



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**  
**Dirección de Ciencias Ambientales y Cambio  
Climático**

**Trabajo de Tesis**

**Cartografía de áreas quemadas en el departamento de  
Chinandega mediante imágenes Sentinel-2 y la aplicación  
SATRIFO durante la temporada de incendios 2021-2023**

**Autor(es)**

**Br. José Miguel Roa Hernández**  
**Br. José Armando Sequeira Delgado**

**Asesor(es)**

**Dr. Fernando José Mendoza Jara**  
**M.sc. Andrés Agustín López**  
**Ing. Wilmer Alberto Rodríguez**

**Managua, Nicaragua**  
**Diciembre 2025**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**Dirección de Ciencias Ambientales y Cambio  
Climático**

**Trabajo de Tesis**

**Cartografía de áreas quemadas en el departamento de  
Chinandega mediante imágenes Sentinel-2 y la aplicación  
SATRIFO durante la temporada de incendios 2021-2023**

**Autor(es)**

**Br. José Miguel Roa Hernández**

**Br. José Armando Sequeira Delgado**

**Asesor(es)**

**Dr. Fernando José Mendoza Jara**

**M.sc. Andrés Agustín López**

**Ing. Wilmer Alberto Rodríguez**

Presentado a la consideración del honorable comité evaluador  
como requisito final para optar al grado de Ingeniero Recursos  
Naturales con Mención en Gestión Ambiental

**Managua, Nicaragua**

**Diciembre 2025**

Este trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable comité evaluador designado por la Dirección de Ciencias Ambientales y Cambio Climático como requisito final para optar al título profesional de:

Ingeniero Recursos Naturales con Mención en Gestión Ambiental

Miembros del Comité Evaluador

MSc. Claudio Joel Gonzales  
Espino  
Presidente

MSc. Harvin Joel Bonilla Escoto  
Secretario

Ing. Freydell Saraí Pinell Rivera  
Vocal

Lugar y fecha: Managua, Nicaragua, diciembre/2025

## DEDICATORIA

Doy gracias al **Creador** por no soltar mi mano durante las noches de desvelo y por rodearme de las personas correctas para lograr este propósito. A Él sea toda la gloria por este triunfo alcanzado.

A mis **padres**, por ser mi norte y mi apoyo incondicional. Sin su esfuerzo y su fe ciega en mí, este título no llevaría mi nombre, sino el de nuestra familia. Gracias por enseñarme que el conocimiento es la única herramienta que nadie te puede quitar.

A mi **hermana**, cuya fuerza y determinación han sido mi mayor inspiración durante estos años. Gracias por tus consejos y por recordarme siempre de lo que soy capaz. Te dedico este logro con todo mi corazón.

Br. José Miguel Roa Hernández

**A Dios:** Por haberme permitido llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional. Por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad, por brindarme salud, sabiduría y la perseverancia necesaria para culminar esta meta.

**A mis padres:** Quienes han sido el pilar fundamental en mi vida. Gracias por su amor incondicional, por sus consejos, sus sacrificios y por creer siempre en mí. Este logro es también suyo, pues gracias a su esfuerzo y apoyo constante he podido convertir mis sueños en realidad.

**A familiares:** Por estar siempre presentes, brindándome su apoyo moral y compañía a lo largo de este camino.

Br. José Armando Sequeira Delgado

## AGRADECIMIENTO

Primeramente, doy gracias a **Dios**, por haberme permitido llegar hasta este punto, dándome salud y seguridad para alcanzar mis sueños, por su infinita bondad, por ser el motor de mi vida y por iluminar mi camino con su luz divina, permitiéndome transformar cada obstáculo en una oportunidad de aprendizaje.

Mi profunda gratitud a la **Universidad Nacional Agraria** por haberme brindado todas las herramientas necesarias para mi formación profesional.

Agradezco profundamente a nuestros asesores Al **DR: Fernando Mendoza Jara**; Al **MSC: Andrés Agustín López** y Al **Ing. Wilmer Alberto Rodríguez** por su excepcional guía y por creer en este proyecto desde el primer instante brindando sus conocimientos, apoyo técnico y el desarrollo de la investigación hasta su etapa final.

A mis amigos y compañeros de estudio, gracias por las largas noches de dedicación y por compartir cada desafío de este proceso de formación.

Br. José Miguel Roa Hernández

En primer lugar, agradezco a **Dios**, por ser la luz que guía nuestro camino, por darnos la vida y la fuerza necesaria para enfrentar los retos y culminar con éxito este trabajo de investigación.

A la **Universidad Nacional Agraria (UNA)**, Alma Máter, por abrir sus puertas y brindar los conocimientos y herramientas necesarias para formarme como Ingeniero en Recursos Naturales con Mención en Gestión Ambiental.

Un agradecimiento especial y profundo a nuestros asesores de tesis, quienes con su experiencia y dedicación guiaron cada etapa de esta investigación:

- Al **Dr. Fernando José Mendoza Jara**, por su valiosa dirección y conocimientos compartidos.
- Al **M.Sc. Andrés Agustín López**, por su apoyo técnico y metodológico constante.
- Al **Ing. Wilmer Alberto Rodríguez**, por sus aportes fundamentales para el desarrollo de este estudio.

A nuestros **docentes**, por compartir sus conocimientos y experiencias en las aulas de clase, contribuyendo a nuestra formación ética y profesional. Su vocación ha sido inspiración para el crecimiento académico.

A nuestros compañeros y amigos, con quienes compartimos horas de estudio y momentos inolvidables durante la carrera.

Br. José Armando Sequeira Delgado

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>SECCIÓN</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>i</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>ii</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b>	<b>viii</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>x</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>II. OBJETIVOS</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
<b>III. MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>3</b>
3.1. Marco teórico	3
3.2 Marco conceptual Teledetección.	3
3.3 Antecedentes	4
<b>IV. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>5</b>
4.1 Descripción general del sitio	5
4.1.1 Localización	5
4.1.2. Caracterización biofísica	5
Clima	5
Flora	6
Geología	6
Edafología	6
4.2 Diseño metodológico y metodología empleada	6
4.2.1. Fase 1. Procesamiento de imágenes en la nube mediante SATRIFO	6
Selección de área y escenas satelitales	7
Generación de mosaicos	7
Clasificación supervisada	7
Descarga de polígonos	7
4.2.2. Fase 2. Procesamiento geoespacial en QGIS	7
Unión y depuración de polígonos	7
Recorte espacial	7
Generación de atributos	8
Integración y análisis	8

4.3. Variables de estudio	8
Área quemada (hectáreas)	9
Ubicación geográfica	9
Temporalidad de incendios	9
Índices espectrales (NDVI, NBR, dNBR)	9
4.4. Análisis de datos	10
<b>V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>11</b>
5.1. Cartografía de áreas quemadas mediante índices espectrales	11
5.2. Análisis multitemporal de la superficie afectada (2021–2023)	12
5.3. Distribución espacial por municipios	14
5.4. Síntesis analítica de hallazgos y contraste con la literatura	18
5.5. Implicaciones para la gestión	19
<b>VI. CONCLUSIONES</b>	<b>21</b>
<b>VII. RECOMENDACIONES</b>	<b>22</b>
<b>VIII. LITERATURA CITADA</b>	<b>23</b>
<b>IX. ANEXOS</b>	<b>25</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>CUADRO</b>		<b>PÁGINA</b>
<b>1</b>	Operacionalización de las variables del estudio	9
<b>2</b>	Áreas totales en hectáreas afectadas durante la temporada de incendios	13
<b>3</b>	Áreas quemadas en cada municipio del departamento de Chinandega 2021	14
<b>4</b>	Áreas quemadas en cada municipio del departamento de Chinandega 2022	15
<b>5</b>	Áreas quemadas en cada municipio del departamento de Chinandega 2023	17

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>		<b>PÁGINA</b>
<b>1</b>	Mapa de macro-localización del área de estudio. Fuente: Elaboración propia	5
<b>2</b>	Diagrama de flujo del proceso metodológico aplicado para la detección y análisis de áreas quemadas en el departamento de Chinandega durante la temporada de incendios 2021-2023	8
<b>3</b>	Gráfico de áreas quemadas durante los meses de cada año	13
<b>4</b>	Gráfico de los porcentajes de áreas quemadas por municipio durante el 2021	15
<b>5</b>	Gráfico de los porcentajes de áreas quemadas por municipio durante el 2022	16
<b>6</b>	Gráfico de los porcentajes de áreas quemadas por municipio durante el 2023	18

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO</b>		<b>PÁGINA</b>
<b>1</b>	Mapa de áreas quemadas enero 2021	25
<b>2</b>	Mapa de áreas quemadas febrero 2021	26
<b>3</b>	Mapa de áreas quemadas marzo 2021	27
<b>4</b>	Mapa de áreas quemadas abril 2021	28
<b>5</b>	Mapa de áreas quemadas mayo 2021	29
<b>6</b>	Mapa de áreas quemadas enero 2022	30
<b>7</b>	Mapa de áreas quemadas febrero 2022	31
<b>8</b>	Mapa de áreas quemadas marzo 2022	32
<b>9</b>	Mapa de áreas quemadas abril 2022	33
<b>10</b>	Mapa de áreas quemadas mayo 2022	34
<b>11</b>	Mapa de áreas quemadas enero 2023	35
<b>12</b>	Mapa de áreas quemadas febrero 2023	36
<b>13</b>	Mapa de áreas quemadas marzo 2023	37
<b>14</b>	Mapa de áreas quemadas abril 2023	38
<b>15</b>	Mapa de áreas quemadas mayo 2023	39
<b>16</b>	Mapa de validación de áreas quemadas con reporte de puntos de calor con el sensor MODIS 2023	40

## RESUMEN

El estudio tuvo como propósito generar cartografía multitemporal de las áreas quemadas en el departamento de Chinandega durante la temporada de incendios 2021–2023, utilizando imágenes Sentinel-2 procesadas en la aplicación SATRIFO y analizadas en QGIS. Se aplicaron índices espectrales (NDVI, NBR y dNBR) y clasificación supervisada mediante Random Forest para identificar y delimitar cicatrices de quema, complementando la validación con puntos de calor MODIS. Los resultados mostraron un aumento progresivo de la superficie afectada, destacándose 2023 con 347,013.40 ha, lo que representa un evento extremo para la región. Los mayores picos de incendios se concentraron entre febrero y mayo, periodo asociado a la estación seca del Pacífico nicaragüense. La distribución espacial evidenció recurrencia en los municipios de Chinandega, El Viejo y Somotillo, así como una expansión notable hacia Villanueva y Chichigalpa. La metodología empleada permitió generar cartografía precisa y reproducible, útil para el monitoreo ambiental y para apoyar acciones de gestión del riesgo, regulación del uso del fuego y planificación territorial. El estudio constituye una base técnica replicable para el seguimiento anual de incendios en zonas de bosque tropical seco.

**Palabras claves:** análisis espectral; bosque tropical seco; clasificación supervisada; gestión del fuego; índices multiespectrales; teledetección.

## ABSTRACT

This study aimed to generate multitemporal burned area cartography for the department of Chinandega during the 2021–2023 fire seasons using Sentinel-2 imagery processed in SATRIFO and analyzed in QGIS. Spectral indices (NDVI, NBR, and dNBR) and supervised classification with Random Forest were applied to identify and delineate burn scars, complemented by validation through MODIS active fire detections. Results revealed a marked increase in burned surface over the study period, with 2023 standing out as an extreme event totaling 347,013.40 hectares. The highest fire peaks occurred between February and May, corresponding to the local dry season in the Nicaraguan Pacific. Spatial patterns showed consistent recurrence in the municipalities of Chinandega, El Viejo, and Somotillo, along with a significant expansion toward Villanueva and Chichigalpa in 2023. The methodology enabled the production of accurate and reproducible cartography, providing valuable inputs for environmental monitoring, fire risk management, regulation of agricultural burning, and territorial planning. The study offers a replicable technical baseline for annual wildfire monitoring in tropical dry forest regions.

**Keywords:** Dry season; Fire management; Fire severity; Multispectral indices; Remote sensing; Supervised classification.

## I. INTRODUCCIÓN

La evaluación de áreas afectadas por incendios es fundamental para comprender los efectos del fuego sobre la cobertura vegetal y los ecosistemas. Los métodos de campo presentan limitaciones asociadas a la extensión territorial, el difícil acceso y el tiempo requerido para realizar inspecciones continuas, lo que dificulta obtener información actualizada para la gestión ambiental (Flores-Rodríguez et al., 2020).

La teledetección satelital se constituye en una herramienta esencial para el monitoreo de incendios al permitir observar grandes superficies con rapidez y precisión. En las últimas décadas, la frecuencia y magnitud de los incendios han aumentado debido a la expansión agrícola, el uso del fuego como práctica productiva y la variabilidad climática, generando transformaciones severas en los paisajes (Chuvieco & Salinero, 2009).

En América Latina se han desarrollado diversos sistemas de monitoreo forestal basados en observación satelital. No obstante, persisten limitaciones técnicas e institucionales que dificultan consolidar plataformas de vigilancia continua y de análisis multitemporal que apoyen la toma de decisiones en la gestión forestal (Chacón, 2019).

En Nicaragua, el uso del fuego para la preparación de tierras agrícolas y la expansión de áreas de cultivo incrementa la recurrencia anual de incendios, particularmente en las zonas de bosque seco del Pacífico. Estas condiciones ambientales favorecen la rápida propagación del fuego y refuerzan la necesidad de emplear herramientas eficientes de teledetección para mapear las áreas quemadas (Dixmude et al., 1999).

Las imágenes Sentinel-2 proporcionan información multiespectral de alta resolución que permite identificar cambios en la cobertura vegetal mediante índices como NDVI, NBR y dNBR, ampliamente utilizados en la detección de áreas quemadas. Diversos autores han demostrado la eficacia de este sensor para la delimitación de cicatrices de incendio y su procesamiento en plataformas como Google Earth Engine mediante algoritmos de clasificación supervisada, lo que facilita la generación de cartografía precisa y análisis multitemporales a gran escala (Roteta et al., 2021; Bastarrika et al., 2024).

El departamento de Chinandega presenta una alta recurrencia de incendios durante la época seca, afectando ecosistemas naturales, zonas agrícolas y pastizales, especialmente en las zonas de bosque tropical seco. Esta situación destaca la necesidad de contar con cartografía actualizada que permita identificar patrones espaciales y temporales de quema y apoyar los procesos de planificación territorial (Dixmude et al., 1999).

En este contexto, el propósito de esta investigación es generar cartografía multitemporal de las áreas quemadas en el departamento de Chinandega durante la temporada de incendios 2021–2023, mediante el uso de imágenes Sentinel-2 y la aplicación SATRIFO, con el fin de aportar información técnica que contribuya a la gestión del riesgo y a la toma de decisiones ambientales

## **II. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Generar cartografía multitemporal de las áreas quemadas en el departamento de Chinandega durante la temporada de incendios 2021–2023, mediante el uso de imágenes Sentinel-2 y la aplicación SATRIFO, con el fin de aportar información técnica para la gestión del riesgo y la toma de decisiones ambientales.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Aplicar índices espectrales (NDVI, NBR y dNBR) en imágenes Sentinel-2 para identificar y delimitar las áreas quemadas en el departamento de Chinandega durante la temporada de incendios 2021–2023.
- Determinar las áreas quemadas por mes mediante el procesamiento y clasificación de imágenes satelitales en la aplicación SATRIFO.
- Realizar un análisis multitemporal de la superficie afectada para evaluar las variaciones espaciales y temporales durante el periodo de estudio.
- Analizar la distribución espacial de las áreas quemadas por municipio para identificar zonas críticas y patrones de recurrencia en el departamento de Chinandega.

### **III. MARCO DE REFERENCIA**

#### **3.1. Marco teórico**

La teledetección constituye una herramienta fundamental para el estudio de incendios forestales, ya que permite identificar cambios en la cobertura vegetal mediante variaciones espectrales asociadas a los efectos del fuego. Esta tecnología facilita el monitoreo continuo de extensas áreas y supera las limitaciones del trabajo de campo, proporcionando información multitemporal esencial para el análisis ambiental (Flores-Rodríguez et al., 2020).

Los incendios han mostrado un incremento en frecuencia y severidad durante las últimas décadas debido a factores como la expansión agrícola, las prácticas de quema y la variabilidad climática. Estos elementos generan modificaciones profundas en los paisajes y afectan ecosistemas naturales y productivos, especialmente en regiones de bosque seco donde las condiciones ambientales favorecen la propagación del fuego (Chuvieco & Salinero, 2009).

En América Latina se han desarrollado sistemas de monitoreo forestal basados en observación satelital; sin embargo, persisten limitaciones institucionales, técnicas y operativas que dificultan consolidar plataformas sólidas de vigilancia y análisis multitemporal. Estos desafíos afectan la capacidad de respuesta ante incendios y limitan la disponibilidad de información actualizada para la planificación territorial (Chacón, 2019).

En Nicaragua, el uso del fuego para la preparación de suelos agrícolas incrementa la incidencia anual de incendios, particularmente en las zonas de bosque tropical seco del Pacífico. Estas condiciones demandan la implementación de herramientas tecnológicas que permitan mapear de manera precisa las áreas quemadas y analizar su distribución espacial y temporal (Dixmude et al., 1999).

#### **3.2 Marco conceptual Teledetección.**

Es el conjunto de técnicas que permiten obtener información de la superficie terrestre sin contacto directo, utilizando sensores montados en plataformas satelitales. Para incendios, la teledetección emplea contrastes espectrales entre vegetación sana, áreas quemadas y suelos expuestos. Índices espectrales.

Los índices espectrales resaltan características de la vegetación mediante combinaciones matemáticas de bandas satelitales. Los más utilizados en el análisis de incendios son: - NDVI: Evalúa el vigor de la vegetación a partir de la relación entre la reflectancia del rojo y del infrarrojo cercano. - NBR: Diseñado para identificar áreas quemadas mediante el contraste entre infrarrojo cercano y de onda corta. - dNBR: Determina el cambio entre condiciones pre-incendio y post-incendio, permitiendo estimar severidad del daño. Imágenes Sentinel-2. Sentinel-2 es una misión del programa Copernicus que ofrece imágenes multispectrales con resoluciones de 10 a 20 metros. Sus bandas NIR y SWIR permiten identificar con alta precisión superficies afectadas por incendios y cambios en la vegetación. SATRIFO.

SATRIFO es una herramienta implementada sobre Google Earth Engine que utiliza clasificación supervisada mediante el algoritmo Random Forest. Facilita el procesamiento de imágenes Sentinel-2 para identificar áreas quemadas y generar polígonos georreferenciados listos para análisis espacial. Análisis multitemporal. Es el estudio comparativo de un fenómeno a lo largo del tiempo mediante imágenes satelitales de diferentes fechas. En incendios, permite identificar variaciones mensuales o anuales, así como patrones de recurrencia y zonas críticas.

### **3.3 Antecedentes**

Reynosa y Correa (2016) destacan la efectividad de índices como NDVI, GEMI, NBR y MIRBI para la delimitación de áreas quemadas, demostrando que los índices espectrales constituyen herramientas clave en la detección de incendios. De Santis y Vaughan (2009) compararon diversas técnicas de identificación cartográfica y concluyeron que los índices normalizados y las combinaciones multiespectrales mejoran la precisión de la clasificación de superficies quemadas.

Barboza Castillo et al. (2020) aplicaron imágenes Sentinel-2 y Landsat-8 en Google Earth Engine para mapear incendios en la Amazonía peruana, demostrando la utilidad de la clasificación supervisada y el filtrado temporal para generar cartografía confiable. De manera similar, Sánchez et al. (2023) utilizaron dNBR para estudiar incendios en Chile, ajustando umbrales según la cobertura del suelo y demostrando su eficacia para delimitar áreas afectadas.

Suarez Albarracín y Medina (2023) emplearon GEOBIA y el índice NBR para identificar áreas quemadas y estimar severidad mediante clasificación supervisada. González (2020), por su parte, utilizó Sentinel-2 en Orocué, Casanare, para evidenciar la magnitud del daño ocasionado por incendios y diferenciar niveles de severidad. Estos antecedentes demuestran la efectividad de combinar imágenes multiespectrales, índices espectrales y algoritmos de clasificación para la detección de incendios, respaldando la elección metodológica de esta investigación y su aplicación al contexto del departamento de Chinandega.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Descripción general del sitio

#### 4.1.1 Localización

La investigación se realizó en el departamento de Chinandega, ubicado en el extremo noroccidental de Nicaragua, entre los 12°29' y 13°15' de latitud norte y los 86°37' y 87°38' de longitud oeste. Limita al norte con Honduras y Madriz, al este con León, al sur con el océano Pacífico y al oeste con el golfo de Fonseca. Su fisiografía está compuesta por planicies, lomeríos, serranías, conos volcánicos y zonas costeras, condiciones que influyen en la dinámica de incendios durante la época seca (Chinandega—EcuRed, s. f.).

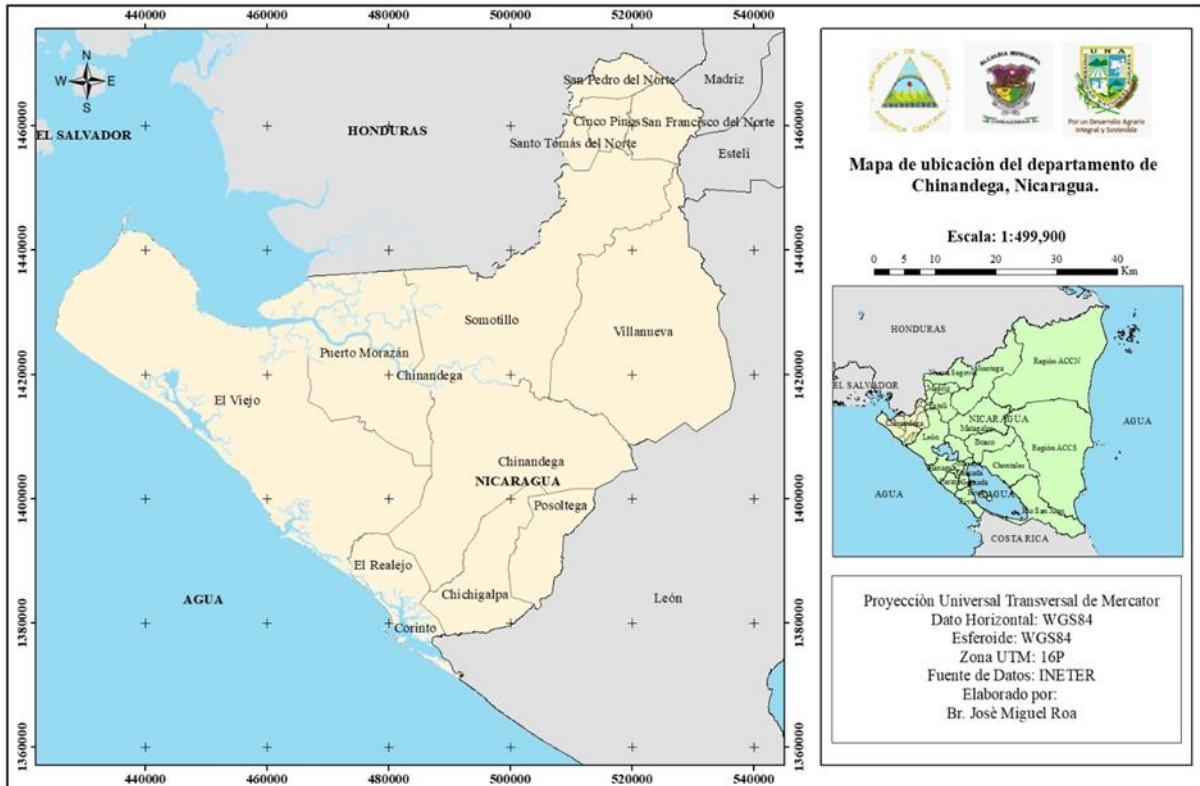


Figura 1: Mapa de Macro localización del área de estudio, fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2. Caracterización biofísica

##### Clima

El departamento presenta un clima cálido en las zonas bajas y temperaturas más frescas en áreas elevadas, especialmente en los conos volcánicos. Según la clasificación climática de Köppen, corresponde a un clima tropical de sabana. Las temperaturas promedio anuales varían entre

24 °C y 34 °C, mientras que la precipitación oscila entre 700 y 2,000 mm al año, con una estación seca bien definida entre noviembre y abril (Weather Spark, 2024).

### **Flora**

La región está dominada por bosque tropical seco, compuesto por especies como jiñocuabo, madroño, ceiba, genízaro y guanacaste. También posee bosques inundables asociados al ecosistema del Estero Real, influenciados tanto por aguas dulces como salobres, que experimentan inundaciones estacionales (Walsh, 1999).

### **Geología**

El territorio presenta formaciones geológicas del Pleistoceno–Holoceno con materiales como arenas, arcillas y guijarros, además de depósitos volcánicos. Se identifican también rocas del sistema Neógeno, incluyendo lavas basálticas, andesitas, dacitas y tobas volcánicas, que influyen en la estructura del suelo y en la disponibilidad de combustible vegetal seco (Montoya Pérez & Callejas Riveras, 2023).

### **Edafología**

Los suelos predominantes pertenecen a los órdenes Andisols, Vertisols y Mollisols, formados a partir de materiales volcánicos. Son suelos fértiles y ampliamente utilizados para actividades agrícolas, lo que ha favorecido la expansión agrícola y, en consecuencia, el uso del fuego como herramienta de manejo (INETER, 2021).

## **4.2 Diseño metodológico y metodología empleada**

La investigación se desarrolló bajo un diseño no experimental, descriptivo y de enfoque cuantitativo, dado que no se manipularon variables y el análisis se basó en la observación remota mediante imágenes satelitales. Este diseño permitió caracterizar la extensión y distribución espacial de las áreas quemadas durante la temporada de incendios 2021–2023 en el departamento de Chinandega. El proceso metodológico se estructuró en dos fases principales, representadas en el diagrama de flujo correspondiente (Figura 2), que integran procesamiento en la nube mediante SATRIFO y análisis espacial en QGIS.

### **4.2.1. Fase 1. Procesamiento de imágenes en la nube mediante SATRIFO**

En esta fase se aplicó la metodología propuesta por Barboza Castillo et al. (2020), adaptada a las condiciones del área de estudio. El procesamiento se realizó en Google Earth Engine utilizando la aplicación SATRIFO, que emplea el algoritmo Random Forest para la clasificación de áreas quemadas.

### **Selección de área y escenas satelitales**

Se definió inicialmente el área de interés correspondiente al departamento de Chinandega. Luego se seleccionaron imágenes Sentinel-2 aplicando un umbral máximo de nubosidad para garantizar calidad. Para cada mes se eligieron dos escenas: un pre-quema y un post-quema, permitiendo identificar variaciones espectrales asociadas a los eventos de incendio.

### **Generación de mosaicos**

SATRIFO generó mosaicos mensuales seleccionando automáticamente las escenas con menor nubosidad. Estos mosaicos concentraron la información espectral necesaria para delimitar áreas quemadas mediante diferencias entre imágenes pre y post incendio.

### **Clasificación supervisada**

Se digitalizaron polígonos de entrenamiento correspondientes a las clases:

- áreas quemadas,
- áreas no quemadas,
- no válidas (nubes y sombras).

Las muestras de áreas quemadas se identificaron mediante el contraste tonal entre las escenas pre y post incendio. Las áreas no quemadas incluyeron cuerpos de agua, superficies agrícolas activas y zonas con firmas espectrales similares para evitar confusiones. Con estas muestras se aplicó el algoritmo Random Forest, generándose un polígono vectorial de áreas quemadas para cada mes del periodo.

### **Descarga de polígonos**

Los polígonos obtenidos fueron descargados en formato .shp, constituyendo la base para las operaciones geoespaciales posteriores en QGIS.

## **4.2.2. Fase 2. Procesamiento geoespacial en QGIS**

Dado que el departamento de Chinandega está cubierto por tres tiles de Sentinel-2, los polígonos generados en SATRIFO debieron integrarse y depurarse antes del análisis final.

### **Unión y depuración de polígonos**

Los shapefiles mensuales provenientes de los tres tiles se integraron mediante la herramienta “Unir capas vectoriales”. Posteriormente, se eliminaron duplicidades utilizando la herramienta “Disolver”, garantizando que cada superficie quemada quedara representada por un único polígono.

### **Recorte espacial**

Las áreas quemadas fueron recortadas al límite oficial del departamento de Chinandega utilizando la herramienta “Intersección”, eliminándose las superficies clasificadas fuera del área de estudio.

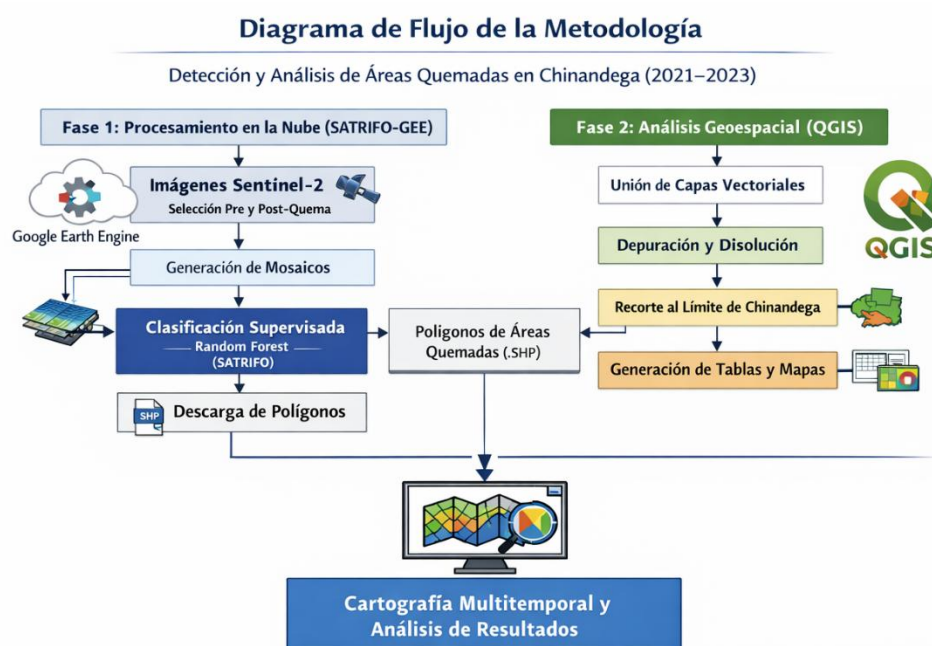
## Generación de atributos

A cada polígono final se añadieron campos de atributos para registrar:

- la fecha del evento,
- el nombre de la capa,
- la superficie afectada expresada en hectáreas.

## Integración y análisis

Los polígonos mensuales se integraron para construir las superficies anuales quemadas. Posteriormente se calcularon estadísticas para obtener los totales por mes, por año y por municipio. Esta información permitió elaborar la cartografía multitemporal final utilizada en el capítulo de resultados.



**Figura 2:** Diagrama de flujo del proceso metodológico aplicado para la detección y análisis de áreas quemadas en el departamento de Chinandega durante la temporada de incendios 2021–2023.

### 4.3. Variables de estudio

Las variables definidas para esta investigación se relacionan con la identificación, delimitación y análisis espacial y temporal de las áreas quemadas en el departamento de Chinandega durante la temporada de incendios 2021–2023. Estas variables permitieron cuantificar la superficie afectada, caracterizar su distribución geográfica y analizar su comportamiento multitemporal.

### Área quemada (hectáreas)

Corresponde a la superficie afectada por incendios identificada mediante la clasificación supervisada en SATRIFO. Esta variable se expresa en hectáreas y constituye el indicador principal para evaluar la magnitud del impacto mensual y anual.

### Ubicación geográfica

Representa la localización espacial de las áreas quemadas dentro del departamento de Chinandega. Se obtuvo a través de los polígonos generados por SATRIFO y procesados en QGIS, permitiendo su análisis municipal y departamental.

### Temporalidad de incendios

Variable que define el momento en que ocurrió cada evento de quema. Se determinó mediante la selección de imágenes pre-quema y post-quema en la plataforma SATRIFO para cada mes de la temporada de incendios (enero–mayo).

### Índices espectrales (NDVI, NBR, dNBR)

Estos índices representan el comportamiento espectral de la vegetación y permiten diferenciar áreas quemadas y no quemadas.

- **NDVI:** mide vigor de la vegetación.
- **NBR:** identifica áreas quemadas.
- **dNBR:** cuantifica el cambio entre pre y post incendio.

**Cuadro 1:** Operacionalización de las variables del estudio

Variable	Tipo	Indicador	Método de obtención	Unidad
Área quemada	Cuantitativa continua	Superficie afectada por incendio	Clasificación supervisada (SATRIFO – Random Forest) y cálculo en QGIS	Hectáreas
Ubicación geográfica	Cualitativa nominal	Coordenadas y distribución espacial	Polígonos vectoriales en SATRIFO y análisis en QGIS	Coordenadas / polígonos
Temporalidad de incendios	Cualitativa ordinal	Mes del evento (enero–mayo)	Selección de imágenes pre-y post-quema	Mes / Año
Índices espectrales (NDVI, NBR, dNBR)	Cuantitativa derivada	Valor espectral pre y post incendio	Cálculo en SATRIFO – Sentinel-2	Valor indexado

#### **4.4. Análisis de datos**

El análisis de datos se realizó integrando los resultados generados durante el procesamiento en la nube mediante SATRIFO y las operaciones geoespaciales efectuadas en QGIS. En primera instancia, se obtuvo la delimitación mensual de las áreas quemadas a partir de la clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest, lo que permitió generar polígonos vectoriales representativos de cada evento de quema. Posteriormente, dichos polígonos fueron depurados, unificados y recortados al límite del departamento de Chinandega para asegurar su correspondencia espacial con el área de estudio.

Una vez obtenidos los polígonos finales, se calcularon las superficies quemadas en hectáreas utilizando las herramientas de análisis de atributos de QGIS. Estos valores fueron organizados en tablas para cada mes y cada año, lo que facilitó la generación de series temporales que permitieron identificar tendencias de incremento o disminución de incendios durante el período 2021–2023. De igual forma, se registraron las fechas y atributos asociados a cada polígono para mantener la trazabilidad del proceso y garantizar la consistencia de los datos.

A nivel espacial, se realizó una intersección de los polígonos de áreas quemadas con los límites municipales del departamento de Chinandega. Esto permitió cuantificar la superficie afectada en cada municipio y elaborar mapas temáticos de distribución espacial. A partir de estos resultados, se generaron gráficos comparativos que muestran la magnitud del impacto en cada municipio para los tres años del estudio, destacando zonas de mayor recurrencia o mayor susceptibilidad a incendios.

Finalmente, la integración de la información mensual y municipal permitió realizar un análisis multitemporal, comparando la variación anual de las áreas quemadas y relacionándolas con los patrones estacionales propios de la época seca. Todos los datos fueron representados en cartografía multitemporal, gráficos y tablas que permitieron interpretar de manera clara la evolución de los incendios en el departamento de Chinandega durante el período evaluado.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El procesamiento de imágenes Sentinel-2 con **SATRIFO–GEE** y el análisis geoespacial en **QGIS** permitieron delimitar, cartografiar y cuantificar las áreas quemadas para cada mes de la temporada 2021–2023. La clasificación supervisada (*Random Forest*) y los índices NDVI/NBR/dNBR facilitaron diferenciar vegetación sana de superficies afectadas, y los mapas mensuales (Anexos 1–15) muestran la distribución espacial de los incendios en el departamento de Chinandega. La coincidencia con puntos de calor MODIS valida la delimitación de cicatrices de quema (Anexo 16).

### 5.1. Cartografía de áreas quemadas mediante índices espectrales

La clasificación supervisada realizada en **SATRIFO–GEE** sobre imágenes Sentinel-2 permitió generar, mes a mes, los polígonos de áreas quemadas correspondientes al período 2021–2023. Este flujo metodológico (uso de índices espectrales, clasificación supervisada y salida vectorial) es coherente con las herramientas operativas de mapeo de áreas quemadas desarrolladas para Google Earth Engine, como las Burned Area Mapping Tools (BAMTs), aplicadas con éxito en Australia y Canadá (Roteta et al., 2021). [[mdpi.com](https://www.mdpi.com)]

Los mapas mensuales generados (Anexos 1–15) muestran patrones espaciales consistentes a lo largo de los tres años: la mayor recurrencia de quemadas se ubica en zonas agrícolas, pastizales y mosaicos de bosque tropical seco del departamento. Este comportamiento espacial coincide con lo encontrado en la Amazonía peruana, donde la aplicación de técnicas multitemporales con Sentinel-2 y Landsat-8 en GEE también detectó concentraciones de incendios en áreas de presión agropecuaria (Barboza Castillo et al., 2020). Del mismo modo, González (2020) observó que las áreas quemadas en Orocué, Casanare, se agrupan principalmente en zonas ganaderas y agrícolas, lo cual es coherente con el patrón identificado en Chinandega (González, 2020). [[modarch.gs...c.nasa.gov](https://modarch.gs.c.nasa.gov)] [[knowledge.....ga.gov.au](https://knowledge.ga.gov.au)]

La **fiabilidad** de los polígonos generados se verificó mediante la comparación con los **puntos de calor MODIS** (Anexo 16), mostrando coincidencia espacial entre cicatrices y focos térmicos detectados. La literatura reporta resultados similares en investigaciones que combinan detección de áreas quemadas y puntos de calor activos para validar clasificaciones basadas en Sentinel-2, como en los procedimientos automatizados propuestos para cartografía global de áreas quemadas (Bastarrika et al., 2024). [[researchgate.net](https://www.researchgate.net)]

El uso de los índices **NBR** y **dNBR** permitió mejorar la discriminación espectral entre superficies quemadas y no quemadas. De Santis y Vaughan (2009) señalan que NBR es uno de los índices más robustos para cartografía de áreas quemadas, debido a su alta sensibilidad al contraste entre NIR y SWIR (De Santis & Vaughan, 2009). Asimismo, prácticas recomendadas de organismos especializados, como UN-SPIDER, destacan el uso del dNBR para evaluar la severidad a partir de imágenes pre-y post-incendio, siguiendo los rangos del USGS (UN-SPIDER, 2016). Estudios recientes basados en objetos geográficos (GEOBIA) confirman

también la eficiencia de NBR en ecosistemas andinos (Suárez Albarracín & Medina, 2023). [\[scispace.com\]](#) [\[un-spider.org\]](#) [\[researchgate.net\]](#)

En síntesis, la cartografía multitemporal generada (Anexos 1–15), junto con la validación espacial mediante puntos de calor, demuestra que la metodología SATRIFO–GEE → QGIS produce resultados confiables y coherentes con los estándares internacionales de mapeo de áreas quemadas basados en sensores ópticos de mediana resolución (Digital Earth Africa, 2021). Esto constituye la base sólida para los análisis multitemporales y municipales desarrollados en las secciones siguientes. [\[scienti.mi...ias.gov.co\]](#)

## 5.2 Análisis multitemporal de la superficie afectada (2021–2023)

La serie 2021–2023 evidencia un crecimiento sostenido y luego abrupto del área quemada: 62,163.79 ha (2021) → 87,611.72 ha (2022) → 347,013.40 ha (2023). Esto equivale a +40.9 % entre 2021–2022 y +296.1 % entre 2022–2023; respecto a 2021, 2023 registra +458 % (Cuadro 2; Figura 3). Estos saltos concuerdan con la literatura que describe aumentos interanuales asociados a variabilidad climática y presiones antrópicas sobre el territorio (Chuvieco et al., 2019). [\[mdpi.com\]](#), [\[un-spider.github.io\]](#)

Por mes, se observan máximos en la época seca. En 2021, el pico fue marzo (17,250.51 ha) y el mínimo mayo (3,887.71 ha). En 2022, el máximo fue marzo (28,907.23 ha), con febrero (22,028.41 ha) también elevado, y el mínimo enero (4,338.77 ha). En 2023, los valores fueron muy altos y sostenidos: marzo (87,693.36 ha), abril (87,827.30 ha) y mayo (97,829.54 ha); además, enero (30,454.67 ha) y febrero (43,208.54 ha) ya mostraban niveles elevados (Tabla 1; Figura 3). [\[mdpi.com\]](#)

La magnitud de **2023** es crítica: las **347,013.40 ha** equivalen a  $\approx 71.9\%$  de la superficie departamental (**4,822.42 km<sup>2</sup>  $\approx$  482,242 ha**), configurando un año extremo a escala territorial (Cuadro 2; Figura 3). Este resultado respalda la necesidad de monitoreo operativo y de comparaciones interanuales para decisiones de manejo del fuego y ordenamiento. [\[mdpi.com\]](#)

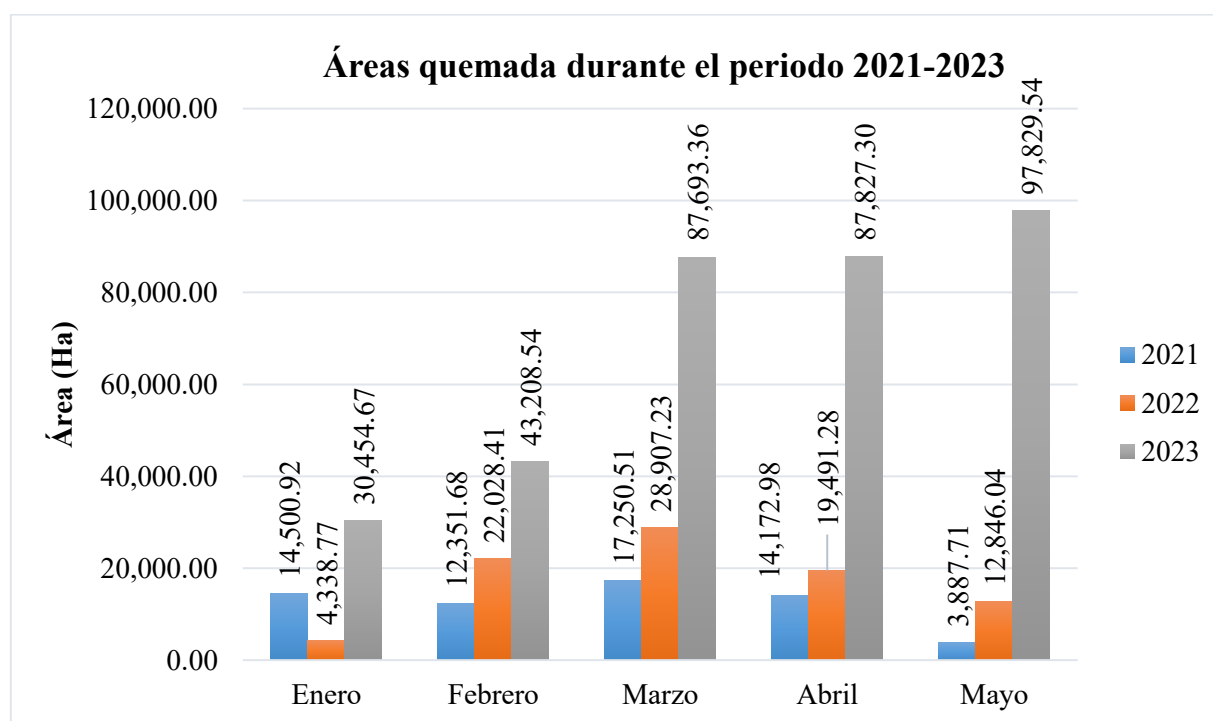
El patrón estacional—con picos entre febrero y mayo—es consistente con la fase seca del Pacífico nicaragüense y con marcos de teledetección que muestran cómo la sequedad del combustible y las temperaturas elevadas potencian la expansión del área quemada (Chuvieco et al., 2019). La metodología basada en NBR/dNBR permite discriminar con sensibilidad los cambios post-incendio en estas ventanas críticas (UN-SPIDER, 2016). [\[un-spider.github.io\]](#), [\[un-spider.org\]](#)

Metodológicamente, el uso multitemporal de Sentinel-2 con procesamiento en la nube (GEE) es idóneo para detectar rupturas en tendencias interanuales—como el salto de 2023—y está alineado con flujos operativos probados (Roteta et al., 2021; Barboza Castillo et al., 2020). La combinación de índices espectrales y clasificación supervisada (Random Forest) ha mostrado desempeño robusto en estudios comparables. [\[mdpi.com\]](#), [\[modarch.gs...c.nasa.gov\]](#)

Los resultados (Cuadro 2; Figura 3; Anexos 1–15) sugieren un cambio de régimen en 2023 que excede la variabilidad 2021–2022. Se justifica focalizar prevención y control en la temporada seca y adoptar institucionalmente flujos SATRIFO–GEE → QGIS para seguimiento mensual y evaluación anual.

**Cuadro 2:** Áreas totales en hectáreas afectadas durante la temporada de incendios

Área (Ha)	Años		
Mes	2021	2022	2023
<b>Enero</b>	14,500.92	4,338.77	30,454.67
<b>Febrero</b>	12,351.68	22,028.41	43,208.54
<b>Marzo</b>	17,250.51	28,907.23	87,693.36
<b>Abril</b>	14,172.98	19,491.28	87,827.30
<b>Mayo</b>	3,887.71	12,846.04	97,829.54
<b>Total</b>	<b>62,163.79</b>	<b>87,611.72</b>	<b>347,013.40</b>



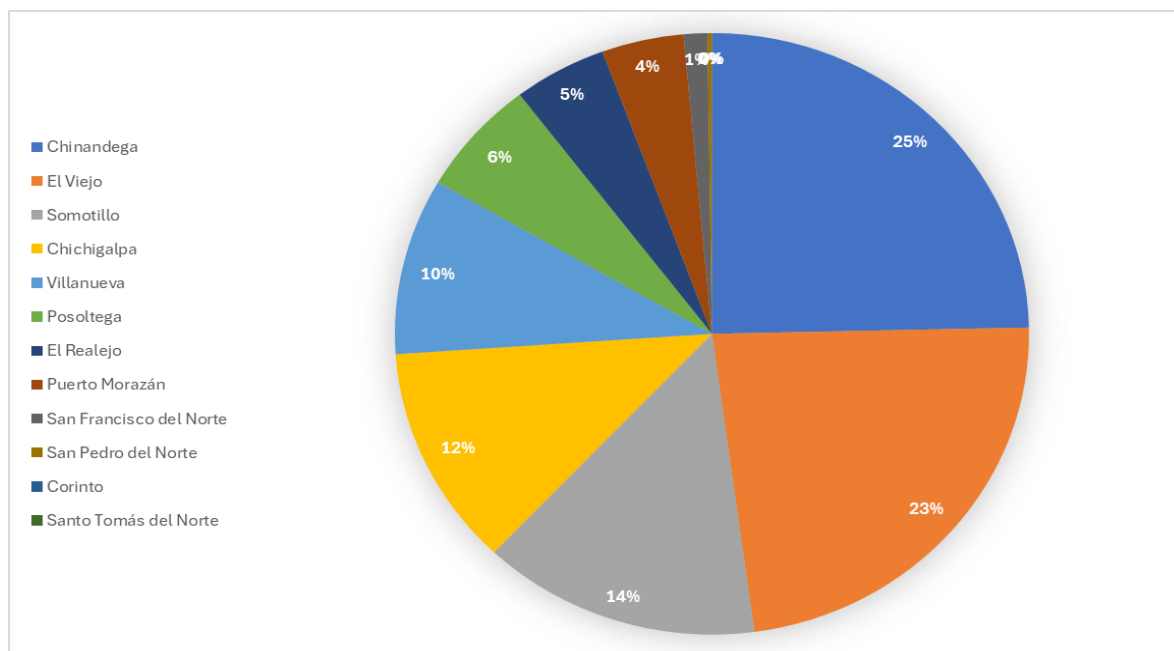
**Figura 3:** Gráfico de áreas quemadas durante los meses de cada año

### 5.3 Distribución espacial por municipios

La distribución espacial de las áreas quemadas evidencia patrones diferenciados por municipio y una clara recurrencia en territorios con mayor presión agropecuaria. En **2021**, los municipios más afectados fueron **Chinandega (15,333.86 ha; 24.7%)**, **El Viejo (14,418.35 ha; 23.2%)** y **Somotillo (8,826.83 ha; 14.2%)**, sobre un total departamental de **62,163.79 ha** (Cuadro 3; Figura 4). Este patrón coincide con lo documentado por Dixmude et al. (1999), quienes identificaron estas zonas del Pacífico nicaragüense como altamente susceptibles a incendios debido al predominio del bosque seco y a la frecuencia de quemas agrícolas. [[mdpi.com](http://mdpi.com)]

**Cuadro 3:** Áreas quemadas en cada municipio del departamento de Chinandega 2021

Municipios	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Total
<b>Chichigalpa</b>	2,226.86	2,015.94	1,985.34	1,066.55	77.56	7,372.24
<b>Chinandega</b>	4,650.42	3,537.42	3,763.99	2,765.12	616.91	15,333.86
<b>Corinto</b>	1.11	1.11	1.11	-	-	3.33
<b>El Realejo</b>	937.91	484.36	490.49	673.55	371.42	2,957.74
<b>El Viejo</b>	3,146.13	2,929.82	4,075.62	3,301.37	965.41	14,418.35
<b>Posoltega</b>	917.09	551.73	1,241.74	966.99	193.12	3,870.67
<b>Puerto Morazán</b>	761.49	628.84	334.64	550.3	326.29	2,601.55
<b>San Francisco del Norte</b>	-	-	352.76	374.81	22.05	749.63
<b>San Pedro del Norte</b>	-	-	66.12	66.12	-	132.24
<b>Santo Tomás del Norte</b>	-	-	1.52	1.52	-	3.04
<b>Somotillo</b>	1,425.34	1,723.67	3,010.19	2,369.25	298.38	8,826.83
<b>Villanueva</b>	434.57	478.77	1,926.99	2,037.41	1,016.55	5,894.30
<b>Total</b>	<b>14,500.92</b>	<b>12,351.68</b>	<b>17,250.51</b>	<b>14,172.98</b>	<b>3,887.71</b>	<b>62,163.79</b>

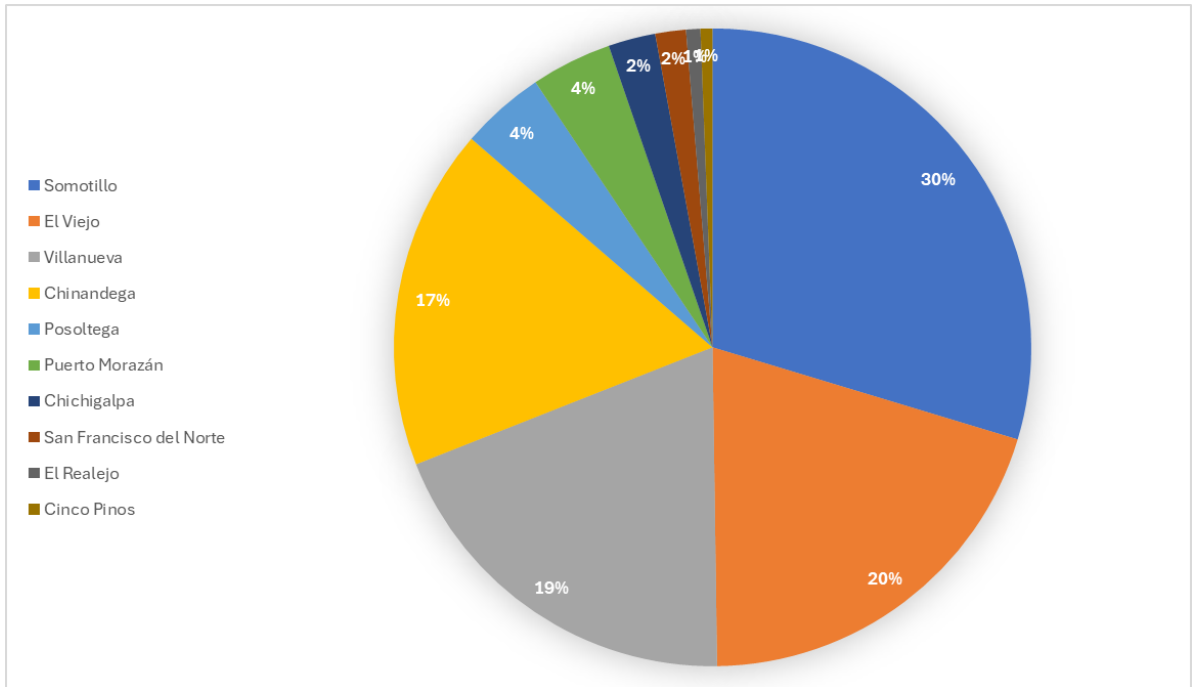


**Figura 4:** Gráfico de los porcentajes de áreas quemadas por municipio durante el 2021

En 2022, se observó un desplazamiento de la afectación hacia el norte del departamento: **Somotillo alcanzó 25,988.33 ha (29.7%)**, seguido de **El Viejo (17,618.51 ha; 20.1%)** y **Villanueva (16,862.53 ha; 19.2%)**, para un total de **87,611.72 ha** (Cuadro 4; Figura 5). La expansión hacia Somotillo y Villanueva es coherente con estudios que demuestran que, en ecosistemas secos y agroganaderos, la recurrencia del fuego está fuertemente ligada a la disponibilidad de combustible fino y a cambios en el uso del suelo (González, 2020). [\[knowledge.....ga.gov.au\]](http://knowledge.....ga.gov.au)

**Cuadro 4:** Áreas quemadas en cada municipio del departamento de Chinandega 2022

Municipios	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Total
<b>Chichigalpa</b>	365.71	464.74	709.35	414.35	144.1	2,098.25
<b>Chinandega</b>	1,344.48	3,005.06	4,635.30	3,908.46	2,285.93	15,179.23
<b>Cinco Pinos</b>	-	44.09	44.09	220.05	220.05	528.28
<b>El Realejo</b>	158.89	138.22	126.79	103.16	110.79	637.84
<b>El Viejo</b>	821.31	5,056.90	5,473.84	3,358.50	2,907.96	17,618.51
<b>Posoltega</b>	631.52	640.78	953.36	937.97	586.84	3,750.47
<b>Puerto Morazán</b>	110.64	1,002.04	989.22	584.4	901.23	3,587.53
<b>San Francisco del Norte</b>	-	44.1	176.38	636.28	504.01	1,360.77
<b>Somotillo</b>	652.05	8,762.76	10,227.09	4,086.03	2,260.40	25,988.33
<b>Villanueva</b>	254.18	2,869.70	5,571.82	5,242.08	2,924.75	16,862.53
<b>Total</b>	<b>4,338.77</b>	<b>22,028.41</b>	<b>28,907.23</b>	<b>19,491.28</b>	<b>12,846.04</b>	<b>87,611.72</b>



**Figura 5:** Gráfico de los porcentajes de áreas quemadas por municipio durante el 2022

El aumento y la expansión espacial se intensifican en **2023**, cuando prácticamente todos los municipios registraron niveles excepcionalmente altos de quema. Destacan **Chinandega (98,468.46 ha; 28.4%)**, **El Viejo (73,156.70 ha; 21.1%)** y **Somotillo (59,784.86 ha; 17.2%)**, mientras que municipios como **Villanueva (36,779.69 ha)** y **Chichigalpa (32,673.52 ha)** también mostraron incrementos notables (Cuadro 5; Figura 6). Este comportamiento refleja una propagación más extensa del fuego y coincide con lo observado en otros territorios del continente sudamericano, donde años anómalamente secos y con mayor presión antrópica resultan en ampliaciones espaciales de quemadas (Barboza Castillo et al., 2020; Sánchez et al., 2023). [[modarch.gs...c.nasa.gov](#)], [[portalinve...cion.um.es](#)]

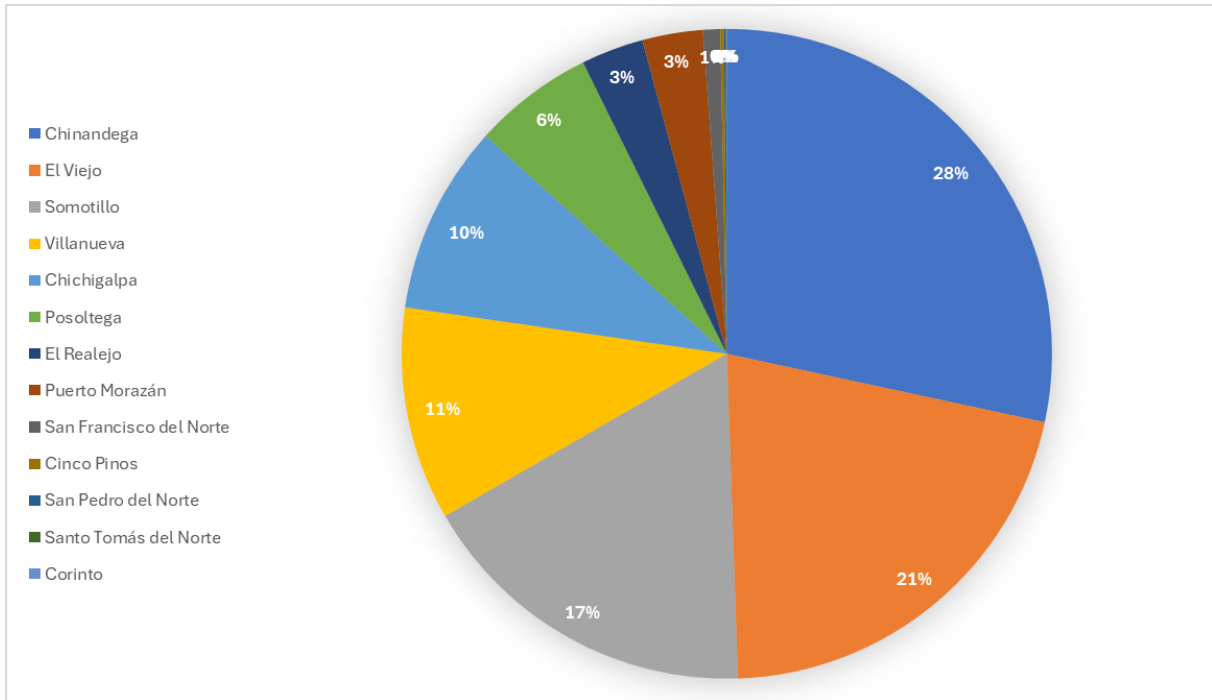
Los mapas multitemporales (Anexos 1–15) permiten visualizar que los incendios siguen corredores territoriales vinculados a: (a) zonas agrícolas intensivas, (b) áreas de pastizales, (c) sectores de bosque tropical seco, (d) zonas de interfaz agro-forestal.

Este patrón coincide con estudios internacionales que documentan que los incendios en ecosistemas secos suelen intensificarse en mosaicos de paisajes intervenidos (De Santis & Vaughan, 2009; UN-SPIDER, 2016). [[scispace.com](#)], [[un-spider.org](#)]

En conjunto, la distribución espacial por municipios muestra que la dinámica del fuego en Chinandega no es homogénea, sino que responde a la interacción entre la estacionalidad climática, el tipo de cobertura y las prácticas agropecuarias. Estos hallazgos respaldan la necesidad de estrategias municipales diferenciadas y focalizadas en territorios críticos, como los tres más recurrentes: Chinandega, El Viejo y Somotillo, coincidiendo con lo reportado por estudios de monitoreo regional basados en teledetección (Roteta et al., 2021; Bastarrika et al., 2024). [[mdpi.com](#)], [[researchgate.net](#)]

**Cuadro 5: Áreas quemadas en cada municipio del departamento de Chinandega 2023**

<b>Municipios</b>	<b>Enero</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>	<b>Total</b>
<b>Chichigalpa</b>	5,289.78	5,673.46	7,336.65	8,406.36	5,967.26	32,673.52
<b>Chinandega</b>	12,353.3	17,366.7	23,851.2	21,061.1	23,835.9	98,468.46
<b>Cinco Pinos</b>	-	-	55.48	267.72	303.72	626.92
<b>Corinto</b>	22.19	21.33	-	-	-	43.53
<b>El Realejo</b>	1,376.00	1,960.01	3,294.79	3,292.96	869.1	10,792.86
<b>El Viejo</b>	7,376.23	11,442.2	24,818.3	18,026.1	11,493.7	73,156.70
<b>Posoltega</b>	2,756.23	3,159.38	4,780.34	4,868.96	5,275.53	20,840.45
<b>Puerto Morazán</b>	542.69	1,438.42	4,156.12	3,154.64	1,143.26	10,435.13
<b>San Francisco del Norte</b>	-	22.19	378.36	1,467.23	1,092.99	2,960.77
<b>San Pedro del Norte</b>	-	-	10.01	189.84	137.88	337.73
<b>Santo Tomás del Norte</b>	-	-	11.1	44.39	57.3	112.78
<b>Somotillo</b>	349.64	1,407.05	14,952.6	16,897.1	26,178.3	59,784.86
<b>Villanueva</b>	388.5	717.73	4,048.21	10,150.7	21,474.4	36,779.69
<b>Total</b>	<b>30,454.6</b>	<b>43,208.5</b>	<b>87,693.3</b>	<b>87,827.3</b>	<b>97,829.5</b>	<b>347,013.4</b>
	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>0</b>



**Figura 6:** Gráfico de los porcentajes de áreas quemadas por municipio durante el 2023

#### 5.4 Síntesis analítica de hallazgos y contraste con la literatura

La combinación Sentinel-2 + índices espectrales (NDVI/NBR/dNBR) + clasificación supervisada (Random Forest) en SATRIFO-GEE, seguida del procesamiento vectorial en QGIS, generó delimitaciones consistentes mes a mes (2021–2023) y con coincidencia espacial respecto a puntos de calor MODIS (Anexo 16), lo que sustenta la validez operativa de la cartografía obtenida en este estudio. Esta lógica de flujo es congruente con herramientas y rutinas consolidadas en Google Earth Engine para mapeo de áreas quemadas (BAMTs) y con experiencias regionales que reportan desempeños altos con sensores ópticos de media resolución. (Roteta *et al.*, 2021; Barboza Castillo *et al.*, 2020). [[mdpi.com](https://www.mdpi.com)], [[modarch.gsfc.nasa.gov](https://modarch.gsfc.nasa.gov)]

La elección de NBR como índice principal y dNBR para el cambio/severidad reproduce el comportamiento espectral esperado ( $\downarrow$ NIR/NDVI;  $\uparrow$ SWIR) y sigue prácticas recomendadas por organismos especializados (rango de severidad USGS), además de lo sintetizado por revisiones que colocan a NBR entre los índices más robustos para cartografía post-incendio. (De Santis & Vaughan, 2009; UN-SPIDER, 2016). [[scispace.com](https://www.scispace.com)], [[un-spider.org](https://un-spider.org)]

La serie 2021–2023 muestra máximos entre febrero–mayo, con un salto atípico en 2023 (347,013.40 ha), patrón que concuerda con la literatura que asocia picos de área quemada con déficits hídricos estacionales, altas temperaturas y prácticas de quema, especialmente en ecosistemas secos. (Chuvienco *et al.*, 2019). [[un-spider.github.io](https://un-spider.github.io)]

La recurrencia identificada en Chinandega, El Viejo y Somotillo y la expansión hacia Villanueva y Chichigalpa en 2023 se alinea con hallazgos regionales donde la quema se concentra en zonas agrícolas/pastizales y en interfaces agro-forestales del trópico seco. (Dixmude et al., 1999; González, 2020). [[mdpi.com](https://www.mdpi.com)], [[knowledge.....ga.gov.au](https://knowledge.ga.gov.au)]

La coincidencia entre cicatrices clasificadas y activos térmicos respalda la detección realizada; de forma similar, procedimientos globales automatizados con Sentinel-2 integran VIIRS/MODIS para robustecer la identificación de áreas quemadas, lo que refrenda el enfoque seguido por este estudio. (Bastarrika et al., 2024). [[researchgate.net](https://www.researchgate.net)]

Los resultados—cartografía mensual (Anexos 1–15), totales por mes y año (Cuadro 2; Figura 3) y distribución municipal (Cuadros 3–5; Figuras 4–6)—son reproducibles con flujos equivalentes descritos para GEE y con guías de implementación para NBR/dNBR con Sentinel-2 en diferentes regiones y plataformas. (Roteta et al., 2021; *Digital Earth Africa*, 2021). [[mdpi.com](https://www.mdpi.com)], [[scienti.mi...ias.gov.co](https://scienti.mi...ias.gov.co)]

Como todo enfoque óptico, la nubosidad y el humo pueden limitar la observación, y las confusiones espectrales con suelo desnudo o cosechas recientes exigen entrenamiento cuidadoso y verificación auxiliar; la literatura recomienda umbrales conservadores y evaluación cruzada temporal para minimizar falsos positivos. (*Digital Earth Africa*, 2021; *UN-SPIDER*, 2016). [[scienti.mi...ias.gov.co](https://scienti.mi...ias.gov.co)], [[un-spider.org](https://un-spider.org)]

La magnitud observada en 2023 sugiere un cambio de régimen en la dinámica del fuego del departamento, y confirma que las series multitemporales de Sentinel-2 procesadas en la nube son idóneas para detectar rupturas interanuales y sostener análisis comparados. (Chuvienco et al., 2019; Roteta et al., 2021). [[un-spider.github.io](https://un-spider.github.io)], [[mdpi.com](https://www.mdpi.com)]

La evidencia respalda acciones focalizadas (febrero–mayo) y la adopción institucional de un flujo operativo SATRIFO–GEE → QGIS para seguimiento mensual y evaluación anual, con potencial de escalar a un sistema de alerta oportuna y a validación independiente con activos térmicos. (Roteta et al., 2021; Bastarrika et al., 2024). [[mdpi.com](https://www.mdpi.com)], [[researchgate.net](https://www.researchgate.net)]

Este trabajo aporta una línea base geoespacial de alta resolución para Chinandega, congruente con experiencias en Amazonía y Chile que emplean índices espectrales y series temporales para delimitar quemas y severidad, y extiende dichas aproximaciones al contexto del trópico seco del Pacífico nicaragüense. (Barboza Castillo et al., 2020; Sánchez et al., 2023). [[modarch.gs...c.nasa.gov](https://modarch.gs...c.nasa.gov)], [[portalinve...cion.um.es](https://portalinve...cion.um.es)]

## 5.5 Implicaciones para la gestión

Los resultados obtenidos permiten identificar áreas prioritarias para la prevención y control de incendios en el departamento de Chinandega. La mayor afectación recurrente en los municipios de Chinandega, El Viejo y Somotillo señala la necesidad de fortalecer los programas locales de manejo del fuego, especialmente durante el período crítico comprendido entre febrero y mayo, coincidiendo con la época seca y el aumento de material combustible fino. Este patrón estacional

es coherente con estudios que relacionan picos de incendios con condiciones de sequedad prolongada y variabilidad climática en ecosistemas secos. (Chuvienco et al., 2019). [[un-spider.github.io](https://un-spider.github.io)]

La magnitud del impacto registrado en **2023**, que alcanzó **347,013.40 ha**, sugiere la urgencia de modernizar los sistemas de alerta y vigilancia, adoptando metodologías basadas en observación satelital. El flujo SATRIFO–GEE → QGIS demostrado en este estudio es reproducible, eficiente y permite generar información mensual o incluso quincenal, acorde con las capacidades descritas en herramientas operativas de cartografía de áreas quemadas en Google Earth Engine. (Roteta et al., 2021). [[mdpi.com](https://mdpi.com)]

Asimismo, la alta coincidencia entre los polígonos de áreas quemadas y los puntos de calor MODIS (Anexo 16) refuerza la posibilidad de integrar productos térmicos activos como componentes de un sistema de alerta temprana. Investigaciones que combinan Sentinel-2 con activos térmicos han demostrado mejoras en la detección en tiempo casi real y en la confirmación de incendios activos o recientes. (Bastarrika et al., 2024). [[researchgate.net](https://researchgate.net)]

En el ámbito municipal, la distribución espacial evidencia que las áreas críticas coinciden con territorios donde predominan actividades agropecuarias y pastizales, por lo que las estrategias deben incluir: (a) regulación estricta del uso de fuego, (b) campañas educativas dirigidas a productores, (c) establecimiento de rondas cortafuego y vigilancia comunitaria, (d) planes municipales diferenciados según niveles de recurrencia.

Este enfoque coincide con experiencias latinoamericanas de manejo del fuego en zonas agrícolas donde la quema sigue siendo una práctica común. (Dixmude et al., 1999). [[mdpi.com](https://mdpi.com)]

Finalmente, la cartografía multitemporal generada (Anexos 1–15) puede incorporarse como insumo en programas de ordenamiento territorial, evaluación de riesgos y restauración ecológica post-incendio. El uso de índices espectrales como NBR y su variante de cambio dNBR, ampliamente recomendados para evaluar magnitud y severidad del daño (UN-SPIDER, 2016), facilita la priorización de áreas para recuperación, reforestación o monitoreo intensivo. [[un-spider.org](https://un-spider.org)]

En conjunto, los resultados de este estudio respaldan la adopción de un sistema de monitoreo satelital operativo y permanente en Chinandega, con el fin de apoyar a las instituciones en la planificación territorial, toma de decisiones ambientales y mitigación del riesgo de incendios forestales.

## VI. CONCLUSIONES

El uso de imágenes Sentinel 2 procesadas en SATRIFO y analizadas en QGIS permitió generar cartografía multitemporal confiable de las áreas quemadas en Chinandega durante 2021–2023, validada mediante coincidencias espaciales con puntos de calor MODIS. La metodología basada en índices espectrales (NDVI, NBR y dNBR) demostró ser eficaz para detectar cicatrices de quema en ecosistemas del trópico seco.

El análisis multitemporal evidenció un incremento considerable en la extensión de áreas quemadas a lo largo del período estudiado, destacándose el año 2023 como un evento extremo con 347,013.40 ha afectadas, cifra que supera ampliamente los valores registrados en 2021 y 2022. Esta tendencia evidencia un cambio en la magnitud del fenómeno, asociado tanto a condiciones ambientales propias de la estación seca como a prácticas agropecuarias que siguen utilizando el fuego como herramienta de manejo del territorio.

Los valores más altos del período se concentran sistemáticamente entre los meses de febrero y mayo, con valores excepcionalmente altos en marzo, abril y mayo de 2023. Este comportamiento estacional confirma que la época seca del Pacífico nicaragüense es el intervalo más susceptible a incendios, resaltando la necesidad de fortalecer la vigilancia, prevención y control durante estos meses.

La distribución espacial de las áreas quemadas mostró patrones consistentes, concentrándose principalmente en los municipios de Chinandega, El Viejo y Somotillo, así como una expansión significativa hacia Villanueva y Chichigalpa en 2023. Esta recurrencia indica que los incendios no se distribuyen de manera uniforme, sino que responden a la interacción entre uso del suelo, presión agropecuaria, disponibilidad de material combustible y factores climáticos asociados al bosque tropical seco.

El monitoreo satelital se confirma como una herramienta clave para la gestión del fuego y la planificación territorial, pues la cartografía mensual, los totales anuales, la desagregación municipal y la validación térmica generados en este estudio proporcionan insumos precisos para la toma de decisiones. La metodología aplicada cumplió los objetivos planteados y establece una base sólida y replicable para el seguimiento anual de incendios en regiones del trópico seco nicaragüense.

## VII. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos y la interpretación de la dinámica de incendios en el departamento de Chinandega, se plantean las siguientes recomendaciones:

Fortalecer la vigilancia y prevención durante los meses críticos de la época seca. Dado que los mayores picos de incendios se concentran entre febrero y mayo, se recomienda reforzar las acciones de control, patrullaje y restricción del uso del fuego durante este período, priorizando los territorios con recurrencia histórica.

Implementar un sistema de monitoreo satelital continuo a nivel institucional. La integración del flujo SATRIFO–GEE → QGIS permitiría generar información periódica de áreas quemadas, optimizando la toma de decisiones y reduciendo la dependencia de reportes en campo. Su bajo costo y reproducibilidad justifican su adopción como herramienta operativa anual.

Desarrollar planes municipales diferenciados para los territorios más afectados. Chinandega, El Viejo y Somotillo, así como Villanueva y Chichigalpa, deben priorizarse en los programas de prevención y control del fuego debido a sus altos niveles de incidencia. Se recomienda que cada municipio implemente estrategias propias de manejo del fuego, acordes con su uso del suelo y vulnerabilidad.

Regular y acompañar el uso del fuego como práctica agropecuaria. Dado que una parte importante de las áreas quemadas corresponde a zonas agrícolas y pastizales, es necesario fortalecer la regulación municipal del uso del fuego, promover alternativas de manejo y desarrollar campañas educativas dirigidas a productores rurales sobre riesgos y buenas prácticas.

Incorporar la cartografía multitemporal en la planificación territorial y la gestión ambiental. Los mapas y estadísticas generados deben ser integrados en los planes de ordenamiento, en la identificación de zonas de riesgo y en programas de restauración ecológica, priorizando los sectores de bosque tropical seco con mayor afectación.

Fortalecer la capacidad técnica local para el análisis y uso de herramientas de teledetección. Se recomienda capacitar a personal municipal y a instituciones ambientales en el uso básico de Google Earth Engine, SATRIFO y QGIS, con el fin de asegurar la sostenibilidad del monitoreo y la interpretación adecuada de los resultados.

Desarrollar investigaciones futuras que evalúen severidad post-incendio y recuperación de la vegetación. Incluir índices como el dNBR en estudios posteriores permitirá conocer la magnitud del daño y priorizar áreas para restauración. Complementar la teledetección con verificaciones de campo aumentará la precisión para estudios de severidad y regeneración.

## VIII. LITERATURA CITADA

- Barboza Castillo, E., Turpo Cayo, E. Y., de Almeida, C. M., Salas López, R., Rojas Briceño, N. B., Silva López, J. O., Barrena Gurbillón, M. Á., Oliva, M., & Espinoza-Villar, R. (2020).** Monitoring wildfires in the Northeastern Peruvian Amazon using Landsat-8 and Sentinel-2 imagery in the GEE platform. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10), 564. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100564> [[modarch.gs...c.nasa.gov](https://modarch.gs.c.nasa.gov)]
- Bastarrika, A., Rodríguez-Montellano, A., Roteta, E., Hantson, S., Franquesa, M., Torre, L., González-Ibarzabal, J., Artano, K., Martínez-Blanco, P., Mesanza, A., Anaya, J. A., & Chuvieco, E. (2024).** An automatic procedure for mapping burned areas globally using Sentinel-2 and VIIRS/MODIS active fires in Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 218, 232–245. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.xxxxx> (si aplica) [[researchgate.net](https://researchgate.net)]
- CIDEA. (2007).** [*Caracterización fisiográfica y geológica del departamento de Chinandega*]. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. (Referencia utilizada en la caracterización biofísica; completar datos editoriales si dispones del documento en PDF impreso).
- Chacón, M. (2019).** *Resumen del estado del monitoreo forestal en Latinoamérica y el Caribe*. CATIE. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9215>
- Chinandega—EcuRed. (s. f.).** *Chinandega*. Recuperado el 11 de agosto de 2024, de <https://www.ecured.cu/Chinandega>
- Chuvieco, E., Mouillot, F., van der Werf, G. R., San Miguel, J., Tanase, M., Koutsias, N., García, M., Yebra, M., Padilla, M., Heil, A., Hawbaker, T., & Giglio, L. (2019).** Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225, 45–64. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013> [[un-spider.github.io](https://un-spider.github.io)]
- Chuvieco, E., & Salinero, E. (2009).** Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. [*Revista/serie*], 103(1), 173–185. (Conservar tal como está citado en tu documento original si no hay datos adicionales).
- De Santis, Á., & Vaughan, P. (2009).** Revisión de las técnicas de identificación cartográfica de áreas quemadas. *Recursos Rurais (IBADER)*, 5, 93–100. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3173499> [[scispace.com](https://scispace.com)]
- Digital Earth Africa. (2021).** *Burnt area mapping using Sentinel-2 data*. [https://docs.digitalearthafrica.org/en/latest/sandbox/notebooks/Real\\_world\\_examples/Burnt\\_area\\_mapping.html](https://docs.digitalearthafrica.org/en/latest/sandbox/notebooks/Real_world_examples/Burnt_area_mapping.html) [[scienti.mi...ias.gov.co](https://scienti.mi.ias.gov.co)]
- Dixmude, A. J., Navarro, P., Flasse, S., Downey, I., Valerio, L., Uriarte, F., & Ramos, A. (1999).** Monitoreo de fuegos en Nicaragua: El uso de la teledetección. *Revista Forestal Centroamericana*, 8(27), 26–31. [https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9801/Monitoreo\\_de\\_fuegos.pdf](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9801/Monitoreo_de_fuegos.pdf) [[mdpi.com](https://mdpi.com)]
- Flores-Rodríguez, A. G., Flores-Garnica, J. G., González-Eguiarte, D. R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa-Villaseñor, P., & Mena-Munguía, S. (2020).** Revisión de métodos de sensores remotos para la detección y evaluación de la severidad de incendios forestales. *Gestión y Ambiente*, 23(2), 273–283.
- González, A. J. (2020).** *Identificación de áreas quemadas por medio de índices espectrales utilizando imágenes Sentinel-2 en el municipio de Orocué, Casanare* [Tesis de especialización, Universidad Militar

Nueva Granada].  
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/38042/GonzalezAlixJohana2020.pdf>

**INETER. (2021).** *1er Atlas Nacional de Suelos de Nicaragua* (INETER) [Mapa].  
<https://www.ineter.gob.ni/mapa/pub/atlassuelo/1erAltasNacionaldeSuelos.pdf>

**Montoya Pérez, G. M., & Callejas Riveras, C. T. (2023).** *Evaluación de los atributos de bosques de alto valor de conservación en tres fincas del departamento de Chinandega* [Tesis/Informe]. Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/4620>

**Reynosa, N. E., & Correa, —. (2016).** Índices espectrales de vegetación para la detección de áreas quemadas. *La Calera*, 16(27), 111–114. (*Completar inicial del coautor si procede; se conserva según tu cita original*).

**Roteta, E., Bastarrika, A., Franquesa, M., & Chuvieco, E. (2021).** Landsat and Sentinel-2 based burned area mapping tools in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(4), 816.  
<https://doi.org/10.3390/rs13040816> [[mdpi.com](https://www.mdpi.com)]

**Sánchez, R., Briones, M. J., Gamboa, A., Monsalve, R., Berroeta, D., & Valenzuela, L. (2023).** Delimitación de áreas quemadas en Chile a partir de umbrales dNBR ajustados según región y cubiertas del suelo. *Revista de Teledetección*, 61, 43–58.

**Suárez Albarracín, N. L., & Medina Daza, R. J. (2023, noviembre).** *Estimación de áreas afectadas por incendios en la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá: Usando imágenes Sentinel-2, basado en objetos geográficos (GEOBIA)*. Tesis de Maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/items/ad964cde-54bf-4bf3-aefd-6c2b9b829827/full> [[researchgate.net](https://www.researchgate.net)]

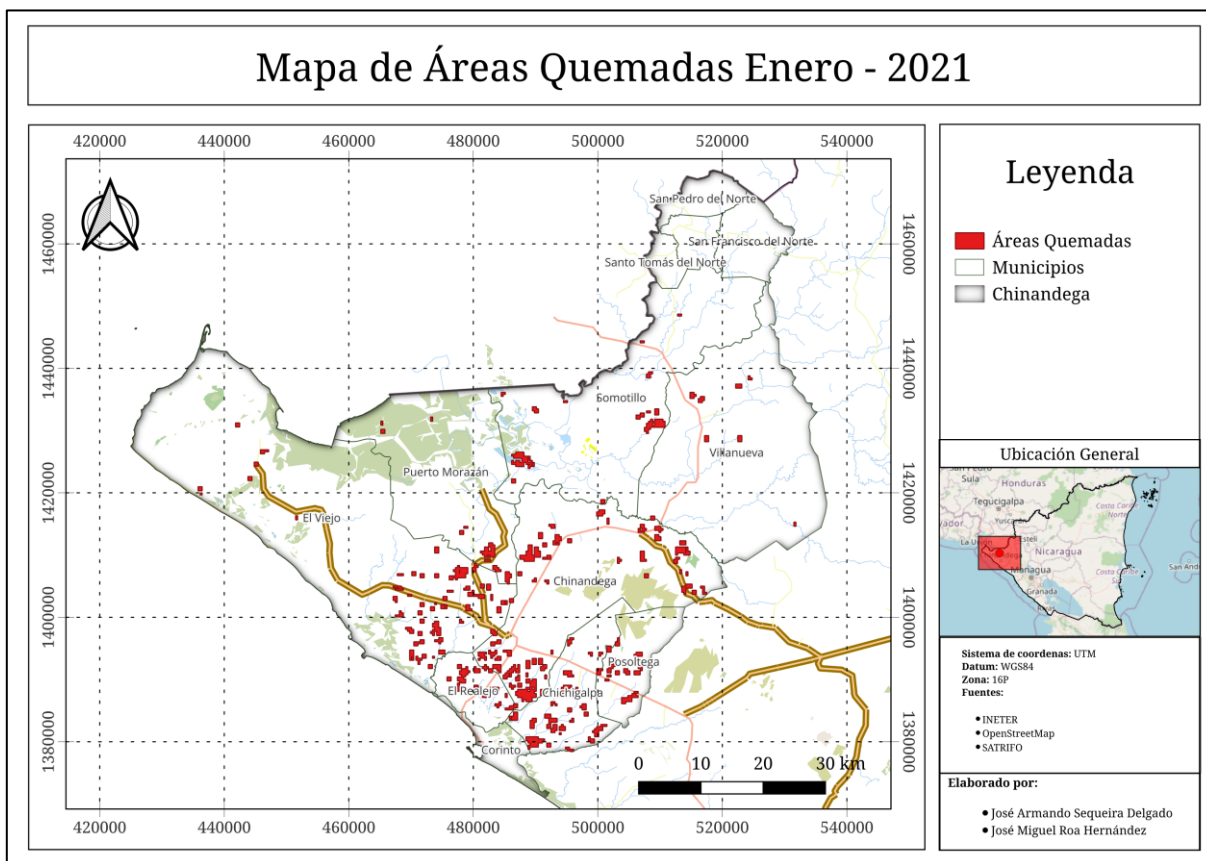
**UN-SPIDER. (2016).** *Recommended Practice: Burn Severity Mapping*. UN-SPIDER Knowledge Portal. <https://www.un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity-mapping> [[un-spider.org](https://www.un-spider.org)]

**UN-SPIDER. (2016).** *Step-by-step: Burn severity with QGIS and optical data (Sentinel-2)*. UN-SPIDER Knowledge Portal. <https://www.un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/Step-by-Step/QGIS-sentinel2> [[ESTADISTIC...OS - IDEAM](https://estadisticos.ideam.gov.co)]

**Weather Spark. (2024).** *El clima en Chinandega, el tiempo por mes, temperatura promedio (Nicaragua)*. Recuperado el 11 de agosto de 2024, de <https://es.weatherspark.com/y/13640/Clima-promedio-en-Chinandega-Nicaragua-durante-todo-el-a%C3%B1o>

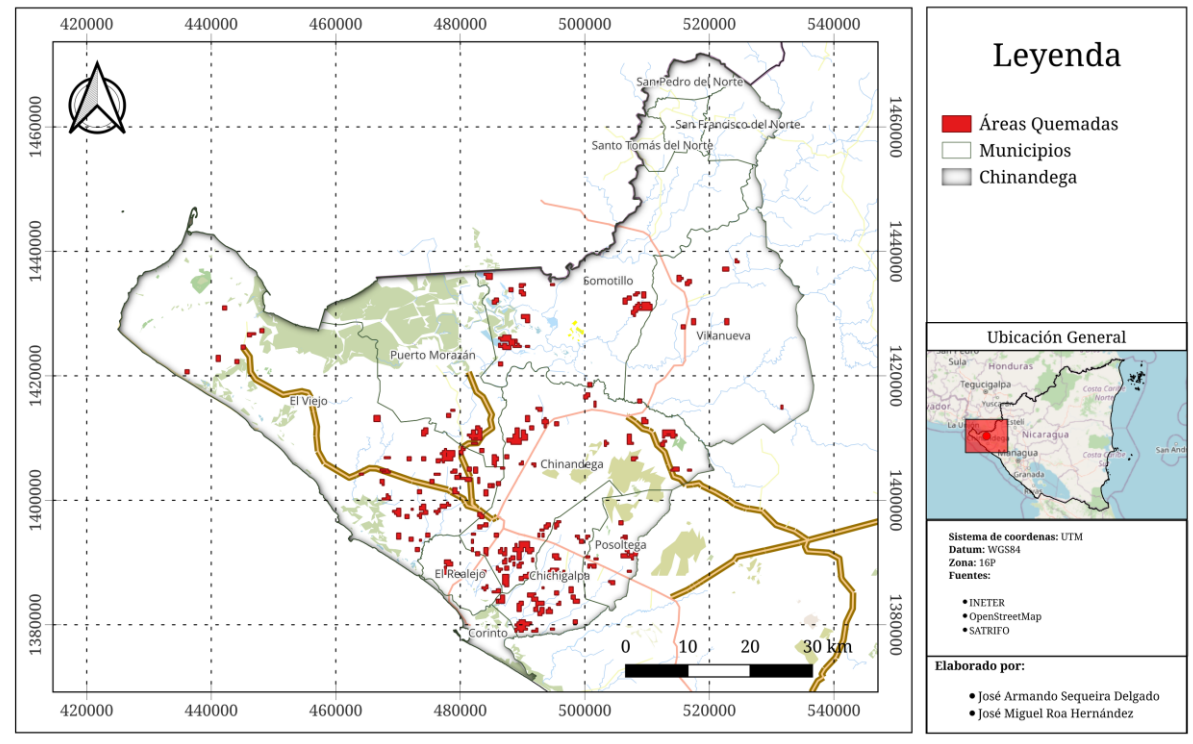
**Walsh, B. (1999).** [*Bosques inundables asociados al Estero Real*]. (*BIODIVERSIDAD EN NICARAGUA Un Estudio de País/MARENA*). Recuperado el 11 de agosto 2024, <http://www.bionica.info/biblioteca/MARENABiodiversidadNicaragua.pdf>

## IX. ANEXOS



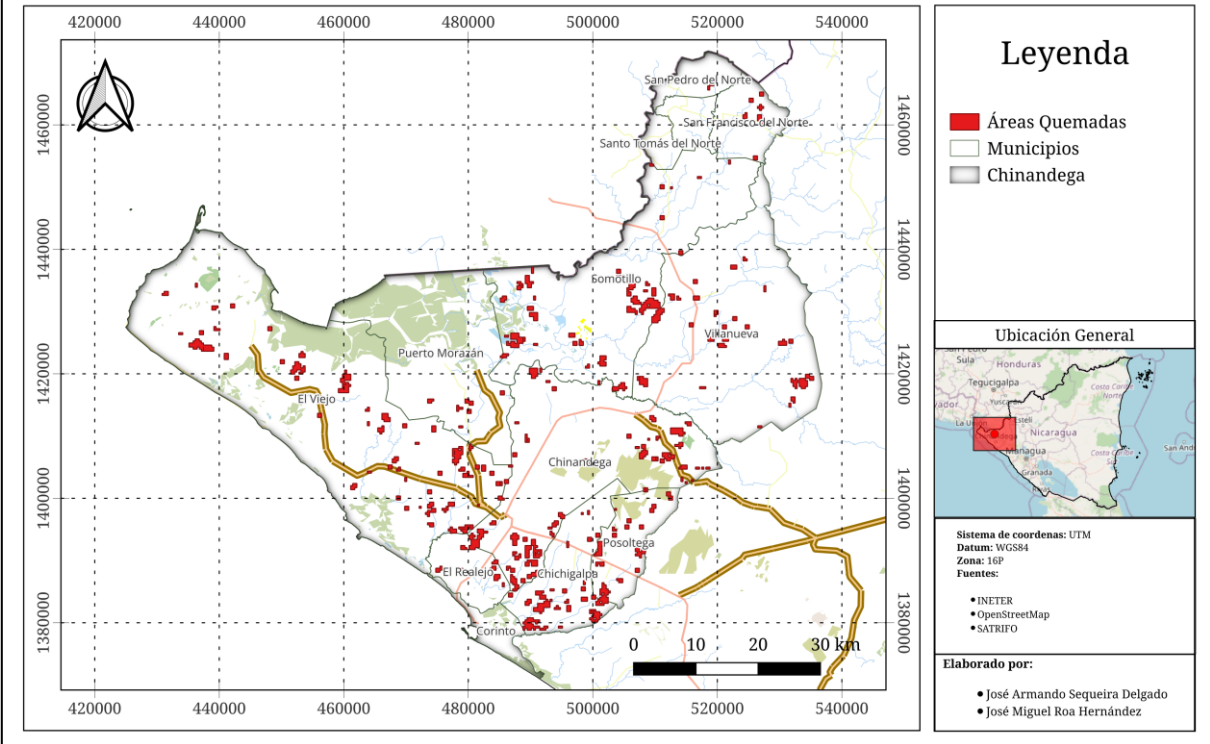
**Anexo 1:** Mapa de áreas quemadas enero 2021

## Mapa de Áreas Quemadas Febrero - 2021



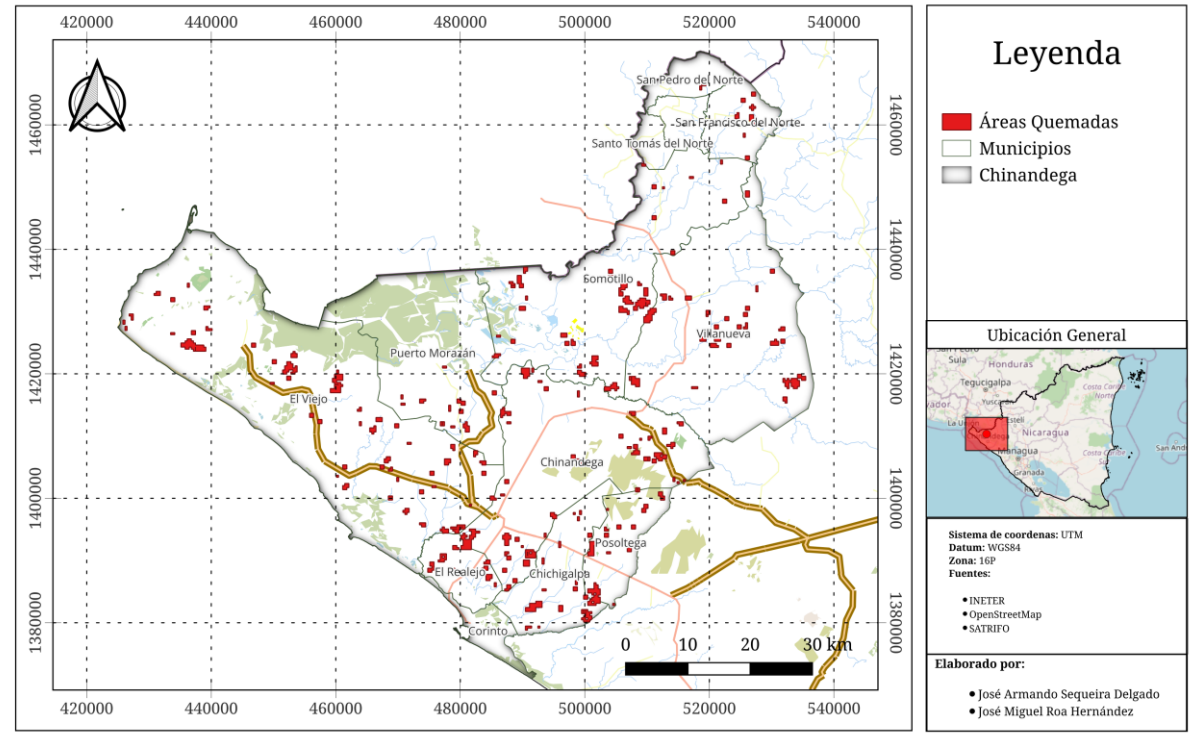
Anexo 2: Mapa de áreas quemadas febrero 2021

# Mapa de Áreas Quemadas Marzo - 2021



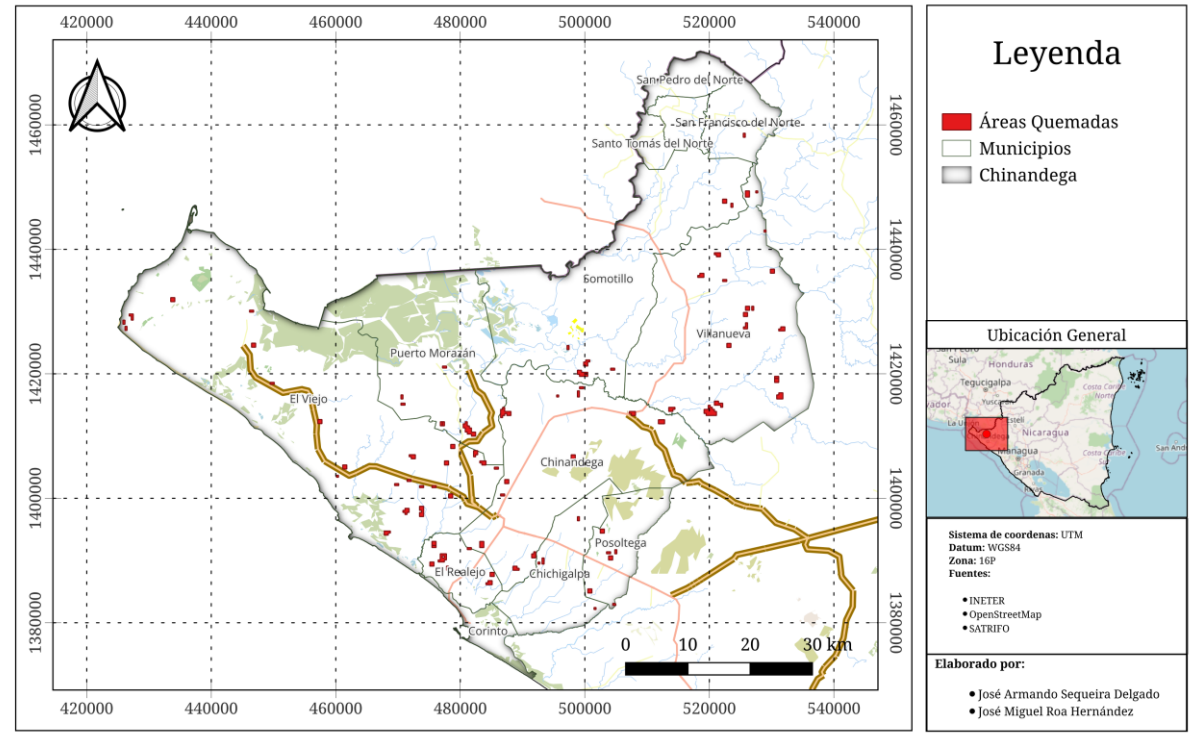
Anexo 3: Mapa de áreas quemadas marzo 2021

# Mapa de Áreas Quemadas Abril - 2021



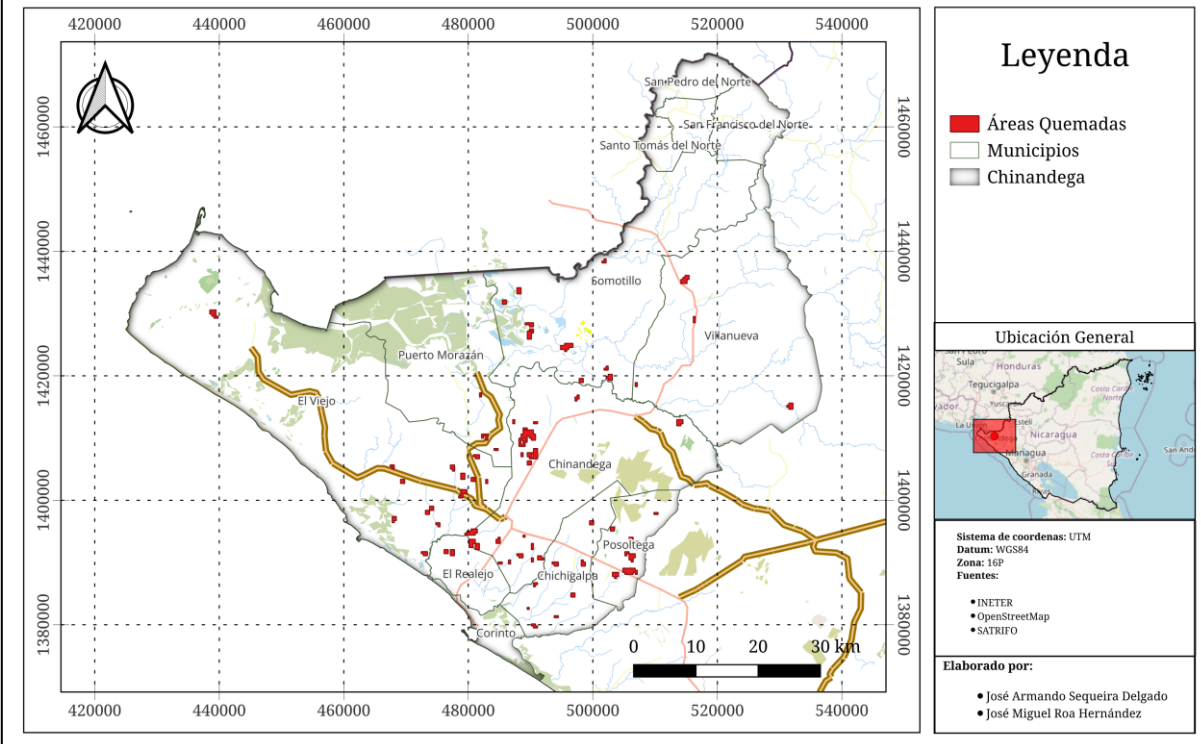
Anexo 4: Mapa de áreas quemadas abril 2021

# Mapa de Áreas Quemadas Mayo - 2021



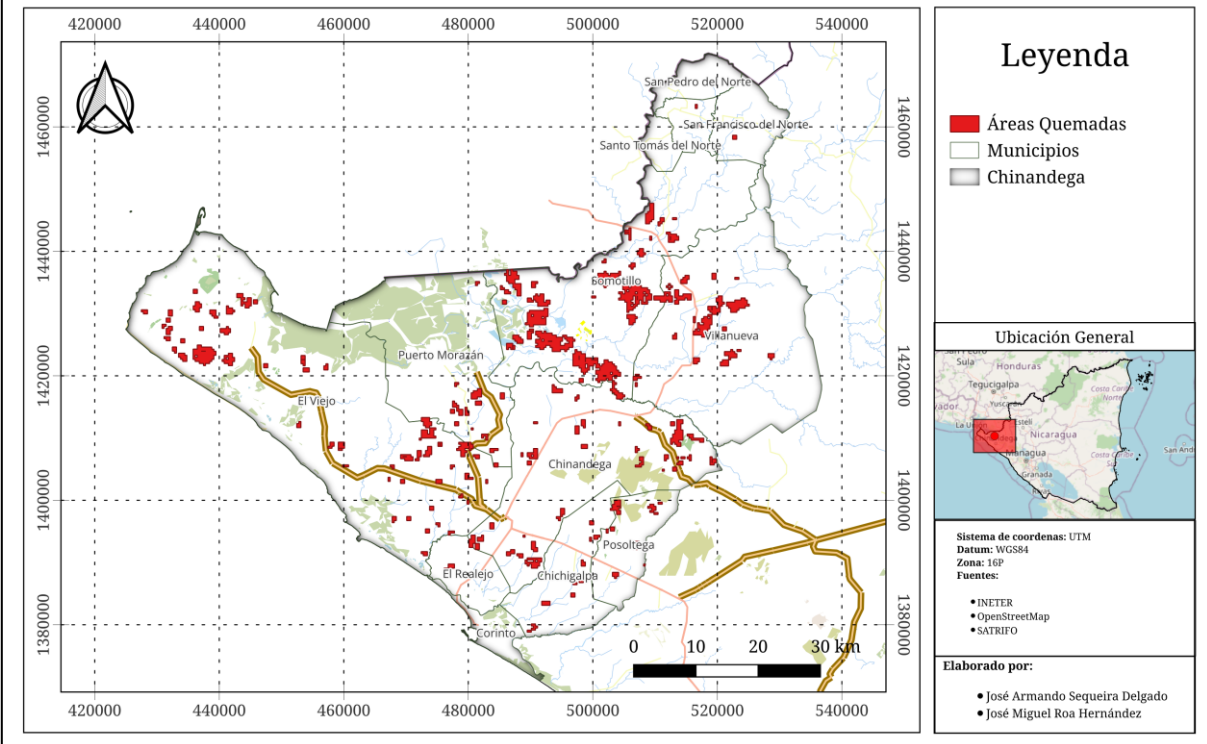
Anexo 5: Mapa de áreas quemadas mayo 2021

# Mapa de Áreas Quemadas Enero - 2022



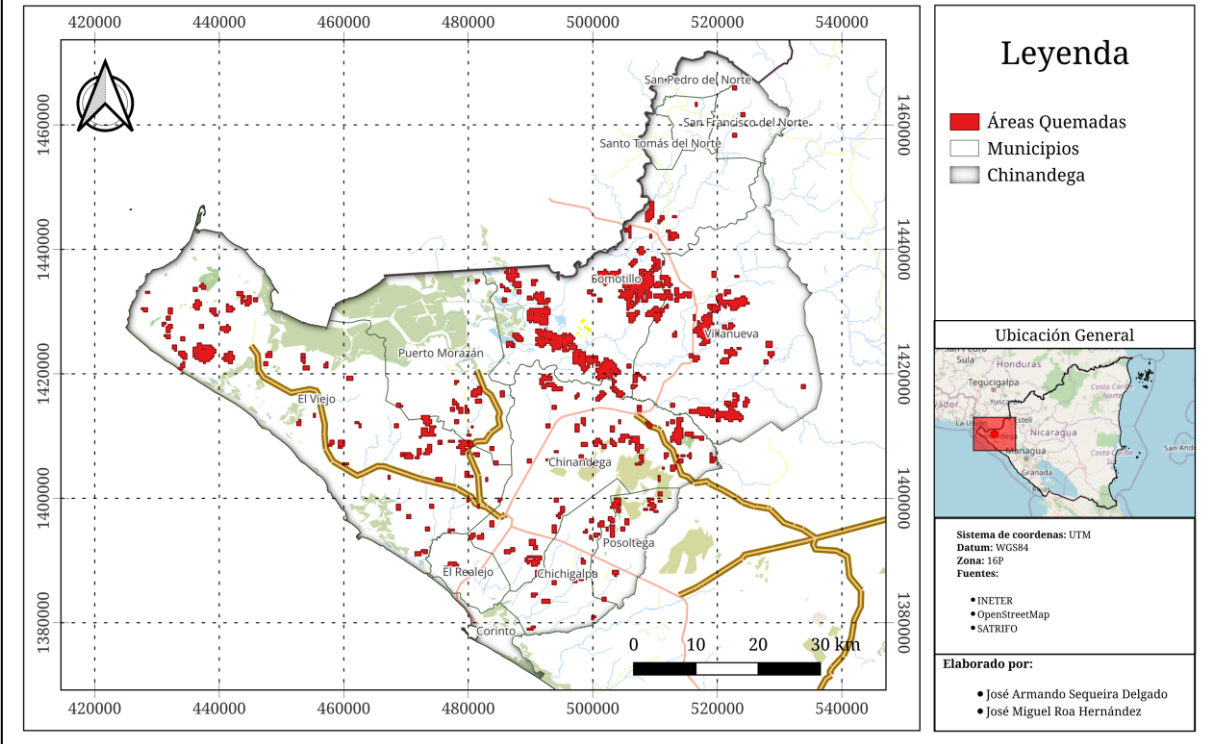
Anexo 6: Mapa de áreas quemadas enero 2022

## Mapa de Áreas Quemadas Febrero - 2022



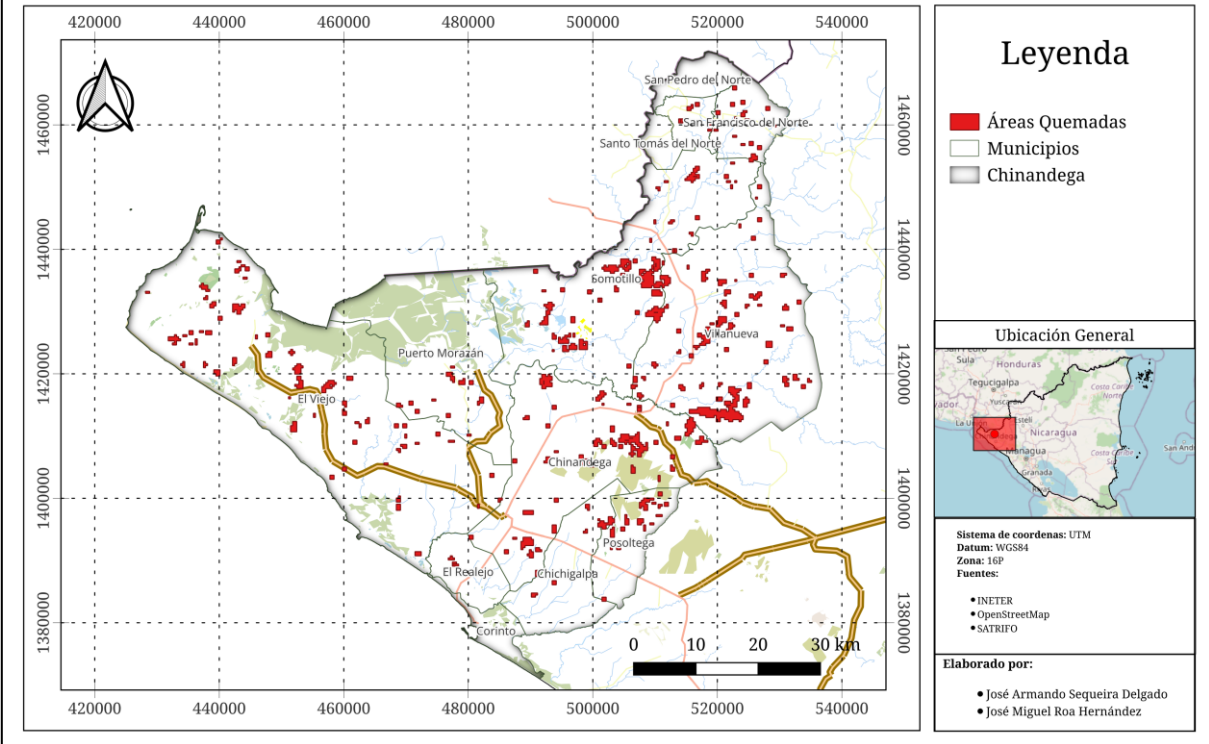
Anexo 7: Mapa de áreas quemadas febrero 2022

# Mapa de Áreas Quemadas Marzo - 2022



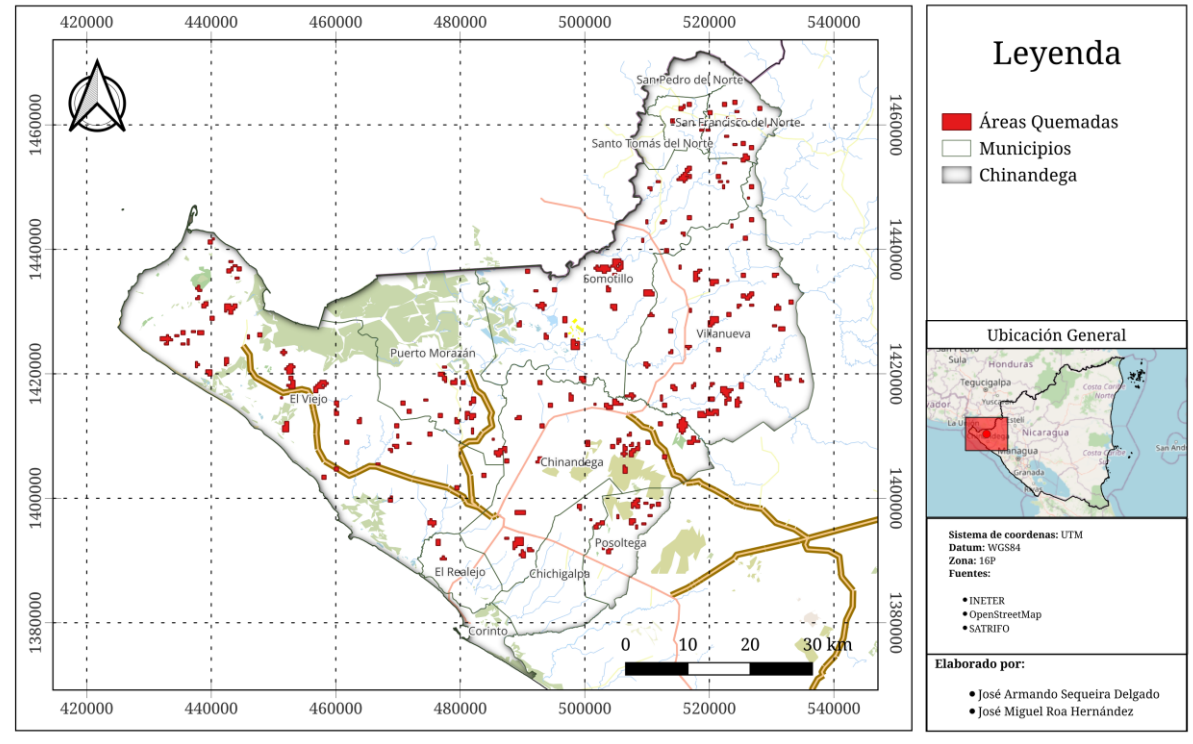
Anexo 8: Mapa de áreas quemadas marzo 2022

# Mapa de Áreas Quemadas Abril - 2022



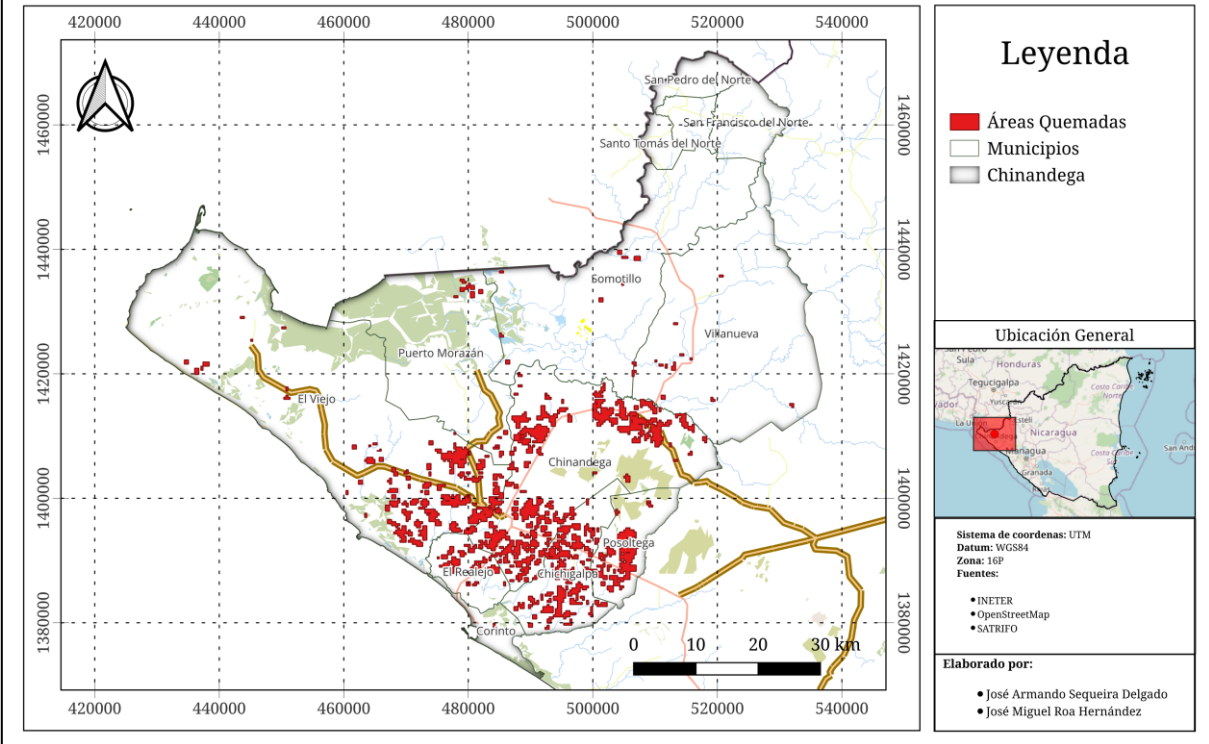
Anexo 9: Mapa de áreas quemadas abril 2022

# Mapa de Áreas Quemadas Mayo - 2022



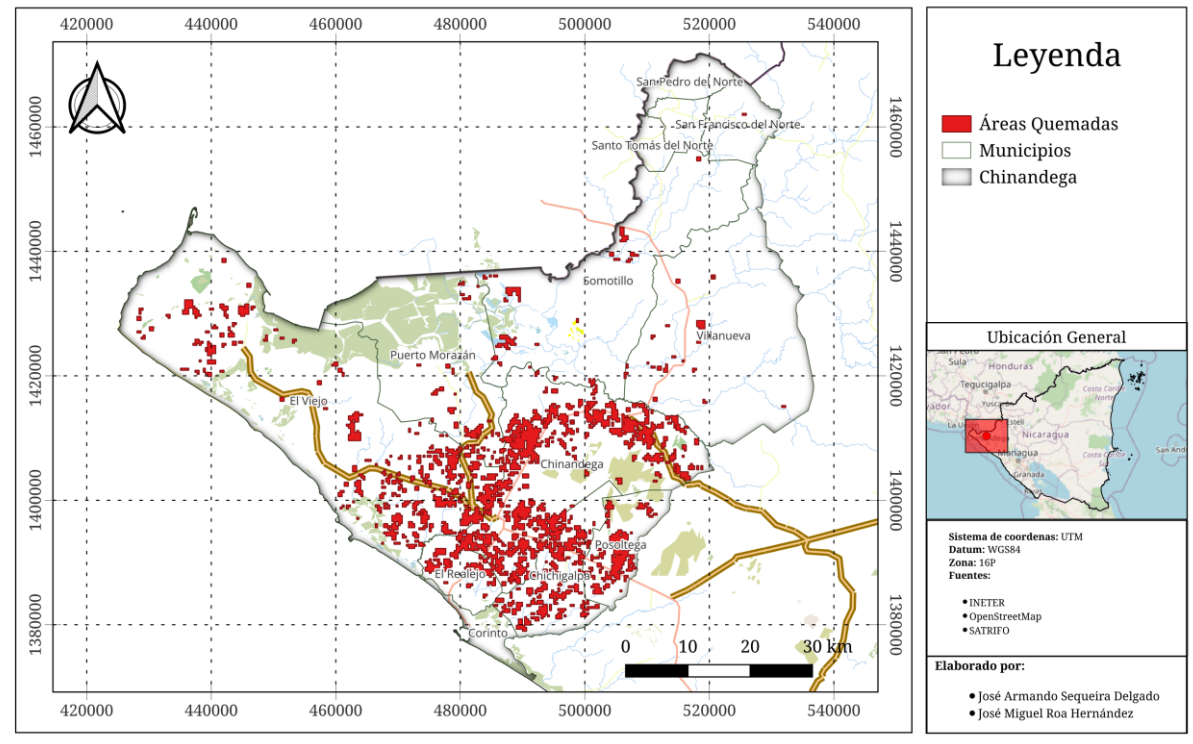
Anexo 10: Mapa de áreas quemadas mayo 2022

# Mapa de Áreas Quemadas Enero - 2023



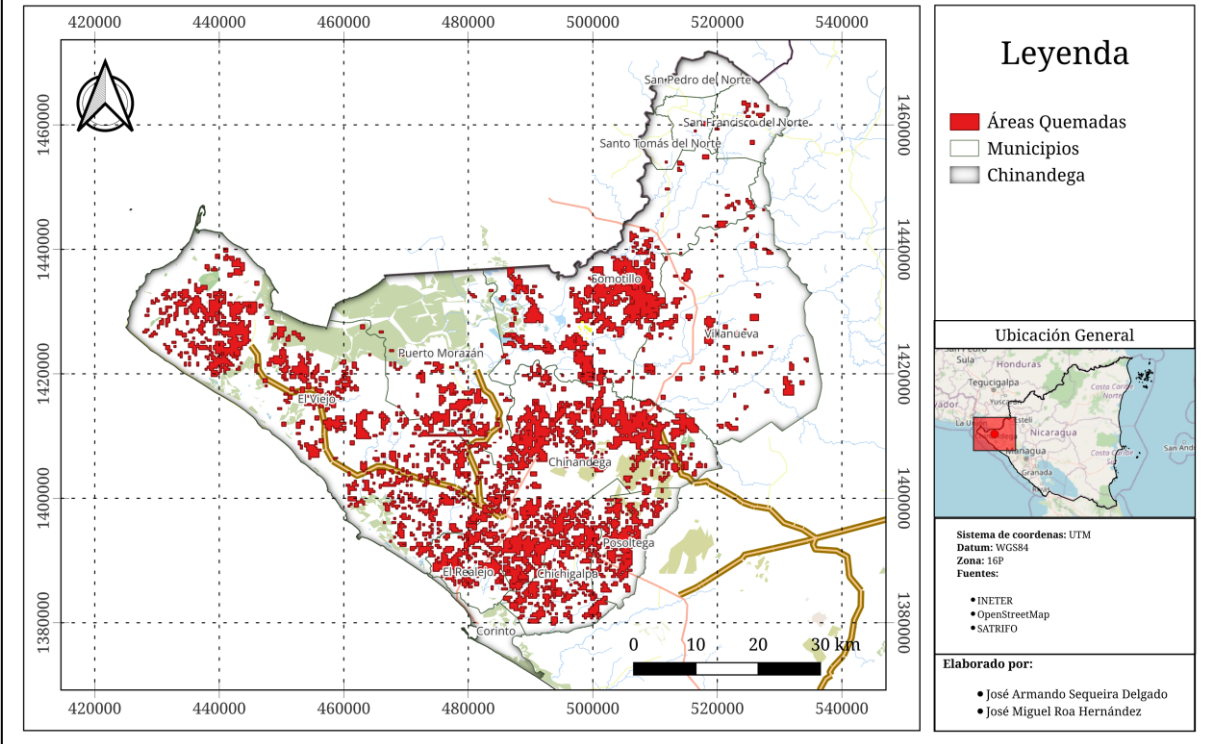
Anexo 11: Mapa de áreas quemadas enero 2023

# Mapa de Áreas Quemadas Febrero - 2023



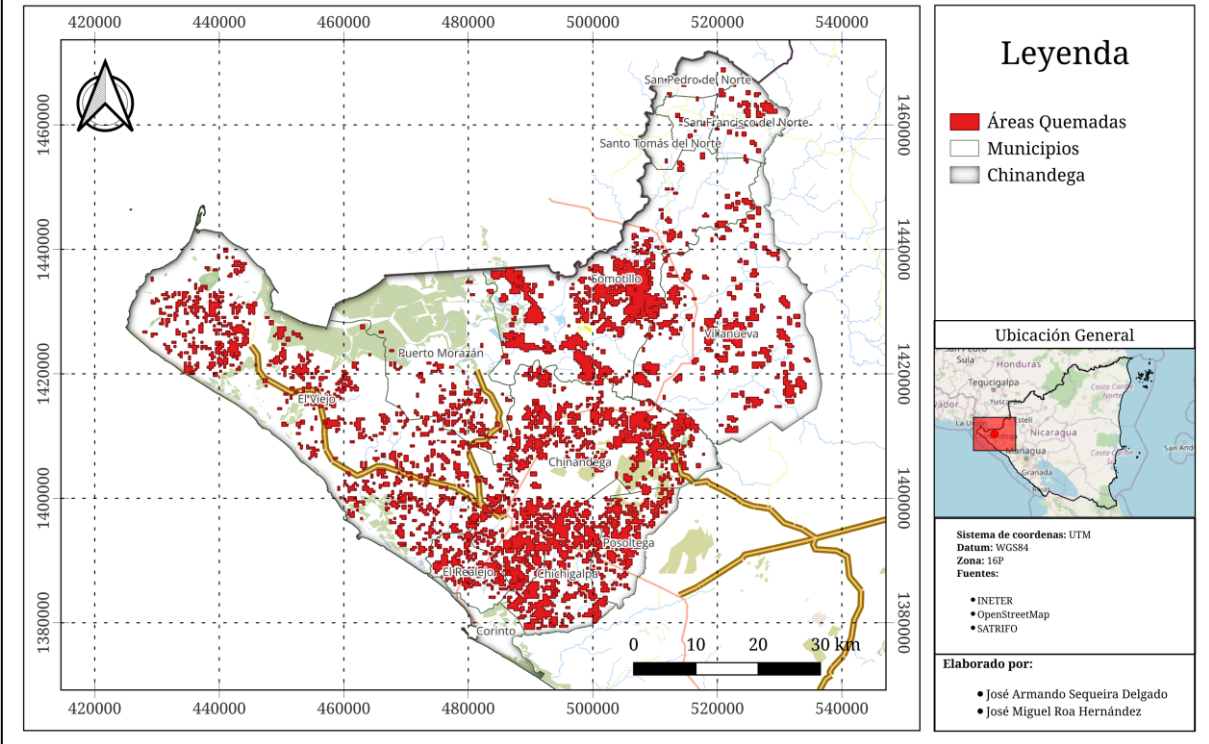
Anexo 12: Mapa de áreas quemadas febrero 2023

# Mapa de Áreas Quemadas Marzo - 2023



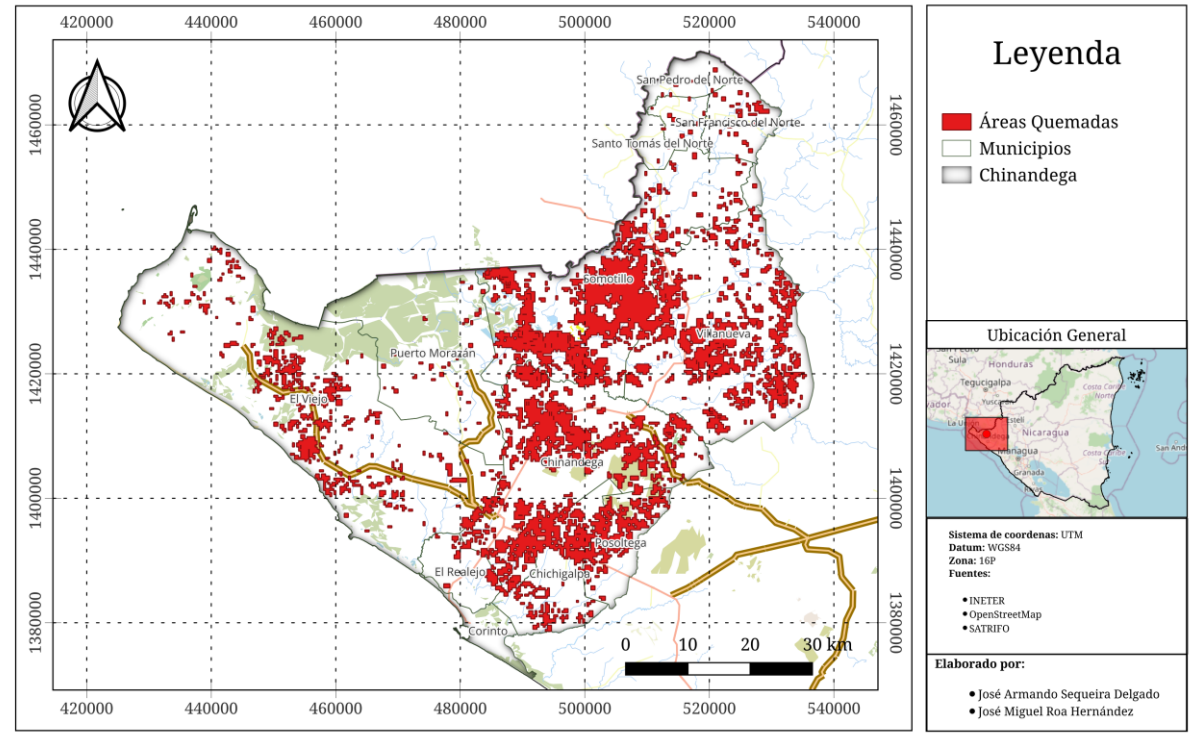
Anexo 13: Mapa de áreas quemadas marzo 2023

# Mapa de Áreas Quemadas Abril - 2023

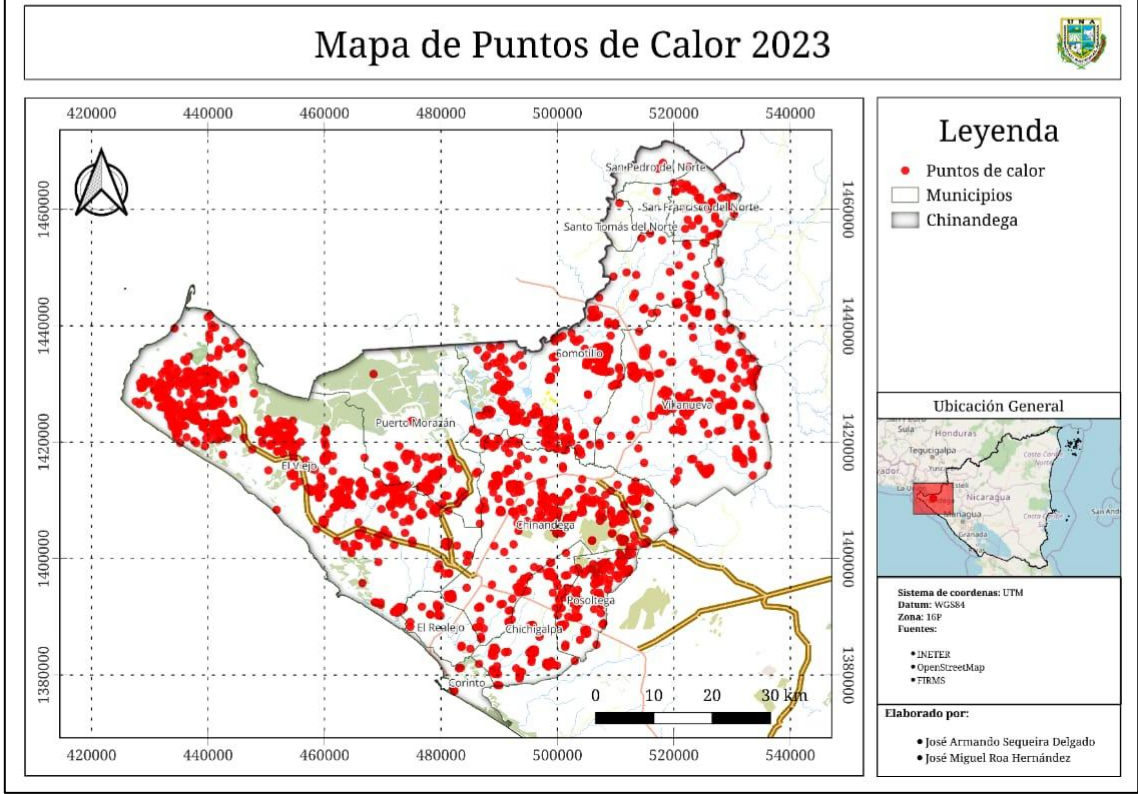
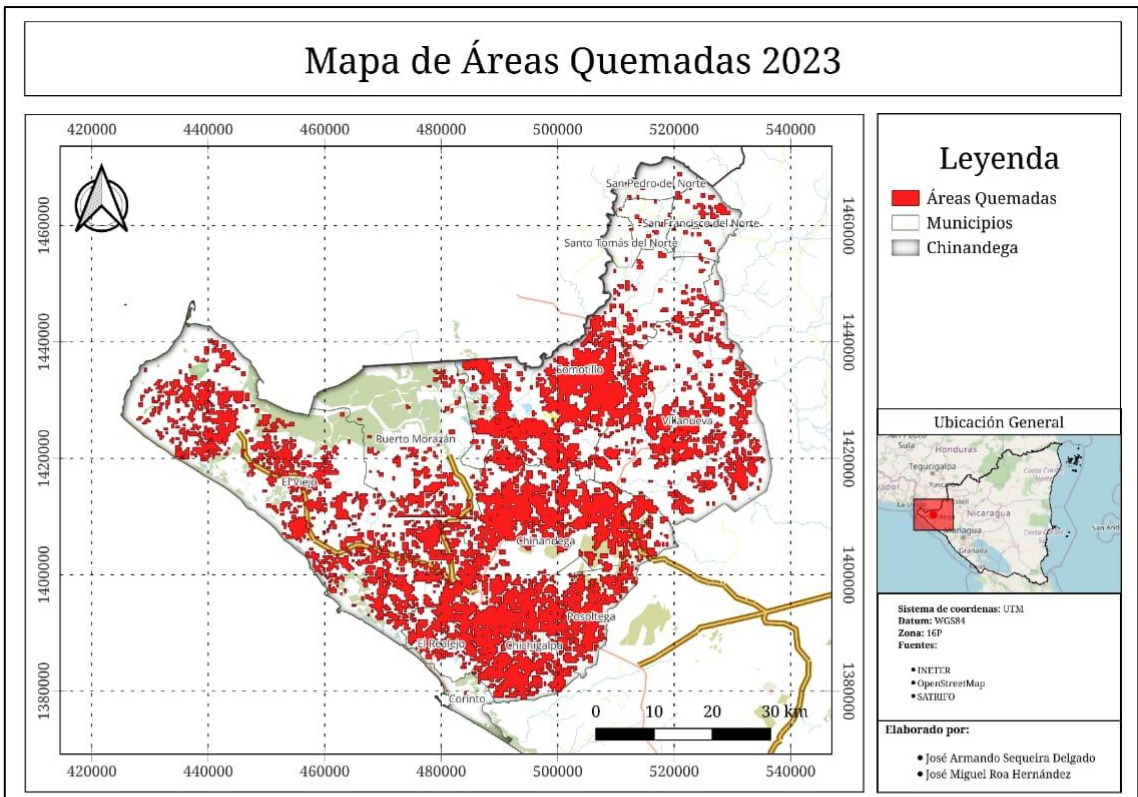


Anexo 14: Mapa de áreas quemadas abril 2023

# Mapa de Áreas Quemadas Mayo - 2023



Anexo 15: Mapa de áreas quemadas mayo 2023



**Anexo 16:** Mapas de validación de áreas quemadas con reportes de puntos de calor con el sensor MODIS 2023