de los recursos del suelo, hábitat de plantas y animales de valor comercial, control biológico, la recarga del acuífero y la regulación climática local.

3.1.1.5. El Cerrado

Sabana biológica más rica del mundo. Cubre alrededor de 2,5 millones de km² principalmente en territorio brasileño (aproximadamente el 22% de su territorio) en extensas manchas mezcladas con la vegetación del Bosque Chiquitano Chaco, en el noreste de Bolivia y el norte central de Paraguay. Contiene una sorprendente biodiversidad, se pueden encontrar más de 10400 especies de plantas vasculares, 50 de las cuales son endémicas, además posee una enorme diversidad de fauna.

3.2. Datos y métodos de procesamiento

3.2.1. Focos de Calor

Según Barcia (2019) el foco de calor (hotspot) es una expresión generalmente usada para representar un potencial incendio. La presencia de un incendio garantiza que en el mapa de focos aparecerá un punto indicador, siempre que no haya nubes cubriendo la región. Existen diferentes sensores de satélites que los captan cada 24 horas, operando con la banda térmica.

Un foco de calor puede ser o no un fuego, sin embargo, son importantes al representar la primera alerta temprana de un posible incendio que pueda ser posteriormente observado (Fuentes & Vidaurre, 2014).

La colección 6 del sensor MODIS (C6) representa los mejores productos disponibles de anomalías térmicas y fuegos activos, con relación a la versión anterior (C5) tuvo cambios claves, relacionados a fuegos activos y focos de calor (hotspots) distribuidos por FIRMS (Fire Information for Resource Management System) de la NASA, es la versión más actualizada, y tiene datos disponibles desde el 11 de noviembre del año 2000, hasta la actualidad (Giglio, 2018).

3.2.1.1. Obtención de datos

Los datos de los focos de calor fueron obtenidos mediante la plataforma de la NASA EARTH DATA FIRMS (Fire Information for Resource Management System), desde la zona de archivos descargables, específicamente se utilizó el producto del sensor MODIS C6 Terra, en formato shapefile.

Para la correlación con el fenómeno ENOS se han descargado 228 archivos de focos de calor, correspondientes a los años 2001 al 2019, uno por cada mes, teniendo 12 por año, abarcando 19 años de estudio. Para la cuantificación anual de focos de calor, se han descargado además otros 19 archivos, correspondientes a los insumos por cada año del periodo de estudio, totalizando el set de datos de focos de calor con 247 archivos.

3.2.1.2. Procesamiento de datos

Estos productos son obtenidos originalmente en formato vectorial (shapefile) con proyección geográfica ESPSG: 4326, WGS84 (de proyección latitud/longitud), para su utilización en la latitud/longitud de Paraguay, los 247 archivos fueron reproyectados geográficamente a EPSG: 32721 – WGS 84 /UTM zona 21S, mediante el software de código abierto QGIS versión 3.12 (QGIS.org, 2020).

3.2.1.3. Cruzamiento de focos de calor con ecorregiones

Una vez reproyectados los archivos tipo shapefile de focos de calor de todos los meses y años contemplados en la investigación, se cruzaron sistemáticamente con los shape de las ecorregiones, mediante el geoproceto de intersección y se obtuvo los resultados por año y ecorregión.

3.2.1.4. Elaboración de mapas de focos de calor por ecorregión

Con los resultados del cruce de archivos de focos de calor y ecorregiones se logró diseñar mapas cuantificando los focos de calor por ecorregión y año.

Mediante la tabla de atributos de cada archivo se elaboraron tablas dinámicas y gráficos para la mejor descripción de los datos detectados por el sensor MODIS con relación a

los focos de calor representados en números, mediante el software Microsoft 365 Office Excel.

En la figura 3.2 se puede observar un resumen esquemático de los pasos descritos sobre los datos y su procesamiento.

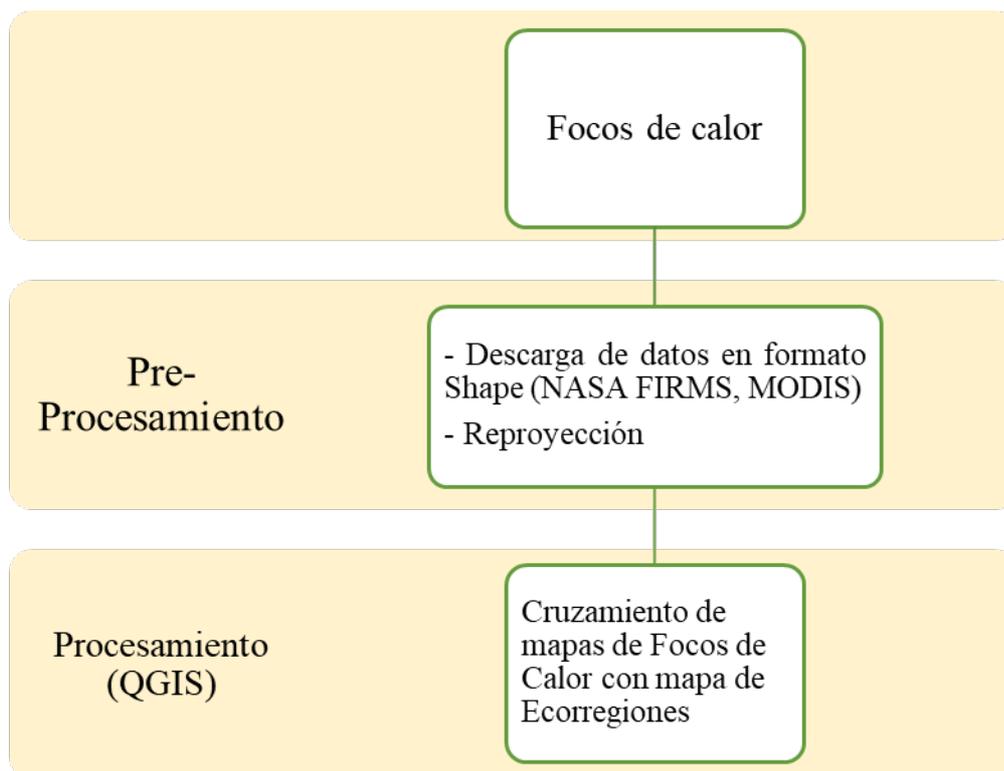


Figura 3.2. Esquema del procesamiento de Focos de Calor.

3.2.2. Áreas quemadas

Los productos de áreas quemadas fueron obtenidos del sensor MODIS, este sensor está a bordo de dos plataformas, Terra y Aqua, los datos obtenidos a través de este sensor cuentan con una alta sensibilidad radiométrica, buena calidad geométrica, alta resolución temporal, y son distribuidos de manera gratuita a través de diferentes portales de internet (García-Mora 2011).

3.2.2.1. Obtención de datos

Los datos de áreas quemadas están disponibles en diferentes portales de la web, por ejemplo: el del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS Earth Explorer), donde luego del registro, disponiendo de usuario y contraseña, se pueden descargar diferentes productos de distintos sensores satelitales.

Los productos MODIS MCD64A1 disponibles en el repositorio de USGS se hallan en formato HDF. Para cubrir el área completa de Paraguay, es necesario obtener 3 escenas en forma de imágenes (h12v10, h12v11 y h13v11) por mes, luego éstas se deben convertir a un formato GeoTIFF mediante el software (HEG) HDF-EOS To GeoTIFF Conversion Tool; posteriormente, se requiere reproyectar geográficamente a la zona 21S, cortar el mosaico generado, convertir de ráster a vectorial para finalmente reclasificar y cruzar con las ecorregiones.

Por otra parte, la Universidad de Maryland (UMD) y la NASA han establecido una estrecha relación de investigación, mediante la firma de un memorando de entendimiento, permitiendo actividades conjuntas de investigación en las áreas de ciencias del espacio, ciencias de la tierra, entre otras disciplinas. Esta alianza facilitó la disponibilidad de los datos empleados en este estudio.

Para la presente investigación se utilizó el repositorio de la Universidad de Maryland de Estados Unidos, debido a que disponen de una base de datos abierta, que contiene una colección de productos MODIS MCD64A1 (áreas quemadas), los que son reprocesados y periódicamente incorporan una mejor calibración, refinamiento de algoritmos, mejorando todos los productos (Giglio, 2018).

El algoritmo de este sensor usa un enfoque de mapeo de área quemada MCD64 empleando imágenes MODIS de 500 m junto con MODIS de 1 km observaciones activas de fuego. El algoritmo híbrido aplica umbrales dinámicos a las imágenes compuestas generadas de un índice de vegetación sensible al fuego (VI) derivado de los canales infrarrojos de onda corta MODIS 5 y 7, y una medida de la textura temporal (Giglio, 2018).

Este repositorio cuenta con dos servidores FTP mantenidos por la UMD, principalmente para asistir a usuarios científicos quienes necesiten descargar regularmente grandes volúmenes de datos. Las carpetas y archivos contenidos en el servidor FTP presentan tres diferentes formatos disponibles, en HDF-EOS, GeoTIFF y Shapefile.

Para obtener la información se debe acceder al servidor de la siguiente manera:

Server: ba1.geog.umd.edu

Login name: user

Password: burnt_data

El sistema de archivos en el servidor ftp está estructurado para organizar los datos de manera jerárquica por ventanas y por año. Los archivos están re proyectados en el tipo de proyección Plate-Carrée y cubre un conjunto de datos sub-continental dividido en 24 ventanas, en la ventana número 6 se halla Paraguay, conjuntamente con partes de Brasil, Argentina, Uruguay, Chile, Bolivia y Perú (Giglio, 2018).

La ventaja de este repositorio es que dispone de archivos en formato vectorial, lo que facilita el procesamiento de datos en los software de procesamiento GIS.

Para la correlación con el fenómeno ENOS se han descargado 228 archivos de áreas quemadas en formato shapefile, correspondientes a los años 2001 al 2019, uno por cada mes, teniendo 12 por año, abarcando 19 años de estudio. Para la cuantificación de áreas quemadas por año, se han descargado además 19 archivos, correspondientes a cada año completo.

3.2.2.2. Procesamiento de datos

Los shapefile de áreas quemadas descargados correspondían originalmente a la ventana número 6, abarcando todo el Paraguay, pero además partes de los países citados anteriormente, comprendidos entre las coordenadas -69.542968750000000 W, -34.859863281250000 E, -42.147460937500000 S, -10.232910156250000 N.

Usando la herramienta de geoprocso se realizó el corte ajustando los datos al mapa de Paraguay, descartando así las demás zonas no correspondientes al área objeto de estudio, esto se llevó a cabo con los 247 archivos.

Estos productos también como los de focos de calor, son descargados con proyección geográfica ESPSG: 4326, WGS84 (latitud/longitud), para poder usar en el sistema de referencia usado en Paraguay, fueron re proyectados geográficamente a EPSG: 32721 – WGS 84 /UTM zona 21S, mediante el QGIS versión 2.18.17. (QGIS.org, 2016)

3.2.2.3. Cruzamiento de áreas quemadas con ecorregiones

Una vez reproyectados los archivos de áreas quemadas de todos los meses y años contemplados en la investigación, se cruzaron sistemáticamente con los shapefile de las ecorregiones, mediante el software QGIS, y de la tabla de atributos se pudo recoger los resultados por año y ecorregión.

3.2.2.4. Elaboración de mapas de áreas quemadas por ecorregión

Con los resultados del cruce de archivos de áreas quemadas y ecorregiones se logró diseñar mapas cuantificando la estimación de las áreas quemadas por ecorregión y año.

Mediante la tabla de atributos de cada archivo se elaboraron tablas dinámicas y gráficos para la mejor descripción de los datos detectados por el sensor MODIS con relación a los focos de calor representados en números, mediante el software Microsoft 365 Office Excel.

En la figura 3.3 se puede observar un resumen esquemático de los pasos descritos sobre los datos y su procesamiento.

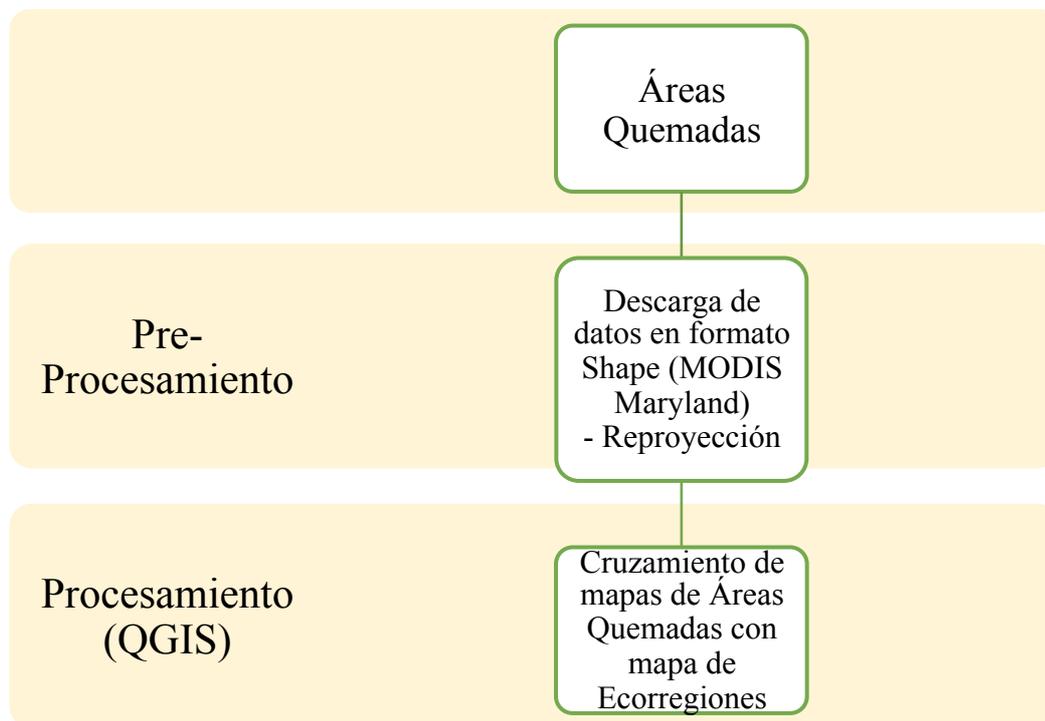


Figura 3.3. Esquema de procesamiento de productos de Áreas Quemadas.

3.3. Correlación con el fenómeno ENOS

Los datos de la variabilidad climática El Niño Oscilación Sur (ENOS) fueron obtenidos del NOAA, (National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S.), Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano de Estados Unidos, basados y centrados en 30 años de periodos actualizados cada 5 años.

La región para monitorización del ENOS del presente trabajo de investigación se delimita geográficamente en la región NIÑO 3.4: 120°-170°W y 5°N-5°S (Figura 3.4), en esta región se mide la variabilidad océano-atmosférica mediante el ONI (Índice Oceánico El Niño), que consiste en la medición de las temperaturas medias de la superficie del mar (SST), de un mínimo de 5 temporadas de 3 meses consecutivos superpuestos (Huang, 2017).

Los periodos cálidos (Niño) y fríos (Niña) se basan en un umbral de +/- 0.5°C según el ONI en la región El Niño 3.4, entonces, cuando la anomalía de la SST en esa región presenta 0.5°C o más, durante 5 temporadas de 3 meses consecutivos, es un periodo **Niño**, cuando por el mismo periodo de temporadas y meses se presenta -0.5°C o menos, se trata de

un periodo **Niña**, sin embargo, cuando por el mismo periodo de temporadas y meses la SST es entre -0.5 y 0.5°C , se trata de un periodo **Neutro** o también llamado **Normal** (Huang, 2017).

Basado en los criterios anteriores, a efectos de llevar a cabo una correlación entre los focos de calor, las áreas quemadas y el fenómeno ENOS, se han tomado los periodos más significativos de los tres estadios (Niño, Niña, Neutro), durante los años 2001 al 2019.

El Centro de Predicción del Clima (CPC) de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano de Estados Unidos (NOAA) establece los episodios de Frío y Calor por temporadas, clasificando en trimestres superpuestos, a efectos de un mejor análisis del fenómeno ENOS, empezando por diciembre, mes en que los pescadores de la zona de las costas de Perú observaban que empezaba cíclicamente el calentamiento, coincidiendo con la época del nacimiento del Niño Jesús, por eso la denominación del fenómeno como tal (L’Heureux, 2014).

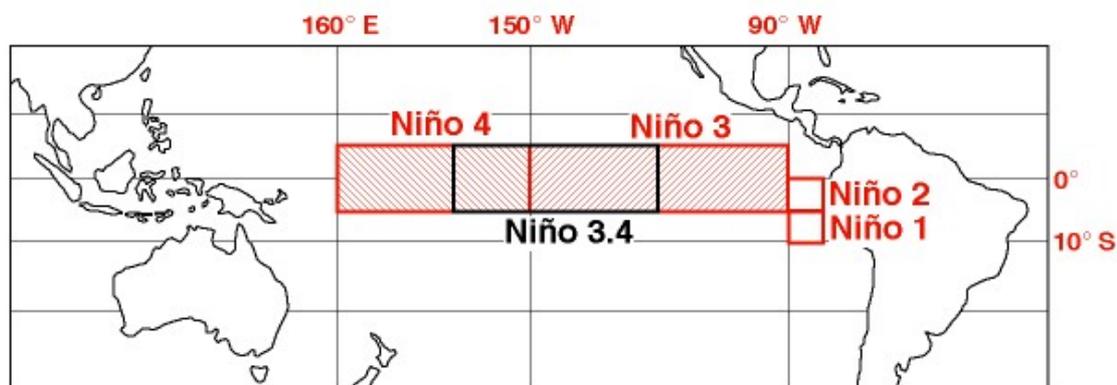


Figura 3.4. Región Niño 3.4, para medir el ONI. Fuente: CPC, NOAA (2020).

La clasificación descrita es así: DJF, JFM, FMA, MAM, AMJ, MJJ, JJA, JAS, ASO, SON, OND, NDJ, por las siglas de los meses en inglés, abarca diciembre del año anterior con enero y febrero del presente, luego enero-febrero-marzo, febrero-marzo-abril, marzo-abril-mayo, abril-mayo-junio, mayo-junio-julio y así sucesivamente hasta noviembre-diciembre y enero del siguiente año.

En la tabla 3.2 se pueden apreciar las diferentes fases ENOS en función al Índice Oceánico El Niño, desde el año 2000 hasta el 2019, según la información disponible en el repositorio del Centro de Predicción del Clima – NOAA.

Tabla 3.2. Índice Oceánico El Niño (ONI) por temporada, 2001-2019. Fuente: CPC, NOAA (2020).

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.8	-1.1	-1.4	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.1	-0.4	-0.7	-0.9	-1.0
2018	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.9	0.8
2019	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.3	0.1	0.1	0.3	0.5	0.5
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ

Siguiendo la lógica y los parámetros enunciados anteriormente, para discriminar los años Niño, Niña y Neutro, se tomó como mínimo por cada ciclo, 5 periodos consecutivos de trimestres que se han mantenido en los rangos de temperaturas de los umbrales que diferencian los 3 estadios.

Para la correlación con las variables focos de calor y áreas quemadas entre el año 2001 y 2019 se identificaron y establecieron los siguientes ciclos según los datos de la Tabla 3.2.

AÑOS NIÑO:

Junio de 2002 a febrero de 2003, julio de 2004 a febrero de 2005, setiembre de 2006 a enero de 2007, julio de 2009 a marzo de 2010, noviembre de 2014 a mayo de 2016 y octubre de 2018 a junio de 2019.

AÑOS NIÑA:

Noviembre de 2005 a marzo de 2006, julio de 2007 a marzo de 2009.
junio de 2010 a marzo de 2012, agosto de 2016 a diciembre de 2016 y octubre de 2017 a marzo de 2018.

AÑOS NEUTRO:

Marzo de 2001 a mayo de 2002, marzo de 2003 a junio de 2004,
abril de 2012 a octubre de 2014, enero de 2017 a setiembre 2017 y abril de 2018 a setiembre de 2018.

Identificados los años o ciclos Niño, Niña y Neutro, se estimaron las medias de las anomalías de la SST contempladas en cada fase, según datos observados en la Tabla 3.2, para establecer el coeficiente de correlación con los datos numéricos de las variables focos de calor y áreas quemadas.

Finalmente, para probar las hipótesis se aplicó la matriz de correlación para determinar el coeficiente de correlación de Pearson para variables cuantitativas, con el objeto de definir el grado o nivel de relación entre las tres variables. El coeficiente de correlación de Pearson es una prueba estadística para analizar la relación entre dos o más variables medidas en nivel de razón o por intervalos. Se simboliza r y se usa para probar hipótesis mediante el análisis paramétrico (Hernández, 2008). Para su interpretación, el coeficiente r de Pearson puede variar de -1.00 a $+1.00$, donde -1.00 es una correlación negativa perfecta, 0.00 = no existe

correlación alguna entre variables y $+ 1.00 =$ existe una correlación positiva perfecta (Hernández et al., 2008).

Los principales programas computacionales de análisis estadístico indican si el coeficiente es o no significativo, si s o P es menor del valor 0.05, se dice que el coeficiente es significativo en el nivel de 0.05 (95% de confianza en que la correlación sea verdadera y 5% de probabilidad de error). Si es menor a 0.01, el coeficiente es significativo al nivel de 0.01 (99% de confianza de que la correlación sea verdadera y 1% de probabilidad de error). (Hernández et al., 2008)

Los datos fueron procesados con el software de análisis estadístico RKWard Version 0.7.1b de licencia pública, basada en el lenguaje de programación R y Microsoft Office 365 Excel versión 2006.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Años con más focos de calor

Durante el periodo de tiempo 2001 al 2019 se registraron 1.005.247 focos de calor en todo el territorio nacional. De estos, 85.549 focos correspondieron al año 2002, representando el año con mayor cantidad de focos de calor registrados en el rango de tiempo estudiado. En orden decreciente de cantidad de focos, le sigue el año 2003 con 80.763 focos, año 2007 con 77.632 focos, año 2013 con 61.241 focos, año 2017 con 57.122 focos y el 2019 con 51.924 focos de calor. Ver tabla 4.1.

Haciendo un paralelismo con los datos obtenidos de áreas quemadas para este estudio, se puede resaltar que en el año 2007 se registró la mayor cantidad de áreas quemadas, sin embargo, la mayor cantidad de focos de calor se registró en el año 2002, pudiendo demostrar con estos resultados que no todos los focos de calor representan áreas quemadas.

El trabajo de investigación llevado a cabo por Benítez (2018), sobre estimación de ocurrencia de incendios y superficie quemada para Paraguay durante el periodo 2010 - 2017, ha registrado el año 2011 como el año con mayor cantidad de focos de calor, resultando en 5.538 focos. Según Huespe (2010), cuyo trabajo estimó la superficie quemada en Paraguay por tipo de ecorregión y por departamento para el periodo 2001 - 2010, fue el año 2002 el que registró mayor cantidad de focos, resultando con 5.588 focos de calor y el año de menos registros fue el 2010, con 2.793, pudiendo observarse discrepancias en los resultados con relación al presente trabajo.

También es importante resaltar que existen llamativas diferencias en las cantidades de focos de calor registrados en los trabajos de Benítez (2018) y Huespe (2010) con relación a los resultados de la presente investigación, la razón es que ambos trabajos usaron productos de focos de calor del repositorio del INPE Quemadas, mientras que este estudio se basó en datos del repositorio de la NASA EARTH DATA FIRMS.

La explicación técnica de la desigualdad de las cifras entre la NASA y el INPE, radica en que este último utiliza los datos de uno de los dos pasos diarios del satélite Aqua sobre su órbita, algo que ocurre alrededor de las 14 h según el huso horario de Brasilia, en tanto, la

NASA utiliza informaciones de los dos sobrevuelos del Aqua (el segundo ocurre en horas de la madrugada) y también usa datos registrados por los dos pasos del satélite Terra sobre su órbita, el primero a las 10:30 y el segundo a las 22:30 h (Pivetta & García, 2019).

4.2. Focos de calor por ecorregiones, periodo 2001 al 2019

En la tabla 4.1. se puede observar el cruce de datos de los focos de calor por ecorregión y año. Los resultados muestran que la ecorregión Chaco Húmedo es la que presentó mayor cantidad de focos de calor durante el periodo de tiempo analizado, con un total de 386.168 focos. Seguidamente y en orden descendente se tiene al Chaco Seco, con 301.563 focos, el Bosque Atlántico del Alto Paraná, con 246.161 focos, el Cerrado, con 62.977 y finalmente el Pantanal con 8378 focos de calor.

Tabla 4.1. Focos de calor por año y ecorregiones.

Años	Alto Paraná	Cerrado	Chaco Húmedo	Chaco Seco	Pantanal	Total Focos/Año
2001	4031	912	10898	6496	236	22573
2002	17329	31166	21190	15384	480	85549
2003	31447	1911	37846	9307	252	80763
2004	24988	1644	18336	8729	408	54105
2005	19983	2785	24735	12411	1124	61038
2006	13777	1609	27311	14163	384	57244
2007	26478	5430	31071	14031	622	77632
2008	11506	886	21803	17359	344	51898
2009	7867	882	15237	13855	620	38461
2010	11524	1692	16900	20647	359	51122
2011	9491	1731	22661	19051	255	53189
2012	8596	908	17357	16932	658	44451
2013	12217	1797	18530	28489	208	61241
2014	5680	738	11143	18931	123	36615
2015	4289	1030	9308	20129	307	35063
2016	7226	1540	20444	18924	778	48912
2017	10583	2611	25768	17827	333	57122
2018	6942	947	15890	12484	82	36345
2019	12207	2758	19740	16414	805	51924
Total	246161	62977	386168	301563	8378	1005247

Fuente: elaboración propia.

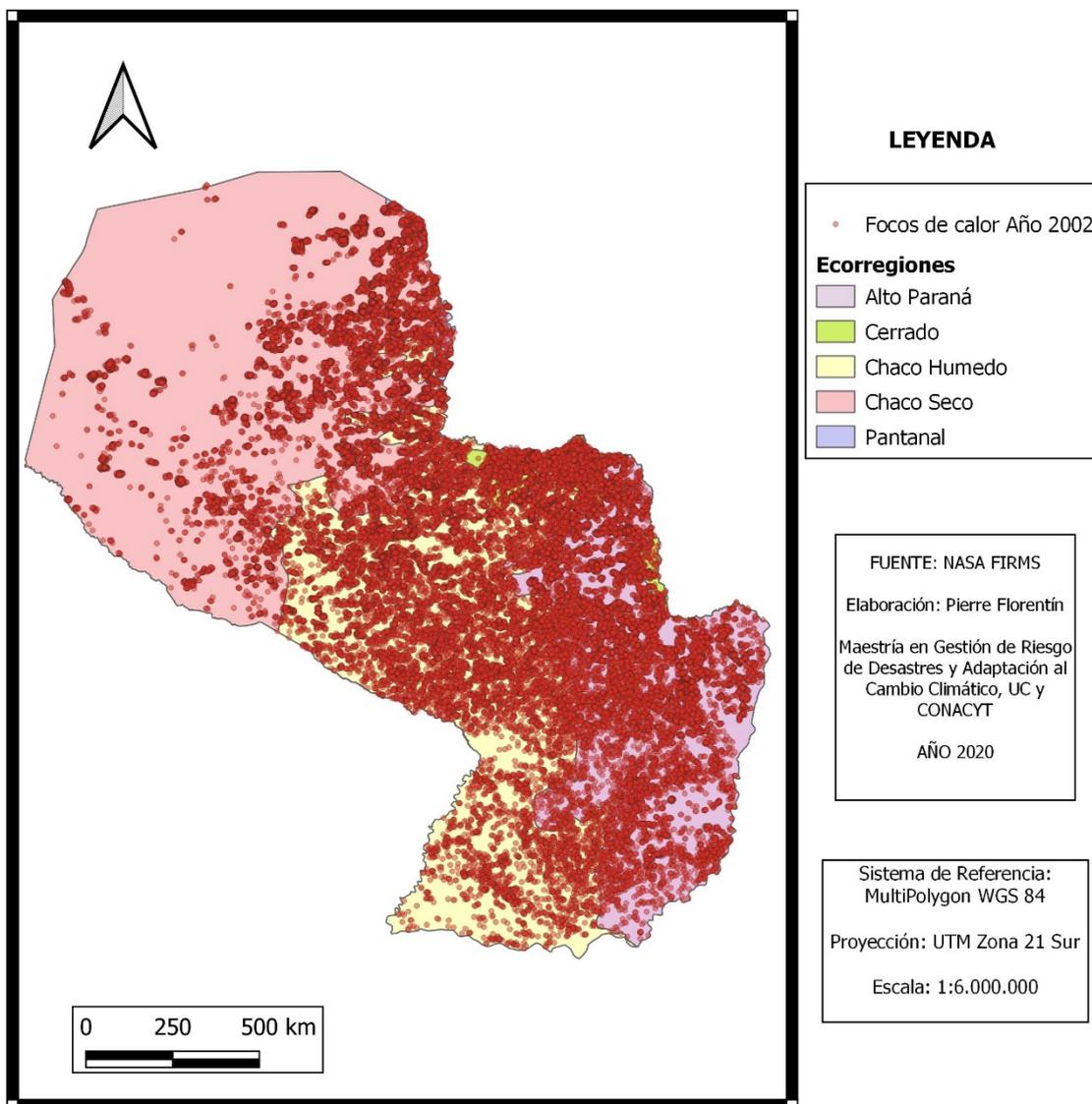


Figura 4.1. Mapa del año 2002 con más focos de calor.

En la figura 4.1 se visualiza el mapa de ecorregiones del Paraguay con los 85.549 focos de calor del año 2002, la mayor cantidad durante el periodo analizado y en la figura 4.2 se puede apreciar mediante la línea sinuosa verde la afectación de los focos de calor por ecorregión durante los 19 años de estudio.

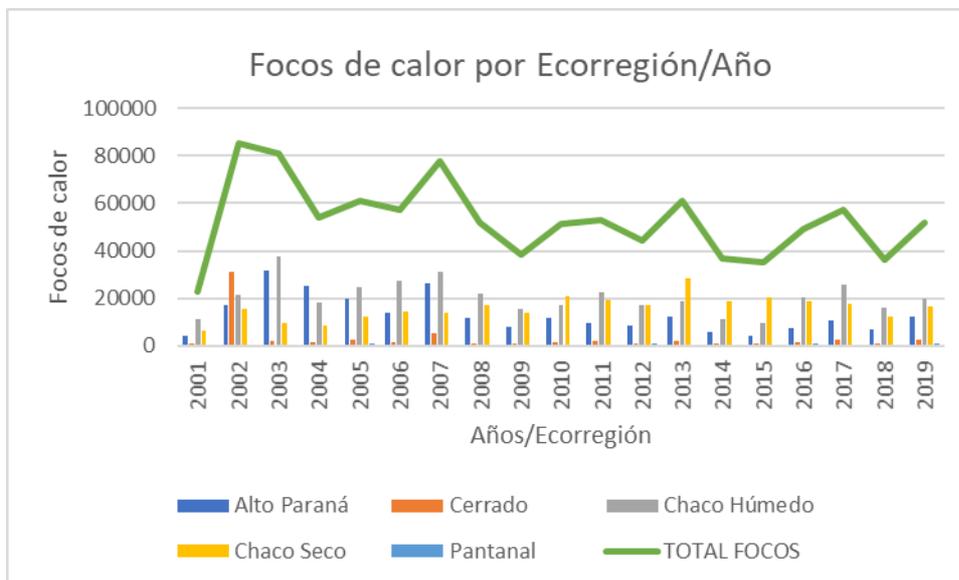


Figura 4.2. Focos de calor por ecorregión y año. Fuente: elaboración propia.

4.3. Focos de Calor años Niño, Niña y Neutro

Con el propósito de verificar el alcance del tercer objetivo específico del presente estudio, de acuerdo con los datos del Centro de Predicción del Clima del NOAA, usando la tabla 3.2 se han identificado las tres fases ENOS, registrando la cantidad de focos de calor ocurridos en cada una de ellas, pudiendo notarse que el periodo Neutro resultó con mayor cantidad de focos, 256.942, seguido por la Niña con 240.626 y en tercer lugar el Niño, con 177.882, ver tablas 4.2, 4.3 y 4.4.

Tabla 4.2. Focos de Calor periodo Niño.

NIÑO	Focos de calor
Junio 2002 a febrero 2003	46594
Julio 2004 a febrero 2005	36483
Setiembre 2006 a enero 2007	16669
Julio 2009 a marzo 2010	25364
Noviembre 2014 a mayo 2016	39048
Octubre 2018 a junio 2019	13724

TOTAL 177.882

Fuente: elaboración propia con datos del CPC NOAA.

Tabla 4.3. Focos de Calor periodo Niña.

NIÑA	Focos de calor
noviembre 2005 a marzo 2006	9201
julio 2007 a marzo 2009	103207
junio 2010 a marzo 2012	87562
agosto 2016 a diciembre 2016	28268
octubre 2017 a marzo 2018	12388
TOTAL	240.626

Fuente: elaboración propia con datos del CPC NOAA.

Tabla 4.4. Focos de Calor periodo Neutro.

NEUTRO	Focos de calor
marzo 2001 a mayo 2002	21196
marzo 2003 a junio 2004	75511
abril 2012 a octubre 2014	101342
enero 2017 a setiembre 217	35636
abril 2018 a setiembre 2018	23257
TOTAL	256.942

Fuente: elaboración propia con datos del CPC NOAA.

Combinando los datos de la tabla 3.2 del ONI y tabla 4.1 de focos de calor se logró obtener la información de la cantidad de focos en las fases Niño, Niña y Neutro, plasmados en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4, notándose que en la fase Niño se ha registrado 6 periodos y en las fases Niña y Neutro tan sólo 5 en cada una.

4.4. Años con más Áreas Quemadas

En los 19 años de estudio se ha registrado un total de 41.812.746 ha de áreas quemadas, siendo el año 2007 el que se destacó por tener la mayor cantidad de superficies quemadas, totalizando 3.676.127,96 ha, seguido por el 2003 con 3.398.306,03 ha. (Ver figuras 4.1 y 4.2)

Cabe resaltar que durante el último semestre del 2006 hubo un periodo Niño (precipitaciones), hasta enero del 2007, que pudo haber favorecido el crecimiento de la biomasa y, en consecuencia, al aumento de la carga de combustibles forestales disponibles, seguido de un periodo neutro entre febrero y junio, y un largo periodo Niña (sequía) desde julio del 2007 hasta marzo del 2009, como puede observarse en la tabla 4.3. (Avaria, 2012).

Roman-Cuesta (2003) indica la gran importancia de los indicadores climáticos y la biomasa acumulada que sostienen la ocurrencia de la ignición de un incendio, existe mayor dependencia de la capacidad del combustible a arder (acumulación de combustibles secos) que de la presencia de una fuente de ignición, según análisis de los factores humanos como causa de incendios.

Entre los años 2011 al 2016, Benítez (2018) encontró que el año 2012 fue el que registró mayor cantidad de áreas quemadas, con 1.950.992 ha, sin embargo, en el mismo periodo de tiempo, el presente estudio estimó que fue el año 2013 el que registró mayor cantidad de áreas quemadas, con 2.253.084,8 ha.

Según el estudio realizado por Huespe (2010) entre los años 2001 y 2010, el año 2007 resultó ser el que más áreas quemadas presentó, con 3.844.562,2 ha, coincidiendo en gran medida con lo hallado en el presente trabajo al considerarse el mismo rango temporal, con 3.676.127,96 ha en el año 2007. (Ver figuras 4.3 y 4.4)



Figura 4.3. Áreas quemadas por año. Fuente: elaboración propia.

4.5. Áreas quemadas (ha) por años y ecorregiones

En la tabla 4.5 y figura 4.3 se puede observar el cruce de datos de las áreas quemadas por ecorregión y año. Los resultados muestran que la ecorregión Chaco Húmedo es la que presentó mayor extensión de áreas quemadas durante el periodo de tiempo analizado, con un total de 22.707.280,1 ha, seguido por el Chaco Seco, con 8.701.235,79 ha, el Bosque Atlántico del Alto Paraná, con 7.106.290,95 ha, el Cerrado, con 2.479.616,05 ha y por el Pantanal con 818.323,11 ha.

Tabla 4.5 Áreas quemadas (ha) por año y ecorregiones.

Años	Alto Paraná	Cerrado	Chaco			Pantanal	Áreas
			Húmedo	Chaco Seco	Quem./Año		
2001	213605,57	159807,75	1422004,07	593360,13	64769,36	2453546,88	
2002	451962,85	334670,62	1648893,46	739533,62	62777	3237837,55	
2003	603642,9	149513,87	2328439,09	287784,96	28925,21	3398306,03	
2004	412234,5	79881,89	1055645,37	300049,83	45029,39	1892840,98	
2005	578059,67	187758,9	1578136,81	476751,09	89761,36	2910467,83	
2006	327356,57	112857,23	1511215,21	430409,34	45495,86	2427334,21	
2007	817110,68	350779,3	1958771,08	500121,59	49345,31	3676127,96	
2008	301742,67	65497,13	1234343,28	407050,8	39202,77	2047836,65	
2009	198417,63	46080,62	711764,04	425323,02	63999,78	1445585,09	
2010	276585,44	77850,55	714505,18	383584,82	35079,18	1487605,17	
2011	345368,43	123194,09	1054750,05	309291,37	14127,84	1846731,78	
2012	252947,34	43536,79	817759,12	360652,48	53864,37	1528760,1	
2013	387406,67	109584,71	958896,75	786261,25	10935,42	2253084,8	
2014	167700,48	25800,29	630229,71	408742,79	4604,38	1237077,65	
2015	152627,8	46949,31	412190,01	476080,88	36812,33	1124660,33	
2016	266062,34	75225	820767,82	427146,86	68005,44	1657207,46	
2017	510672,48	236895,5	1990629,49	506411,98	30059,8	3274669,25	
2018	287897,01	85148,49	888831,78	258277,31	5223,74	1525378,33	
2019	554889,92	168584,01	969507,77	624401,67	70304,57	2387687,94	
Total	7106290,95	2479616,05	22707280,1	8701235,79	818323,11	41812746	

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados concuerdan con Huespe (2010) y Benítez (2018), en cuanto a la ecorregión más afectada, siendo el Chaco Húmedo la que registró mayor superficie de áreas quemadas en todos los casos y también guardan relación con respecto a la ecorregión con menor afectación, siendo la del Pantanal.

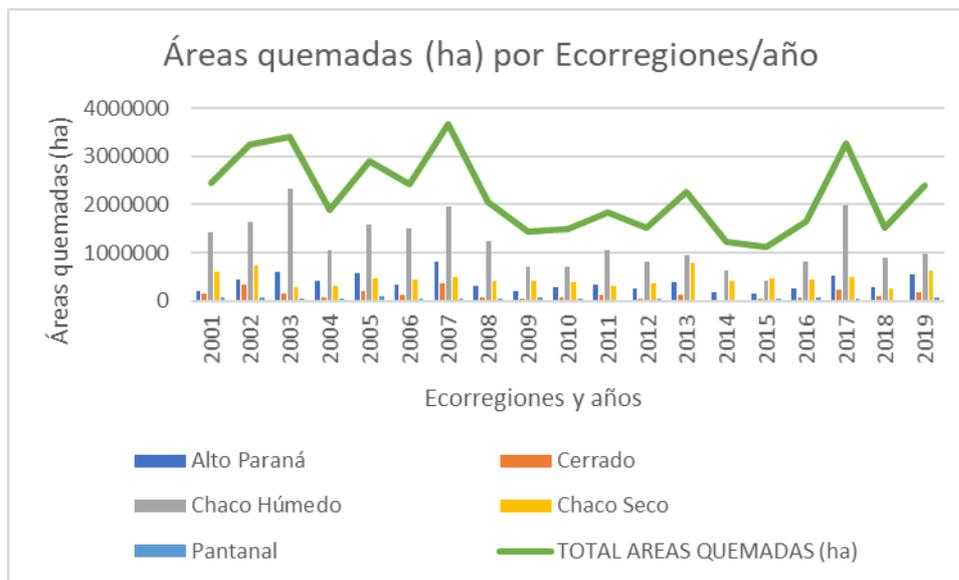


Figura 4.4. Áreas quemadas por ecorregiones y años. Fuente: elaboración propia.

La probable razón por la que la ecorregión Chaco Húmedo es la más afectada según los resultados del presente estudio y los citados anteriormente, podría deberse a las características del ecosistema, su ubicación geográfica en ambos márgenes del Río Paraguay, la densidad demográfica de la zona, el uso del suelo, factores climáticos, entre otros.

Y en cuanto a la ecorregión menos afectada, El Pantanal, es posible que la razón de esto tenga relación con que forma parte del humedal más grande del mundo, conteniendo en el ecosistema una importante cantidad de agua y humedad, dificultando la propagación del fuego.

Para contar con evidencias científicas que proporcionen mayor claridad sobre estas hipótesis, se requerirán estudios futuros en profundidad analizando dichas variables.

En la figura 4.4 se evidencian las cicatrices de las zonas quemadas durante el año 2007, lapso con mayor incidencia de incendios durante los 19 años del periodo de estudio, pudiendo notarse la mayor proporción de superficies afectadas en la ecorregión del Chaco Húmedo.

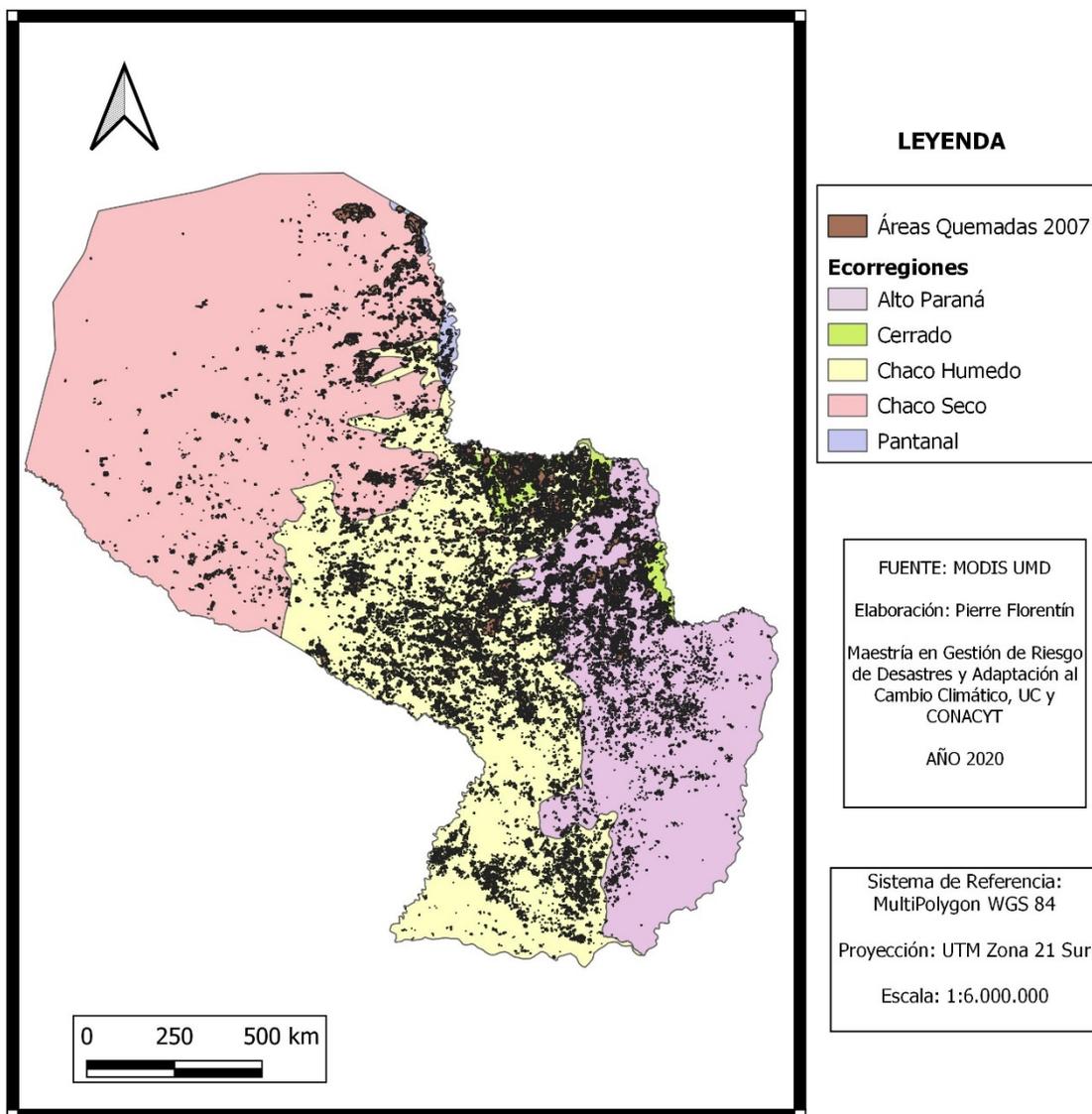


Figura 4.5. Mapa del año 2007 con más áreas quemadas.

4.6. Áreas quemadas (ha) años Niño, Niña y Neutro

De la misma manera en que se llevaron a cabo los pasos con los focos de calor y los datos del Centro de Predicción del Clima del NOAA, mediante la tabla 3.2 ONI, se han cuantificado las áreas quemadas en cada fase, las variables siguieron el mismo patrón de comportamiento y se observó que durante el periodo Neutro hubo más superficies quemadas, 15.430.379,95 ha, seguido por la Niña, con 11.049.755,26 ha y el Niño con 8.212.407,02 ha, ver tablas 4.6, 4.7 y 4.8.

Tabla 4.6. Áreas quemadas periodo Niño.

NIÑO	Áreas quem. (ha)
junio 2002 a febrero 2003	2.895.052,34
julio 2004 a febrero 2005	1.540.941,5
setiembre 2006 a enero 2007	640.811,27
julio 2009 a marzo 2010	1.045.198,6
noviembre 2014 a mayo 2016	1.498.168,72
octubre 2018 a junio 2019	592.234,59
TOTAL	8.212.407,02 ha

Fuente: elaboración propia con datos del CPC NOAA.

Tabla 4.7. Áreas Quemadas periodo Niña.

NIÑA	Áreas quem. (ha)
noviembre 2005 a marzo 2006	492.840,87
julio 2007 a marzo 2009	5.521.281,74
junio 2010 a marzo 2012	3.490.057,82
agosto 2016 a diciembre 2016	1.121.416,03
octubre 2017 a marzo 2018	424.158,8
TOTAL	11.049.755,26 ha

Fuente: elaboración propia con datos del CPC NOAA.

Tabla 4.8. Áreas Quemadas periodo neutro.

NEUTRO	Áreas quem. (ha)
marzo 2001 a mayo 2002	2.868.876,4
marzo 2003 a junio 2004	4.029.023,07
abril 2012 a octubre 2014	4.317.871,52
enero 2017 a setiembre 2017	2.911.155,5
abril 2018 a setiembre 2018	1.303.453,46
TOTAL	15.430.379,95 ha

Fuente: elaboración propia con datos del CPC NOAA.

4.7. Correlación ENOS con Focos de calor y Áreas quemadas

Para determinar la existencia de algún grado de relación entre las variables Focos de Calor, Áreas quemadas y El Niño Oscilación Sur, en función al tercer objetivo específico del presente estudio, por tratarse de variables de intervalo y razón, se llevó a cabo un análisis estadístico paramétrico mediante el coeficiente de correlación de Pearson r , aplicando las matrices de correlación que pueden verse en las tablas 4.10, 4.13 y 4.16.

En las tablas 4.9, 4.12 y 4.15 se aprecian los datos de las variables que se combinaron para establecer la correlación de la ocurrencia de los incendios con la fase niño, niña y neutro respectivamente.

Para las tres fases, se han sumado los focos de calor y las áreas quemadas de cada periodo completo, en tanto que para la correlación con ENOS, se ha obtenido la media de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (SST) o Índice Oceánico El Niño (ONI) de cada fase.

Tabla 4.9. Datos Fase Niño.

	Focos de calor	Áreas quem. (ha)	Med. Anomalías SST
Julio 2002 a febrero 2003	46594	2895052,34	0,94
Julio 2004 a febrero 2005	36483	1540941,5	0,63
Set. 2006 a enero 2007	16669	640811,27	0,74
Julio 2009 a marzo 2010	25364	1045198,6	1,03
Nov. 2014 a mayo 2016	39048	1498168,72	1,41
Oct. 2018 a junio 2019	13724	592234,59	0,73

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.10. Matriz de correlación Pearson Fase Niño.

Focos de calor	Áreas quemadas	M. Anomalías
----------------	----------------	--------------

		(ha)	SST
Focos de calor	1		
Áreas quemadas (ha)	0,92	1	
Media Anom. SST	0,42	0,24	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.11. p-valor y tamaño de la muestra fase Niño

	M.Anom.SST	F.Calor	A.Quem
M.Anom.SST	NA	0.40681	0.65081
F.Calor	6	NA	0.00897
A.Quem	6	6	NA

Fuente: elaboración propia.

Como puede verse en las tablas 4.10 y 4.11, el nivel de correlación entre la media de las anomalías SST y los focos de calor es de r 0,42, lo que indica una correlación positiva débil, con una probabilidad de error del 41 % y entre la media de las anomalías SST y áreas quemadas el valor es de r 0,24, mostrando una correlación positiva baja o muy débil, con una probabilidad de error del 65 %. Hay una relación positiva muy fuerte r 0,92 entre focos de calor y áreas quemadas, con una probabilidad de error del 0,01 %.

En las figuras 4.5 y 4.6 se ven los diagramas de dispersión de la media de las anomalías de la SST con áreas quemadas (ha) y focos de calor respectivamente, mostrando la relación positiva muy débil entre estas variables.

En función a la débil relación entre la media de las anomalías SST y las variables que miden la ocurrencia de incendios, queda descartada la primera hipótesis.

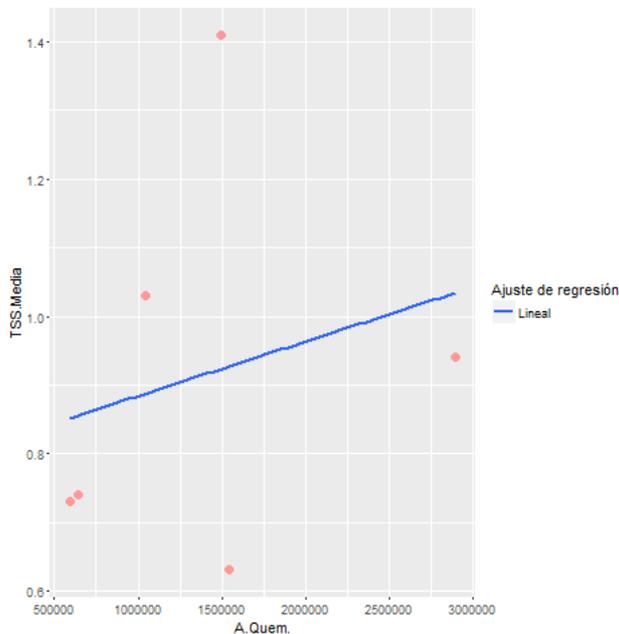


Figura 4.6. Diagrama de dispersión de la media de las anomalías de la SST y áreas quemadas.

Fuente elaboración propia

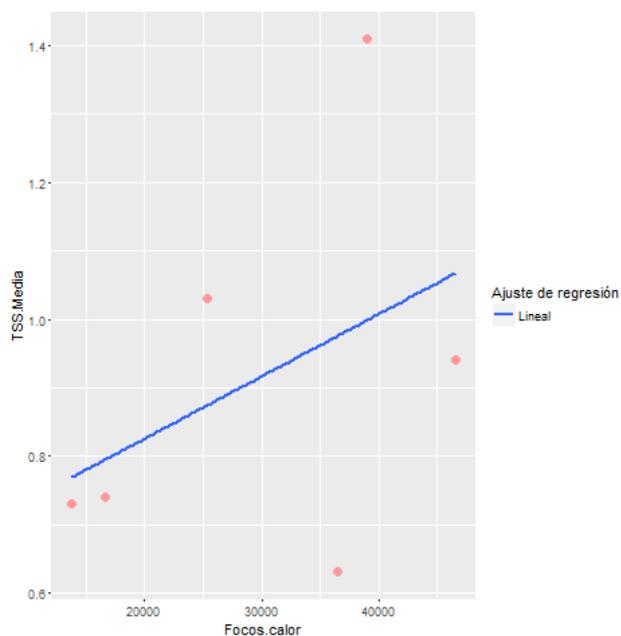


Figura 4.7. Diagrama de dispersión de la media de la SST media y Focos de calor.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.12. Datos Fase Niña.

	Focos de calor	Áreas quemadas (ha)	Med. Anomalías SST
Nov. 2005 a marzo 2006	9201	492840,87	-0,68
Julio 2007 a marzo 2009	103207	5521281,74	-0,85
Junio 2010 a marzo 2012	87562	3490057,82	-0,98
Agosto 2016 a dic. 2016	28268	1121416,03	-0,66
Oct. 2017 a marzo 2018	12388	424158,8	-0,81

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.13. Matriz de correlación de Pearson Fase Niña.

	Focos de calor	Áreas quemadas (ha)	Med. anomalías SST
Focos de calor	1		
Áreas quemadas (ha)	0,98	1	
Media anom. SST	-0,73	-0,63	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.14. p-valor y tamaño de la muestra fase Niña

n \ p	M.Anom.SST	F.Calor	A.Quem
M.Anom.SST	NA	0.15966	0.25608
F.Calor	5	NA	0.00378
A.Quem	5	5	NA

Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse en las tablas 4.13 y 4.14, el nivel de correlación entre la media de las anomalías SST y los focos de calor es de r -0,73, con una probabilidad de error del 16 %, lo que indica una correlación negativa alta y entre la media de las anomalías SST y áreas

quemadas el valor es de $r -0,63$, con una probabilidad de error del 26 %, mostrando una correlación negativa moderada. Hay una relación positiva muy fuerte (casi perfecta) $r 0,98$ entre focos de calor y áreas quemadas, con una probabilidad de error del 00 %.

En las figuras 4.7 y 4.8 se aprecian los diagramas de dispersión de la media de las anomalías de la SST con áreas quemadas (ha) y focos de calor respectivamente, mostrando relación negativa moderada con áreas quemadas y con focos de calor una relación negativa alta.

Esta correlación negativa alta indica que a menores temperaturas en las medias de las anomalías SST en la región Niño 3.4, aumenta las probabilidades de ocurrencia de incendios.

En función a la relación negativa moderada y alta entre las anomalías SST y las variables que miden la ocurrencia de incendios, considerando las probabilidades de error mencionadas anteriormente, se puede determinar que existen evidencias razonables para apoyar la tercera hipótesis que indica “las anomalías en la temperatura generadas durante la fase fría del ENOS (Niña) aumentan la probabilidad de ocurrencia de los incendios forestales”.

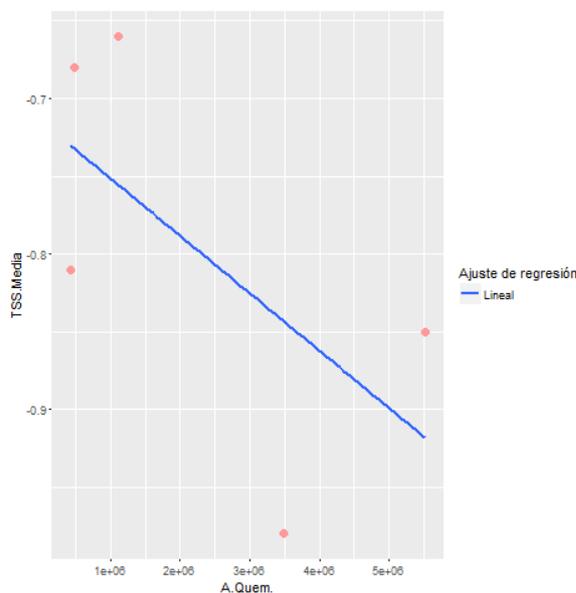


Figura 4.8. Diagrama de dispersión de la media de las anomalías SST y Áreas quemadas (ha). Fuente: elaboración propia.

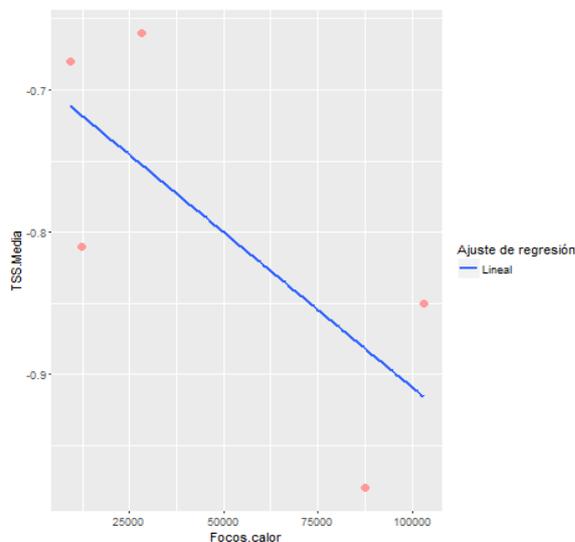


Figura 4.9. Diagrama de dispersión de la media de las anomalías SST y Focos de calor.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.15. Datos Fase Neutral (Normal).

	Focos de calor	Áreas quemadas (ha)	Media anom. SST
Marzo 2001 a mayo 2002	21196	2868876,4	-0,12
Marzo 2003 a junio 2004	75511	4029023,07	0,2
Abril 2012 a octubre 2014	101342	4317871,52	0,09
Enero 2017 a set. 2017	35636	2911155,5	0,05
Abril 2018 a set. 2018	23257	1303453,46	0,05

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.16. Matriz de correlación de Pearson Fase Neutral (Normal).

	Focos de calor	Áreas quemadas (ha)	Media anom. SST
Focos de calor	1		
Áreas quemadas	0,85	1	
Media anom. SST	0,66	0,42	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.17. p-valor y tamaño de la muestra fase Neutro

n \ p	M.Anom.SST	F.Calor	A.Quem
M.Anom.SST	NA	0.22646	0.48619
F.Calor	5	NA	0.06689
A.Quem	5	5	NA

Fuente: elaboración propia.

Según se puede apreciar en las tablas 4.16 y 4.17, el nivel de correlación entre la media de las anomalías SST y los focos de calor es de r 0,66, con una probabilidad de error del 23 % y entre la SST media y áreas quemadas el valor es de r 0,42, con una probabilidad de error del 49 %, lo que indica una correlación positiva moderada para ambos casos.

Hay una relación positiva considerable r 0,85 entre focos de calor y áreas quemadas, con una probabilidad de error del 7 %.

En las figuras 4.9 y 4.10 se aprecian los diagramas de dispersión de la media de las anomalías de la SST con áreas quemadas (ha) y focos de calor respectivamente, mostrando relación positiva moderada entre estas variables.

La relación entre la media de las anomalías SST y las variables que miden la ocurrencia de incendios muestra una correlación positiva moderada, lo que indica que hay un nivel de relación mayor con relación a la fase Niño, pero en grado inferior con relación a la fase Niña, lo que descarta la segunda hipótesis que dice; “Las fases fría, cálida y neutra del ENOS, generan la misma probabilidad de ocurrencia de los incendios forestales”.

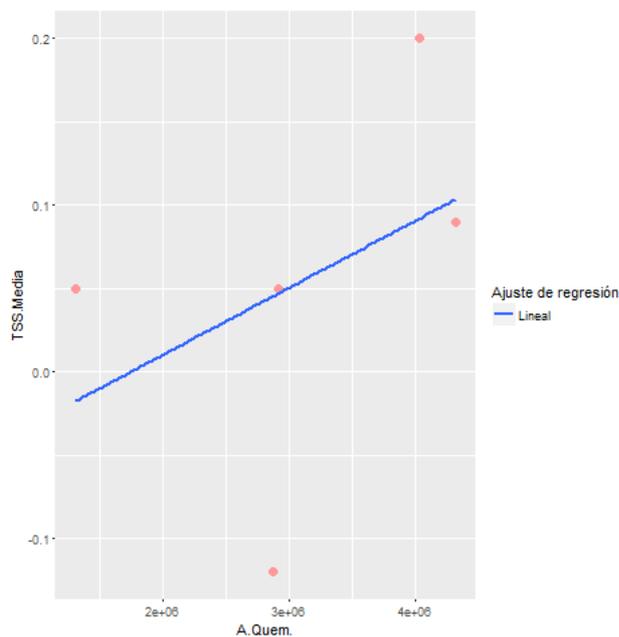


Figura 4.10. Diagrama de dispersión de la media de las anomalías SST y Áreas quemadas (ha). Fuente: elaboración propia.

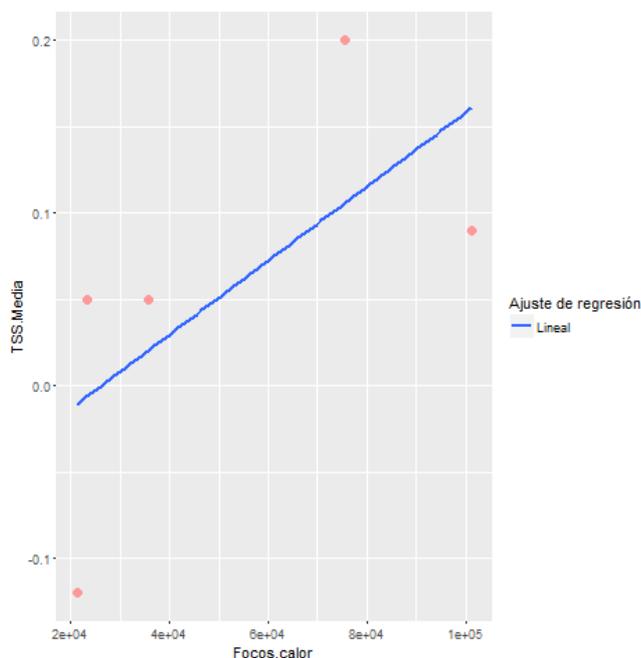


Figura 4.11. Diagrama de dispersión de la media de las anomalías SST y Focos de calor. Fuente: elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, se puede afirmar que fueron alcanzados los objetivos planteados al inicio y contrastadas las hipótesis formuladas en la investigación.

Con relación a los objetivos específicos, las conclusiones son las siguientes:

1) Cuantificación de focos de calor; entre el 2001 y el 2019 se ha registrado un total de 1.005.247 focos de calor en todo el territorio nacional, el año 2002 fue el que tuvo mayor cantidad, 85.549, en orden decreciente, le siguió el 2003 con 80.763, año 2007 con 77.632, año 2013 con 61.241, año 2017 con 57.122 y el 2019 con 51.924 focos de calor.

La ecorregión Chaco Húmedo presentó la mayor cantidad de focos de calor, con un total de 386.168, en orden descendente le sigue el Chaco Seco, con 301.563, el Bosque Atlántico del Alto Paraná, con 246.161, seguido por el Cerrado, con 62.977 y finalmente el Pantanal con 8378 focos de calor.

2) Cuantificación de áreas quemadas; en el mismo periodo de tiempo, se ha registrado un total de 41.812.746 ha de áreas quemadas en todo el país, siendo el año 2007 el que se destacó por tener la mayor cantidad de superficies quemadas, totalizando 3.676.127,96 ha, seguido por el 2003 con 3.398.306,03 ha, y en los últimos años, el 2017 con 3.274.669,25 ha y el 2019 con 2.387.687,94 ha.

La ecorregión Chaco Húmedo es la que presentó mayor cuantificación de áreas quemadas durante el periodo de tiempo analizado, con un total de 22.707.280,1 ha, en orden descendente le sigue el Chaco Seco, con 8.701.235,79 ha, el Bosque Atlántico del Alto Paraná, con 7.106.290,95 ha, el Cerrado con 2.479.616,05 ha y finalmente el Pantanal con 818.323,11 ha.

Se insiste en que la probable razón por la que la ecorregión Chaco Húmedo es la más afectada según los resultados del presente estudio, podría deberse a las características del ecosistema, su ubicación geográfica en ambos márgenes del Río Paraguay, la densidad demográfica de la zona, el uso del suelo, factores climáticos, entre otros. Para contar con evidencias científicas que proporcionen mayor claridad sobre esta hipótesis, se requerirán estudios futuros en profundidad analizando las diferentes variables.

3) Tanto los focos de calor y las áreas quemadas siguieron el mismo patrón de afectación proporcional en las 5 ecorregiones, lo que indica que existe una estrecha relación entre ambas variables, confirmándose con los resultados de la correlación entre el ENOS (Niña) y la ocurrencia de los incendios forestales, indicando que hay una relación positiva muy fuerte (casi perfecta) r 0,98 entre focos de calor y áreas quemadas, con una probabilidad de error del 00 %.

El nivel de correlación entre la media de las anomalías SST y los focos de calor es de r -0,73, lo que indica una correlación negativa alta, con una probabilidad de error del 16 % y entre la media de las anomalías SST y áreas quemadas el valor es de r -0,63, mostrando una correlación negativa moderada, con una probabilidad de error del 26 %.

Esta correlación negativa alta indica que a menores temperaturas en las anomalías de la SST en la región Niño 3.4, aumenta la probabilidad de ocurrencia de incendios, manifestándose como periodos de sequía en nuestra región.

Como resultado de la correlación entre las fases Niño, Niña, Neutro y la ocurrencia de incendios forestales, hay evidencias cuantitativas razonables que sostienen la tercera hipótesis que indica “las anomalías en las temperaturas generadas durante la fase fría del ENOS (Niña) aumentan la probabilidad de ocurrencia de los incendios forestales”, quedando descartadas las otras dos hipótesis, por contar con resultados estadísticos más débiles.

Con el conocimiento de las ecorregiones que cíclica y periódicamente son más afectadas por la ocurrencia de incendios forestales, relacionados a los datos de la variabilidad climática, aparte de evaluar daños y estimar pérdidas, se pueden generar modelos predictivos o probabilísticos que permitan realizar una adecuada Gestión de Riesgo de Desastres en nuestro país.

Finalmente, considerando que actualmente se viven momentos difíciles por la pandemia del COVID-19, comprendiendo la dinámica de las amenazas locales, se podrán prever planes que eviten que la suma de los posibles impactos por heladas, sequías, inundaciones, tornados, epidemias/pandemias y otras amenazas, generen consecuencias devastadoras.

Recomendaciones para trabajos futuros

Así como en la ciencia todo es dinámico y nada es absoluto, las evidencias que hoy señalan un tipo de resultado, en el futuro, con mejores tecnologías u otros métodos, podrían señalar productos diferentes, de igual manera la Gestión de Riesgo de Desastres, sigue el mismo patrón de comportamiento.

En ese sentido, es deseable que este tipo de trabajos de investigación puedan seguir desarrollándose, logrando evolucionar mediante acciones que permitan validar los productos utilizados, comparando con datos de sensores análogos, manteniendo una actualización constante del conjunto de datos, ampliando el terreno ya explorado, dando continuidad a esta línea de investigación y dotando al país con bases de datos más sólidas y útiles para diferentes objetivos y disciplinas de la ciencia.

En función a los productos de la presente investigación sería razonable pasar al siguiente nivel, que consiste en operativizar los resultados obtenidos con el fin de facilitar el conjunto de datos disponibles para el diseño de modelos predictivos o programas de Gestión de Riesgo de Desastres, que logren prevenir, mitigar o responder adecuadamente a los incendios forestales en nuestro país, salvaguardando vidas, bienes y el medio ambiente.

Referencias Bibliográficas

- Avaria, R. (2012). *Análisis de la influencia de los fenómenos climáticos Niño y Niña sobre ocurrencia de incendios forestales en la provincia de Llanquihue, Región de los Lagos*, [Tesis de grado]. Universidad Austral de Chile.
- Barcia, S. et al. (2019). Los focos de calor y los incendios forestales en la provincia Cienfuegos, Cuba. https://www.researchgate.net/publication/335664646_Los_focos_de_calor_y_los_incendios_forestales_en_la_provincia_Cienfuegos_Cuba
- Benítez, A. (2018). *Estimación de Ocurrencia de Incendio y Superficie Quemada para Paraguay en el periodo 2010-2017*. [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Asunción.
- Benítez, F. et al. (2019). Informe de Incendios en el área del Pantanal Paraguayo 2019, Guyra Paraguay.
- Banco Interamericano de Desarrollo (2018). Perfil de Riesgo de Desastres para Paraguay, BID, Nota Técnica N° IDB-TN-01468.
- Bodí, M. et al. (2012). Efectos de los Incendios Forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: Revisión bibliográfica, Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles N.º 58 - 2012, págs. 33-55, I.S.S.N.: 0212-9426.
- Campos, S. (2011), MOPC - Metodología de valoración de daños por incendios forestales en el Chaco, Región Occidental. http://www.icasa.com.py/web/COMPONENTES/PREVENCION%20DE%20INCENDIOS%20FORESTALES/VALORACION_DE_LAS_PERDIDAS_POR_INCENDIOS_FORESTALES.pdf
- Chuvienco, E., Opazo, S. (2009). Cartografía de áreas quemadas en Sudamérica: detección de píxeles semilla, Revista de Teledetección. ISSN: 1988-8740. 2009. 32: 50-71.
- Climate Change Fuels Fires (2017). UNDP Ecosystems and Biodiversity, <https://undp-biodiversity.exposure.co/climate-change-fuels-fires>

- Di Bella, C., Rebella, C. (2008). Incendios Forestales en América Latina, INTA, CEIBE, Iberoamérica, pp. 14-17.
- Fuentes, H, Vidaurre, P. (2014). Monitoreo de Quemadas y Focos de Calor en Pando 2013, HERENCIA.
- FIRMS, MODIS C6, Focos de calor, obtenido de <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/citation#ed-firms->
- Gómez, T. (2019). 2019: El año del fuego en Latinoamérica, obtenido de <https://es.mongabay.com/2019/12/2019-el-ano-del-fuego/>
- González, M. et al (2011). Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33° - 42° S). *Bosque (Valdivia)*, 32(3), 215-219. Recuperado de <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002011000300002>
- García-Mora, T., Mas, JF. (2011). Evaluación de Imágenes del sensor MODIS para la cartografía de cobertura del suelo en una región altamente diversa de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 63, núm. 1, 2011*, p. 83-94, Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v63n1/v63n1a8.pdf>
- Giglio, L, et al. (2018). MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision B., NASA, University of Maryland, National Oceanic and Atmospheric Administration. https://cdn.earthdata.nasa.gov/conduit/upload/10575/MODIS_C6_Fire_User_Guide_B.pdf
- Hernández, R. et al. (2008). Metodología de la Investigación, cuarta edición, Mc Graw Hill, México.
- Huang, B. et al. (2017). Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, Validations, and Intercomparisons. NOAA, UMD, *J. Climate*. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1.
- Huespe, H. (2010). *Estimación de superficie quemada en Paraguay por tipo de Ecorregión y por Departamento para el periodo 2001-2010*. [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Asunción.
- Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica. (2018). El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). <https://www.imn.ac.cr/enos>

- IPCC - Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (2019). Resumen para responsables de políticas. www.ipcc.ch
- IPCC, Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (2013). Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, (2001). IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Working Group I, http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/
- INPE. 2020. Monitoreo de fuego (en línea). http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/v_antiga/perguntas_es.html
- Kerr, R. (2000). A North Atlantic Climate Pacemaker for the Centuries. *Science*, 288 (5473), 1984–1985.
- LIFE (2016). Lasting Initiative for Earth, Ecorregiones del Paraguay, version I.
- Organización de las Naciones Unidas (2020), Resiliencia, desastres y gestión de tierras. <https://www.un.org/es/climatechange/disasters-resilience-land-management.shtml>
- Olson, David & Dinerstein, Eric. (2009). The Global 200: Priority ecoregions for global conservation. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. 89. 125-126. https://www.researchgate.net/publication/312978497_The_Global_200_Priority_ecoregions_for_global_conservation
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015). FAO AQUASTAT Perfil de País - Paraguay, Roma, Italia.
- Organización Meteorológica Mundial (2020), Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2019, OMM-N° 1248. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10215
- Opazo, S. y Chuvieco, E. (2013): “Análisis geográfico de áreas quemadas en Sudamérica”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 13- 2, p. 1-24. ISSN: 1578-5157.

- Peña, E., Valenzuela, L. (2004). Incremento de los Incendios Forestales en Bosques Naturales y Plantaciones Forestales en Chile, una visión global, 19–22 Abril, 2004, Córdoba, España.
- Pivetta M., Garcia R. (2019). Cómo monitorear el fuego, Pesquisa FAPESP, Edición 284, octubre 2019, actualizado el 19 de diciembre de 2019, <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/como-monitorear-el-fuego/>
- QGIS.org, 2016). QGIS versión 2.18.17. Sistema de Información Geográfica. Proyecto de Fundación Geoespacial de Código Abierto. [Http://qgis.org](http://qgis.org)»
- QGIS.org (2020). QGIS versión 3.12. Sistema de Información Geográfica. Proyecto de Fundación Geoespacial de Código Abierto. [Http://qgis.org](http://qgis.org)»
- Ramo, R., Chuvieco, E. (2017). Random Forest para la clasificación global de áreas quemadas, Nuevas plataformas y sensores de teledetección. XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. p. 157. Murcia 3-7 octubre 2017.
- Resolución 614/2013, por la cual se establecen las Ecorregiones para las regiones Oriental y Occidental del Paraguay. http://www.seam.gov.py/sites/default/files/res_seam_614-2013.pdf
- Román-Cuesta, R. et al. (2003). Environmental and human factors influencing fire trends in ENSO and non-ENSO years in tropical Mexico. *Ecological Applications* 13(4):1177-1192.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=6583590&pid=S2007-1132201000010000800030&lng=es
- Román-Cuesta, R. et al. (2014). Pacific and Atlantic oceanic anomalies and their interaction with rainfall and fire in Bolivian biomes for the period 1992–2012. *Climatic Change*. 127. 10.1007/s10584-014-1246-5.
https://www.researchgate.net/publication/266388020_Pacific_and_Atlantic_oceanic_anomalies_and_their_interaction_with_rainfall_and_fire_in_Bolivian_biomes_for_the_period_1992-2012
- Sánchez-Alberca, A. (2014). rk.Teaching (version 1.2) [software]. <http://aprendeconalf.es/rkteaching>.

- Secretaría de Emergencia Nacional (2018). “Atlas de Riesgos de la República del Paraguay”. Resol. SEN 565/18.
- Trouet, V., Taylor, A.H. Multi-century variability in the Pacific North American circulation pattern reconstructed from tree rings. *Clim Dyn* **35**, 953–963 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0605-9>.
- L’Heureux, M. (2014). What is the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) in a nutshell?, NOAA, Climate.gov, <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/what-el-ni%C3%B1o%E2%80%93southern-oscillation-enso-nutshell>
- Martín, M., & Rejalaga Noguera, L. (2010). Cartografía de incendios forestales en Paraguay mediante imágenes AQUA-MODIS.
- Mayeregger, E., Casco, M., Vera, A. (2015), “El Niño” y sus Impactos en el Sector Agrícola del Paraguay, Revista sobre Estudios e Investigaciones del Saber Académico, Año 9, N° 9, Diciembre, 2015.
- NASA (2020), Fire Information Resource Management System (FIRMS) EARTH DATA, USA. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/create.php>
- NOAA, CPC, National Oceanic and Atmospheric Administration, Climate Prediction Center, USA, https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- University of Maryland (2017), The MODIS Collection 6 MCD64A1 global burned area product. <http://modis-fire.umd.edu/>
- World Wildlife Fund for Nature. (2015). WWF Ecorregiones Paraguay http://www.wwf.org.py/_donde_trabajamos_/cerrado_pantanal
- World Wildlife Fund for Nature, (2011). Shapefile Global 200 Ecoregions and Biomes. https://c402277.ssl.cf1.rackcdn.com/publications/15/files/original/official_teow.zip?1349272

CONTRATAPA



Con el apoyo de:



La maestría “Gestión de Riesgo de Desastre y Adaptación al Cambio Climático” es cofinanciada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología - CONACYT con recursos del FEEI.