

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE
DE DIOS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE**



TESIS

**“EVALUACIÓN DE LA SUPERFICIE DEFORESTADA POR EFECTO DE
LOS INCENDIOS FORESTALES DURANTE EL PERIODO 2011 – 2016 EN
EL DISTRITO LAS PIEDRAS – TAMBOPATA - MADRE DE DIOS”**

Tesis presentado por:

Bachiller: FERNÁNDEZ MENIS,
Ronny

**Para optar el título profesional de:
Ingeniero Forestal y Medio
Ambiente**

Asesor: Dr. Gabriel Alarcón Aguirre

Madre de Dios, PERÚ

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE
DE DIOS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE**



TESIS

**“EVALUACIÓN DE LA SUPERFICIE DEFORESTADA POR EFECTO DE
LOS INCENDIOS FORESTALES DURANTE EL PERIODO 2011 – 2016
EN EL DISTRITO LAS PIEDRAS – TAMBOPATA - MADRE DE DIOS”**

Tesis presentada por:

Bachiller: FERNÁNDEZ MENIS,
Ronny

**Para optar el título profesional de:
Ingeniero Forestal y Medio
Ambiente**

Asesor: Dr. Gabriel Alarcón Aguirre

Madre de Dios, PERÚ

2018

DEDICATORIA

La presente Tesis esta dedicada a ti, mi señor Dios Padre, por estar siempre conmigo, guiando mi camino con sabiduría y seguridad, darme fuerzas para superar los retos y problemas que se presentan en mi camino.

A mis Padres, Vicente Fernández Ortiz y Rosalia Menis de Fernández, por ser ejemplo de lucha constante ante cualquier obstáculo en la vida, a quien les debo toda mi vida, por haberme formado con buenos valores.

A mis hijos Xamira, Adriel, Miguel y Zese, ellos son la fuente de energía que me dan para seguir adelante y alegría en mi vida.

A mi esposa Danitza Yolanda, por tu tiempo y comprensión, preferistes sacrificar tu tiempo para que yo pudiera cumplir con el mio, gracias por estar siempre a mi lado.

A mis hermanas por su apoyo y buenos consejos, a mi tia Agencia Escalante, por su incansable dedicación cuando estudiaba en la escuela y colegio.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, que fue mi apoyo a seguir adelante en cada día para continuar en mi vida profesional.

Gracias a mi Universidad, por haberme permitido formarme profesional en ella, gracias a todos los docentes que fueron parte de mi formación académica y profesional.

Gracias a la Dra. Andrea Chavez Michaelsen por darme la oportunidad de crecer en mi carrera profesional, por sus sabios consejos y valores que fueron esencial en mi formación como profesional.

Gracias a todos mis compañeros que formaron parte en mi carrera profesional.

PRESENTACIÓN

El trabajo de investigación fue desarrollado como parte de la formación académica y de investigación como requisito para obtener el título profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente, así como el aporte en la evaluación de la superficie deforestada por efecto de los incendios forestales durante el periodo 2011 – 2016 en el distrito Las Piedras – Tambopata - Madre de Dios. La investigación cuantifica las superficies deforestadas por medio de cicatrices de quemas por incendios e identifica el comportamiento dinámico espacial a través de la teledetección para construir la serie de anomalías térmicas o focos de calor, para ello se utilizó el sensor MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) para los tres periodos (2011, 2013, y 2016). La validación se realizó aplicando el cociente normalizado de quemas (NBR) en imágenes LANDSAT (2011 Y 2013) y Sentinel 2A (2016).

La información obtenida servirá de base a los tres niveles de gobierno para orientar mejor los procesos de planificación del territorio, y por consiguiente brindar información lo más cercana posible de la dinámica de la pérdida de bosques y cambios de cobertura del suelo por incendios forestales.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|------------------------------------------------------|-----------|
| DEDICATORIA..... | i |
| AGRADECIMIENTOS | ii |
| PRESENTACIÓN | iii |
| RESUMEN | xi |
| ABSTRACT | xii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| | |
| CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN | |
| 1.1 Descripción del problema | 3 |
| 1.2 Formulación del problema | 5 |
| 1.2.1 General | 5 |
| 1.2.2 Específicos..... | 5 |
| 1.3 Objetivos del estudio | 6 |
| 1.3.1 Objetivo general | 6 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 6 |
| 1.4 Variables | 7 |
| 1.5 Operacionalización de variables | 7 |
| 1.6 Hipótesis..... | 8 |
| 1.7 Justificación | 9 |
| 1.8 Consideraciones éticas..... | 10 |
| | |
| CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO..... | 12 |
| 2.1 Antecedentes de estudio | 12 |
| 2.1.1 Alcance internacional..... | 12 |
| 2.1.2 Alcance nacional..... | 18 |
| 2.1.3 Alcance local..... | 19 |
| 2.2 Bases teóricas | 20 |
| Incendios forestales | 20 |
| Cómo se inicia un incendio forestal o silvestre..... | 20 |
| El comportamiento del incendio | 21 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Causas | 22 |
| Focos de calor | 22 |
| 2.2.3 Deforestación | 22 |
| 2.2.4 Bosque | 23 |
| 2.2.5 Principios y Fundamentos de Teledetección..... | 23 |
| 2.2.6 Espectro Electromagnético | 24 |
| 2.2.7 Aplicaciones de la imagen satelital | 25 |
| 2.2.8 Beneficios de la utilización de observaciones remotas | 26 |
| 2.2.9 Tratamiento Digital de Imágenes Satelitales Multitemporales..... | 27 |
| Corrección Geométrica | 28 |
| Rectificación imagen a imagen..... | 28 |
| Rectificación imagen a mapa | 28 |
| Calibración Radiométrica | 29 |
| Calibración absoluta | 29 |
| Calibración relativa | 29 |
| Mejoramiento Espectral..... | 30 |
| Clasificación Digital | 31 |
| Técnicas de Post-clasificación | 33 |
| 2.2.10 Programa Landsat | 33 |
| 2.2.11 SENTINEL | 35 |
| 2.2.12 Satélite MODIS | 36 |
| | |
| CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN..... | 38 |
| 3.1 Tipo de estudio | 38 |
| 3.2 Diseño de investigación | 38 |
| 3.3 Población | 38 |
| 3.4 Muestra..... | 38 |
| 3.4 Método y técnicas | 41 |
| 3.4.1 Lugar de estudio | 41 |
| 3.4.2 Clima e Hidrografía | 41 |
| 3.4.3 Método | 42 |
| 3.4.4 Técnicas de recopilación de datos | 44 |

| | | |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.5 | Análisis de focos de calor y clasificación supervisada de la imagen satelital | 48 |
| | Análisis de focos de calor | 48 |
| | Clasificación supervisada de la imagen satelital | 49 |
| 3.5 | Tratamientos de datos | 50 |
| 3.5.1 | Análisis estadístico | 52 |
| CAPÍTULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN..... | | 53 |
| 4.1 | Caracterización espacio temporal de los focos de calor..... | 53 |
| 4.2 | Superficie y dinámica-espacial de la deforestación a causa de los incendios forestales | 57 |
| 4.2.1 | Evaluación de precisión de clasificación | 62 |
| 4.3 | Nivel de acierto y correlación de la superficie deforestada a causa de incendios forestales y focos de calor | 63 |
| CONCLUSIONES..... | | 68 |
| SUGERENCIAS..... | | 70 |
| BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA..... | | 71 |
| ANEXOS..... | | 83 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabla 1. Variables e indicadores del estudio | 7 |
| Tabla 2. Información de adquisición de imágenes landsat | 42 |
| Tabla 3. Información de adquisición de imagen sentinel 2A | 43 |
| Tabla 4. Características de la imagen de satélite landsat 5 TM..... | 45 |
| Tabla 5. Características de la imagen de satélite landsat 8 OLI | 436 |
| Tabla 6. Características de las imágenes sentinel 2A | 47 |
| Tabla 7. Valoración del Coeficiente Kappa | 51 |
| Tabla 8. Precisión de resultados, imagen del año 2016 | 63 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1. Ubicación del área de estudio, distrito Las Piedras – provincia Tambopata – Madre de Dios. | 39 |
| Figura 2. Distribución de muestras para validar cicatrices de quemas, las Piedras, Tambopata – Madre de Dios. | 40 |
| Figura 3. Validación de cicatrices o áreas quemadas con imágenes PlanetScope de 3 m. (izquierda), y Wordlview (derecha) de 0.38 m. de resolución espacial. | 40 |
| Figura 4. Imagen de satélite Landsat 5 TM, composición de banda 5-4-3 (2011-07-09, 002-068, 002-069, 003-068)..... | 45 |
| Figura 5. Imagen de satélite landsat 8 OLI, composición de banda 6-5-4 (2013-07-9, 002-068, 002-069, 003-068)..... | 46 |
| Figura 6. Imagen de satélite Sentinel 2A, composición de banda swir 1, near infrared y red (2016-08-09-11)..... | 47 |
| Figura 7. Análisis multi-temporal de focos de calor en Madre de Dios..... | 53 |
| Figura 8. Autocorrelación espacial de focos de color del año 2011. | 55 |
| Figura 9. Autocorrelación espacial de focos de color del año 2013. | 56 |
| Figura 10. Autocorrelación espacial de focos de color del año 2016. | 56 |
| Figura 11. NBR y áreas quemadas de imágenes captadas de imágenes del satélite Landsat 5 TM, año 2011..... | 58 |
| Figura 12. NBR y áreas quemadas de imágenes captadas de imágenes del satélite Landsat 8 OLI, año 2013..... | 59 |
| Figura 13. NBR y áreas quemadas de imágenes captadas de imágenes del satélite Sentinel 2A, año 2016. | 60 |
| Figura 14. Dinámica de cambios de superficie de área quemadas en el distrito de Las Piedras, años 2011, 2013 y 2016. | 61 |
| Figura 15. Total de focos de calor analizados en la determinación de cicatrices o áreas quemadas; aciertos y no válidos..... | 64 |
| Figura 16. Correlación espacial del área deforestada por incendios y de focos de color del año 2011..... | 65 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 17. Correlación espacial del área deforestada por incendios y de focos de color del año 2013..... | 66 |
| Figura 18. Correlación espacial del área deforestada por incendios y de focos de color del año 2016..... | 66 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Anexo 1. Puntos de muestreo tomados en campo en el distrito de Las Piedras, Tambopata – Madre de Dios. | 84 |
| Anexo 2. Panel fotografico. | 90 |

RESUMEN

El presente estudio muestra la superficie deforestada por efecto de los incendios forestales durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios. Las líneas aéreas afectadas se localizaron mediante los focos de calor del satélite MODIS e imágenes de satélites de teledetección. Sensor de satélite Landsat 5 TM (Thematic Mapper) y 8 OLI (Operational Land Imager), para los años 2011 y 2013, con resolución de 30 m. Para el año 2016 se utilizó imágenes del satélite Sentinel 2, con resolución de 20 m. El reporte de los focos de calor, muestran una tendencia creciente, por lo que se puede presumir el incremento de las prácticas de roza y quema en las actividades agropecuarias. En cuanto a distribución espacial, presenta una distribución aleatorizada.

La cuantificación de áreas desforestadas por incendios se realizó utilizando el cociente normalizado de quema (NBR) adecuada a las imágenes Landsat y Sentinel, lo que permitió clasificar las cicatrices o áreas quemadas. La precisión de clasificación se validó con puntos de muestreo de campo e imágenes de alta resolución PlanetScope y WorldView a través de una tabulación cruzada. Los resultados fueron correctos, y reportan un 85,57% de precisión global y un coeficiente Kappa de 0,8101. El área afectada por los incendios en bosque primario, bosque secundario y pastizales en los años 2011, 2013, y 2016 fueron 2 535, 91 ha, 1 720,80 ha, y 7 081,74 ha respectivamente. A nivel de precisión, los focos de calor se tradujeron en cicatrices o áreas quemadas, reporta en el 2016, 66,74% de aciertos respecto a los años 2011 (36,50%) y 2013 (16,54%). Finalmente, el área deforestada a causa de los incendios forestales a partir de focos de calor determina una correlación positiva de considerable a muy fuerte, presentando un mejor comportamiento en el año 2016.

Palabras clave: Focos de calor, cicatriz de quema, deforestación, incendios forestales, cociente normalizado de quema.

ABSTRACT

The present study shows the area deforested by time in the 2011-2016 period in the Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios district. The overhead lines were located using the MODIS satellite heat sources and remote sensing satellite images. Satellite sensor Landsat 5 TM (thematic Mapper) and 8 OLI (Operational Land Imager), for the years 2011 and 2013, with a resolution of 30 m. Stop the year 2016 images of the Sentinel 2 satellite, with a resolution of 20 m. The report of heat sources, which shows a growing current, so it can be presumed the increase in slash and burn practices in agricultural activities. In terms of spatial distribution, it presents a randomized distribution. The quantification of areas deforested by fires was carried out using the normalized burn ratio (NBR) adequate to the Landsat and Sentinel images, which allowed scars or burned areas to be classified. The classification accuracy was validated with field sampling points and high-resolution images PlanetScope and WorldView through a cross tabulation. The results were correct, and they report 85,57% overall accuracy and a Kapp coefficient of 0.8101. The area affected by the fires in primary forest, secondary forest and pastures in the years 2011, 2013, and 2016 were 2 535. 91 ha, 1 720.80 ha, and 7 081.74 ha respectively. In terms of precision, the heat sources were translated into scars or burned areas, reports in 2016, 66,74% of correct answers with respect to the years 2011 (36,50%) and 2013 (16,54%). Finally, the area deforested with forest fires starting from heat sources determines a positive correlation from considerable to very strong, presenting a better behavior in 2016.

Key words: Heat sources, burning scar, deforestation, forest fires, normalized burning ratio.

INTRODUCCIÓN

El fuego es parte esencial de la dinámica de numerosos ecosistemas forestales. Su uso data de miles de años como medio de manejo de la tierra. Asimismo, es un elemento determinante en la modificación y salud de comunidades vegetales y determinados ecosistemas. Sin embargo, a fines del siglo XX, esta dinámica se ha visto relacionada con la actividad humana, y por consiguiente un motor de conversión de bosques y áreas con vegetación a otros usos, así como desequilibrios ecológicos que aceleran el cambio climático global (Ávila et al. 2014; de Dios et al. 2018).

En el Perú, la profusión de incendios para la apertura de campos de cultivo es alarmante, y presenta un escenario tendencial creciente. No podemos negar, que las quemas son parte de la cultura de los agricultores, por lo que siempre se han dado, sean estas áreas posesionadas o tituladas. Sin embargo, el problema radica en lo rutinario del procedimiento y la falta de seguridad, que muchas veces desencadena arrasando extensas áreas de bosque y/o vegetación existente (Gavilán y Catalina 2018; Quintana et al. 2018).

En Madre de Dios, esta realidad se concentra a lo largo de la vía interoceánica, con mayor intensidad en los distritos de Las Piedras, Tahuamanu, Iberia e Iñapari. En los últimos años, incrementada considerablemente por la fiebre del cultivo de la papaya (Manta y León 2004).

El uso de focos de calor es una herramienta que permite ubicar la presencia de fuego casi en tiempo real. Su uso gana interés, debido a que la mayor tasa de deforestación es producto de la apertura de bosques a causa de ganadería y agricultura, siendo la quema uno de los principales motores (Barcia et al. 2018).

La implementación de Alertas Tempranas de deforestación a través del monitoreo de tecnologías de teledetección es una herramienta valiosa en la evaluación de los incendios forestales y, por consiguiente, el cartografiado y cuantificación de las áreas quemadas. La disponibilidad de imágenes de mediana a alta resolución hace posible cada vez más, una mayor precisión en los resultados. En este contexto, el gobierno, a través del satélite Perú SAT, entra en la vanguardia en el monitoreo de fenómenos ambientales y antrópicos, en nuestro caso; áreas quemadas por incendios (Valencia y González 2017).

La investigación cuantifica las superficies deforestadas por medio de cicatrices de quemas por incendios e identifica el comportamiento dinámico espacial a través de la teledetección para construir la serie de anomalías térmicas o focos de calor, para ello se utilizó el sensor MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) en los años 2011, 2013, y 2016. Para la cuantificación se aplicó el cociente normalizado de quemas (NBR) en imágenes Landsat (2011 y 2013) y Sentinel 2A (2016).

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción del problema

El fuego ha sido utilizado por el hombre desde la prehistoria hasta en la actualidad para la agricultura y otros usos en todo el mundo. Se emplea para liberar terreno que destina a la agricultura, eliminar malas hierbas, fertilizar el suelo con las cenizas, ahuyentar especies animales, proporcionar pastos para la ganadería. Los incendios forestales tropicales son uno de los problemas ambientales más importantes del siglo 21. La Amazonia, el bosque tropical más grande, enfrenta un aumento en la frecuencia de los incendios durante la última década a consecuencia de la variabilidad del clima, las prolongadas temporadas de sequía (1998, 2005 y 2010) y las actividades humanas (Aragão y Shimabukuro 2010). Los incendios naturales por un lado y las quemaduras accidentales aún son extremadamente raros, y en la mayoría de los casos, estos incendios son de carácter intencional (Cochrane et al. 1999; Uhl y Kauffman 1990). Estos incendios intencionales pueden sobrepasarse a los bosques primarios o en estado natural circundante y es probable que tengan una contribución significativa en las emisiones globales de carbono del cambio de uso de la tierra.

Existe una relación directa entre el aumento de los incendios y un aumento en la frecuencia de las sequías en la Amazonia. Según estudios científicos se prevé un aumento en la frecuencia de las sequías en la selva del Amazonas para el siglo 21, el cual, junto a la deforestación y los incendios forestales podrían exacerbar al medio ambiente y a los medios de vida de los pobladores de la región (Orellana 2012). En la Amazonía y en el Perú, el fuego se usa ampliamente en la conversión inicial de extensas áreas de vegetación natural en campos de cultivo y zonas de pastos, y para el posterior mantenimiento de las áreas deforestadas (Cochrane y Laurance 2002; Giglio et al. 2006; Kodandapani et al. 2004). El fuego está altamente

asociado con las prácticas de gestión de la tierra dentro de un conjunto específico de actividades de uso de la tierra (Nepstad et al. 2006). Estas actividades de roce y quema son los resultados directos de factores socioeconómicos en donde los comuneros transforman el bosque a pastura o regeneran áreas pastizales o de cultivos utilizando el fuego. Los pequeños agricultores dejan áreas en regeneración entre menos de cinco hasta 50 años en la agricultura de rotación. Muchas veces tienden a transformarse de pequeña agricultura, agricultura perene, mecanizada, diversificada y pasto para ganado (Mendoza et al. 2007). Es así que el proceso de deforestación está casi siempre acompañado por el fuego intencionado. Pero aparte de los fuegos intencionales, muchas grandes áreas de bosques han sido quemadas sin intención y como consecuencia de las prácticas de usos de la tierra (por ejemplo una fuga de fuego) y eventos climáticos (Cochrane 2003).

La dinámica de fuego es más común en la Amazonia del este y sur en relación a Informes anteriores indican que los bosques amazónicos occidentales eran demasiado húmedos para ser susceptibles a los incendios forestales de gran escala como ocurridos en el 2005 y el 2010, además durante épocas de sequía, los densos bosques húmedos se hacen más susceptibles a los incendios forestales en comparación a los bosques más abiertos que durante años sin sequía.

Por otro lado, la construcción de la carretera interoceánica abre un corredor de acceso a la selva peruana, bosques tropicales especialmente conectando el Departamento de Madre de Dios con los principales mercados nacionales e internacionales. Esta carretera al mismo tiempo de traer beneficios para las poblaciones también generará impactos negativos indirectos, principalmente relacionados con el uso inadecuado de los recursos naturales por el incremento de actividades poco amigables con el medio ambiente (minería informal, agricultura migratoria y de monocultivo, ganadería, entre otras). El desarrollo de actividades agropecuarias es mayor en las márgenes de la vía interoceánica, pero también aumenta enormemente los riesgos de fuegos intencionales en el bosque natural. Los riesgos de sequías severas se asocian a la vez con un aumento de la población, al borde del eje de la

carretera interoceánica, una creciente zona deforestada, y una gran parte de pastizales muy inflamable en la estación seca. Sumada la escasez de agua, todos estos factores incrementan la vulnerabilidad a los incendios. Solo una política pública innovadora puede hacer frente a los aspectos de vulnerabilidad y el control de fuego para ofrecer alternativas para la agricultura y el pastoreo. En el Distrito las Piedras en los últimos años se ha venido incrementándose la agricultura mecanizada en los cultivos de papayas híbridos, haciendo que esta actividad ocasione invasiones de concesiones castañeras, predios agrícolas y áreas privadas por gente foránea migrantes de la selva central, realizando la tala de bosques primarios y secundarios para luego ser quemados y destocados para el cultivo de la papaya híbrida. Frente a este hecho la probabilidad de ocurrencia de incendios en el espacio y el tiempo puede ser estimada mediante técnicas de teledetección, ya que posibilitan el análisis del material combustible y la determinación del nivel de riesgo de incendio por medio de imágenes para determinar el comportamiento dinámico- espacial de la superficie deforestada a partir de cicatrices de quemaduras durante el periodo 2011-2016.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 General

¿Cuánto fue la superficie deforestada por efecto de los incendios forestales durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios?

1.2.2 Específicos

- ✓ ¿Cuál fue el comportamiento espacio temporal de los focos de calor (incendios) durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios?
- ✓ ¿Cuánto será la superficie deforestada a causa de los incendios forestales durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios?

- ✓ ¿Cuál fue el comportamiento dinámico espacial de la superficie deforestada a causa de los incendios forestales a partir de focos de calor durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios?
- ✓ ¿Cuál es la correlación existente entre superficie deforestada a causa de los incendios forestales a partir de focos durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la superficie deforestada por efecto de los incendios forestales durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios.

1.3.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar la caracterización espacio temporal de los focos de calor (incendios) durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios.
- ✓ Cuantificar la superficie deforestada a causa de los incendios forestales durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios.
- ✓ Determinar el comportamiento dinámico-espacial de la superficie deforestada a causa de los incendios forestales a partir de focos de calor durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios.
- ✓ Evaluar la correlación de la superficie deforestada a causa de los incendios forestales a partir de focos de calor durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios.

1.4 Variables

- ✓ **Variables independientes:** Comportamiento del objeto en función de la unidad mínima de la imagen (píxel).
- ✓ **Variables dependientes:** Cicatrices de quemas en los periodos 2011, 2013 y 2016.

1.5 Operacionalización de variables

Tabla 1. En la tabla 1 se muestra la operacionalización de variables

| Tema | Objetivos | Variables | Indicadores |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Superficie deforestada por efecto de los incendios forestales durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios. | ✓ Determinar la caracterización espacio temporal de los focos de calor (incendios) durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios. | Comportamiento espacio temporal de los focos de calor (incendios) durante el periodo 2011-2016. | Análisis multitemporal de focos de calor durante el periodo 2011-2016. |
| | ✓ Cuantificar la superficie deforestada a causa de los incendios forestales durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios. | Cuantificación de la superficie deforestada por incendios forestales durante el periodo 2011-2016. | Mapa de la superficie deforestadas por incendios forestales durante los periodos 2011, 2013 y 2016. |

| | | | |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | <p>✓ Determinar el comportamiento dinámico-espacial de la superficie deforestada a causa de los incendios forestales a partir de focos de calor durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios.</p> | <p>Comportamiento dinámico-espacial de la deforestación a causa de los incendios forestales a partir de focos de calor durante el periodo 2011-2016.</p> | <p>Serie temporal de focos de calor (incendios) durante los periodos 2011, 2013 y 2016.</p> |
| | | | <p>Superficie deforestada a causa de incendios forestales durante los periodos 2011, 2013 y 2016.</p> |
| | <p>✓ Evaluar la correlación de la superficie deforestada a causa de los incendios forestales a partir de focos de calor durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios.</p> | <p>Correlación entre superficie deforestada a causa de los incendios forestales a partir de focos de calor durante el periodo 2011-2016.</p> | <p>Nivel de correlación entre la superficie deforestada a causa de los incendios forestales a partir de focos de calor durante el periodo 2011-2016.</p> |

1.6 Hipótesis

- ✓ **Hipótesis nula (H_0):** La superficie deforestada a causa de los incendios forestales no presenta una alta correlación con los focos de calor durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios.

- ✓ **Hipótesis alterna (H_a):** La superficie deforestada a causa de los incendios forestales presenta una alta correlación con los focos de calor durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios.

1.7 Justificación

Los Impactos desfavorables que generan los incendios forestales en el ámbito económico, social y ambiental tanto a nivel local, regional, nacional y mundial son invaluable, lo cual ha generado costos adicionales para su reposición; de igual manera se ve afectada la regeneración natural (concesiones forestales) y los productos no maderables del bosque (concesiones de castaña, concesiones de shiringa, aguajales, etc.), y también en la parte del sector privado en rubros dedicados al turismo, empresas dedicados a la reforestación, asimismo la significativa alteración en el ciclo hidrológico que repercute de manera directa en los recursos hídricos por reducción de la infiltración, reducción de la humedad de los suelos, el incremento de la erosión eólica e hídrica. En el Perú, los incendios forestales queman pastizales, arbustos y especies arbóreas. Los primeros se recuperan totalmente en los primeros días de la temporada de lluvias, mientras que los arbustos tardan en hacerlo desde unas semanas hasta un par de años. En el caso de las zonas arboladas (aproximadamente del 10 al 30 por ciento de vegetación que se quema), tardan en recuperarse entre 15 y 50 años, según la especie y otros factores.

Pero un incendio forestal trae consigo más afectaciones de las que se perciben a simple vista, pues hay otros daños que son difíciles de cuantificar. Por ejemplo, las plantas y árboles quedan más desprotegidos ante las plagas y enfermedades, además de que se daña su capacidad de crecimiento. También se reducen los recursos genéticos y el valor recreativo de las zonas siniestradas, en tanto que los suelos modifican propiedades físicas, químicas y biológicas. En general se trata de una cadena de reacciones que contribuye de diferentes maneras al calentamiento

atmosférico. En términos económicos, la pérdida de productos forestales merma el potencial comercial. La evaluación de daños incluye las pérdidas materiales en productos y en servicios, es decir, los valores monetarios y no monetarios que proporcionan los bosques: madera afectada, costos de reforestación, costos de rehabilitación, incluidos suelos, ríos, etcétera; valores ecológicos, históricos, políticos, escénicos, y los costos del combate de incendios, que incluyen al personal, junto con los recursos materiales y financieros. Por otro lado, el hecho de modificar irresponsablemente los regímenes naturales del fuego, atrae consecuencias de dimensiones imprevisibles no sólo en la esfera local, sino también a escala regional y global, con daños a la Naturaleza que repercuten en la salud y en la seguridad de las personas.

Con la presente investigación se pretende la identificación de daños que ocasiona los incendios y es posible cuantificando las áreas afectadas o cicatrices de quema (post-incendio) y evaluando la respuesta de los ecosistemas sensibles al fuego (Rodríguez 2012). En el Perú no existe un sistema de monitoreo y de evaluación de superficies afectadas por incendios, la cual permita evaluar daños y la localización de sitios de mayor presión, o evidenciar patrones de conversión del bosque a través de incendios.

1.8 Consideraciones éticas

El sensoramiento remoto, teledetección o percepción remota es una tecnología fundamental para el análisis de información territorial, ya que permite realizar el seguimiento, cuantificación y variaciones de los cambios de uso de suelo. A pesar de la capacidad tecnológica de la teledetección para cumplirlas funciones mencionadas, existen inconvenientes que deben superarse para permitir un adecuado uso de la información brindada por imágenes de satélite. Para ello es importante la cooperación entre gestores y administradores; gobiernos, institutos, centros e instituciones académicas y de investigación implicadas en el protocolo, que permita definir estrategias, objetivos y metodologías. El reto es desarrollar tecnologías robustas y

operativas que aporten ética y por consiguiente transparencia y eficiencia en los resultados.

La investigación usó el método para generar información referencial de áreas quemadas a través del cociente normalizado de quema (NBR) que discrimina áreas quemadas, en nuestro caso Landsat (año 2011 y 2013) y Sentinel 2 (año 2016), y su relación con los focos de calor proporcionados por el sensor MODIS. Este análisis se basa en el contraste entre el infrarrojo cercano (ρ_{IRC} , 0,78–0,90 μm) que es sensible al contenido de agua en el suelo y la vegetación y el infrarrojo de onda corta (ρ_{SWIR} , 2,09–2,35 μm), que es sensible a la detección de vegetación muerta o no fotosintética, en un entorno post-incendio. Todos los aplicativos cuentan con licencia acreditada por el Centro de Teledetección para el estudio y gestión de los recursos naturales (CETEGERN) de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

En cuanto al riesgo, se garantizó la seguridad del tesista y colaboradores en todas las fases de la investigación.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de estudio

2.1.1 Alcance internacional

Alejandro y Di Bella (2018) estudiaron “los cambios de uso de suelo del Chaco seco argentino modificados por la inflamabilidad de las coberturas vegetales y en el patrón de distribución espacial de incendio, se utilizaron imágenes MODIS de área quemada y de focos de calor, como así también mapas de vegetación, bases de datos geoespaciales climáticas, poblacionales y productivas, los resultados muestran que en el periodo 2000 - 2011 estudiado, el Chaco seco argentino muestra claras diferencias de inflamabilidad entre la región árida y semiárida, a nivel general los resultados obtenidos mostraron que el bosque es la cobertura de menor inflamabilidad, se detectó que en la región árida la inflamabilidad del arbustal es similar a la del bosque y que en la región semiárida es igual a la del pastizal y el cultivo, en el bosque el nivel de biomasa no propició la ocurrencia de incendios y en el pastizal existen factores locales que ocultan la relación entre las precipitaciones y la ocurrencia de incendios, en cuanto a la importancia relativa de los factores que determinan la distribución espacial de incendios, se observó que la presencia de pastizal fue el factor más importante, a su vez, las actividades de desmonte para la agricultura y ganadería tendrían un efecto importante, también se detectó que el efecto de las condiciones climáticas sobre la ocurrencia de incendio estuvo determinado por el tipo de cobertura presente, en las zonas chaqueñas dominadas por cobertura de bosque la ocurrencia de incendios se incrementó con el déficit hídrico, mientras que en zonas con pastizal la ocurrencia de incendios fue máxima con niveles de déficit hídrico intermedio, además, los datos mostraron que la ganadería podría estar incrementando la inflamabilidad del bosque”.

Verhegghen et al. (2016), evaluaron “el potencial de los satélites Sentinel para la cartografía y vigilancia de zonas quemadas en los bosques de la cuenca del

Congo, para ello se utilizó el recientemente lanzado satélite óptico Sentinel-2 (S2) y el radar Sentinel-1 (S1) activo, soportado por datos de fuego activo del sensor MODIS, para detectar y vigilar los incendios forestales en la cuenca del Congo, en el contexto de un fenómeno muy fuerte de El Niño, se observó un brote sin precedentes de incendios durante los primeros meses de 2016 en formaciones forestales abiertas en el norte de la República del Congo, las anomalías de los incendios recientes y la situación meteorológica en comparación con los datos históricos muestran la gravedad de la sequía, las áreas quemadas trazadas por los sensores S1 SAR y S2 Multi Spectral Instrument (MSI) destacan que los incendios ocurrieron principalmente en los bosques de Marantaceae, que se caracterizan por la cubierta abierta de la copa de los árboles y una extensa capa herbácea alta, los mapas muestran que el origen de los incendios se correlaciona con la accesibilidad al bosque, lo que sugiere un origen antropogénico, el uso combinado de los dos sistemas satélites independientes y fundamentalmente diferentes de S2 y S1 capturó una extensión de 36 000 ha de áreas quemadas, con cada sensor compensando la debilidad (perturbaciones de la nube para S2 y sensibilidad a la humedad del suelo para S1)”.

Fuentes (2015), muestra “la cuantificación de áreas afectadas por incendios forestales e incendios en el departamento de Pando Amazonia de Bolivia, las áreas afectadas fueron localizadas mediante monitoreo con imágenes de satélite de sensores remotos, la validación de este análisis se realizó utilizando la razón de quemadura normalizada (NBR) adaptada a las imágenes Landsat 8, permitiendo clasificar las cicatrices de quemaduras, para estimar la precisión de la clasificación se validó con puntos de muestreo de campo y se realizó una tabulación cruzada, los resultados fueron 88% correctos, 9% error de omisión y error 3% comisión, la superficie total afectada por incendios en 2013 fue de 33 885 ha, lo que representa el 0,52% del área total del departamento de Pando, históricamente los incendios forestales más grandes ocurrieron en 2005 y 2010, cubriendo 259 432 ha de superficie y 108 093 ha, respectivamente”.

Chuvieco et al. (2012), realizan “una comparación entre perímetros de manchas quemadas, generados de imágenes multitemporales Landsat, y los

puntos de calor MODIS para cinco imágenes situadas en distintas zonas mediterráneas de España, Portugal y Chile central, la serie incluye varios años de estudio en cada imagen, de cara a analizar las tendencias temporales, la comparación entre las dos fuentes indica que los puntos de calor MODIS detectan la ocurrencia de grandes incendios (>500 ha) con alta confiabilidad (errores de omisión generalmente inferiores al 5%), pero son poco confiables para los pequeños (<50 ha), en los que se ha observado un error de omisión cercano al 80%, los errores de comisión (falsos positivos) se estiman en un 15%, y están asociados principalmente a suelos agrícolas que alcanzan altas temperaturas en verano, no se observa una relación muy clara entre el nivel de detectabilidad de incendios y las formas de los mismos, el nivel de confianza asignado por los diseñadores del producto MOD14 está altamente relacionado con el nivel de detección, si bien la categoría intermedia de fiabilidad también ofrece buenos resultados, para las zonas de estudio, se estima que cada punto de calor equivale a una superficie quemada promedio de 81 ha”.

Rodriguez (2012), reporta “la cuantificación de superficies afectadas por incendios y quemas que permitan evaluar daños, la localización de sitios de mayor presión e identificar patrones de conversión del bosque a través de teledetección, para construir las trayectorias de quemas históricas en Bolivia utilizó el producto de áreas quemadas MCD45A1 del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) con una resolución de 500 m para una serie de once años (2000-2010), la validación de este análisis se realizó aplicando el cociente normalizado de quemas (NBR) a imágenes Landsat TM con una resolución de 30 m, permitiendo clasificar las cicatrices de quema, se seleccionaron las regiones de la Amazonía y la Chiquitanía para estimar la exactitud en la detección, el monitoreo de áreas quemadas en Bolivia para la serie de once años mostró que se quemaron 22 012 910 ha en total, de las cuales el 20% (4 287 512 ha) corresponden a incendios forestales y la mayor parte de las superficies de quemas en pastos y sabanas, superando enormemente las estimaciones realizadas antes de este estudio, históricamente los mayores incendios forestales sucedieron en 2007 y 2010, abarcando superficies de 3 691 815 ha y 4 343 156 ha,

respectivamente, la exactitud global en la detección fue del 81%, y en cuanto a la exactitud de la magnitud de las áreas quemadas está entre 63% para la Chiquitanía y 57% para la Amazonía”.

Lima et al. (2012), muestra “los resultados sobre el uso de la tierra y los cambios en la cobertura de la tierra y la relación espacial entre el fuego y la deforestación en la Amazonia brasileña, y determina la evidencia de la asociación entre el uso del fuego y la deforestación en los procesos de uso de la tierra y cambio de cobertura de la tierra (LULCC) que ocurren en la región amazónica, pero no hay estudios sobre la estructuración espacial real y la asociación espacial entre estos eventos, se muestra entonces la cantidad de cicatrices ocurridas dentro de áreas desforestadas recientes (2002 - 2005) y antiguas (antes de 2002), y la estructura espacial de ambas variables, una prueba parcial de Mantel se usó para probar la correlación espacial entre cicatrices de quemaduras y áreas desforestadas, lo que explica la existencia de estructura espacial, los resultados muestran que existe una asociación espacial significativa entre la reciente deforestación y la ocurrencia de incendios, además, identificamos una gran cantidad de áreas quemadas (aproximadamente 55%) dentro de las áreas desforestadas más viejas, estos resultados ponen de relieve lo siguiente: 1) el papel directo del fuego en los procesos de uso de la tierra y cambio de cobertura terrestre en la Amazonia brasileña, y 2) que el fuego también afecta ampliamente a la vegetación previamente degradada, con implicaciones significativas para las estimaciones actuales de incendios forestales asociados a la emisión atmosférica de carbono en la región amazónica”.

Alencar et al. (2011), en su estudio “variabilidad temporal de los incendios forestales en la Amazonia oriental, a través de la teledetección para derivar una serie temporal de 23 años de cicatrices anuales de quemaduras en un bosque fragmentado del Amazonas oriental, el conjunto de datos de cicatriz de quemaduras se basó en una nueva rutina desarrollada para el Sistema de Análisis de Landsat de Carnegie (CLAS), llamado CLAS-BURN, para calcular un índice de cicatriz de quemaduras físicas (BSI) con una precisión global del 93% (coeficiente Kappa 0,84), este índice utiliza fracciones de cubierta

subpíxel de vegetación fotosintética, vegetación no fotosintética y miembros finales espectrales de cicatriz de sombra/quemadura, a partir de 23 imágenes Landsat consecutivas procesadas con el algoritmo CLAS-BURN, se cuantificaron las frecuencias de incendios, la variación en los intervalos de retorno al fuego y las tasas de conversión del bosque quemado a otros usos del suelo en un área de 32 400 km², de 1983 a 2007, el 15% del bosque se quemó; el 38% de estos bosques quemados fueron posteriormente deforestados, representando el 19% de la superficie despejada durante el período de observación, mientras que el 72% de los bosques afectados por el fuego sólo quemaron una vez durante el período de estudio de 23 años, el 20% quemó dos veces, el 6% quemó tres veces y el 2% quemó cuatro o más veces, con un máximo de siete veces, estas frecuencias sugieren que el intervalo de retorno de fuego actual es 5-11 veces más frecuente que el fuego natural del régimen estimado”.

Rodrigues y Borges (2011), identificaron y cuantificaron las “causas y frecuencia de incendios forestales, así como comparar el número de hotspots con brotes de incendios en el período comprendido entre los años 2004 y 2009 en el Parque Nacional Chapada Diamantina y su zona de amortiguamiento, los datos de los informes de incidentes de incendios fueron asociados con la información generada a partir de la interpretación de fotos y procesamiento de imágenes digitales del satélite Landsat-5, los resultados mostraron una deficiencia en el mecanismo de identidad de las causas de incendio, revelando que, aunque hubo una reducción en el número de brotes de incendios de 2004 a 2009 el área afectada aumentó, de los incendios cuyas causas son antropogénicas, el 64% es agrícola y el 36% está relacionado con la minería y la caza, esta investigación permitió establecer una conexión entre la aparición de incendios y el avance de la ocupación en el parque amortiguador, lo que ha llevado a la remoción de la vegetación natural por el fuego tanto como en la zona de amortiguación, cada vez más utilizada para actividades relacionadas con la agricultura mecanizada, como para el parque, afectando la biodiversidad de flora y fauna”.

Trinidad y Carvalho (2011), encontraron “una tendencia a la reducción de puntos calientes en el período de 1998 a 2009 en el estado de Mato Grosso, también se verificó durante este período que el Bioma que más mostraba puntos calientes era el Bioma de la Selva Amazónica, el Bioma del Pantanal fue el que menos mostró puntos calientes durante el período de 1998 a 2009, con el análisis de hotspots de los satélites NOAA-12 y NOAA-15 se observó que entre los años 1998 a 2004, la ciudad que más mostró puntos calientes fue la ciudad de Tapurah, para los años 2006 y 2008, el municipio fue Colniza que mostró más puntos calientes en el estado, en los años 2005, 2007 y 2009 la Nova Ubiratã fue la ciudad que más mostró puntos calientes”.

Ramos et al. (2011), reportaron en su estudio “Temporada de incendios forestales en Brasil en 2010: análisis de series de tiempo de 2005 a 2010 y las influencias de las precipitaciones y la deforestación en el número de puntos calientes, que los hotspots, son indicadores de incendios forestales, y tienen una alta correlación con la deforestación en término espacial, y también muestran una alta correlación con la cantidad de lluvia en términos de la cantidad total de los hotspots”.

Santos et al. (2011), cuantificaron e identificaron “los meses con mayor incidencia de hotspots durante los años 2007 a 2009 en la región media del extremo oeste de Bahía, el trabajo se desarrolló a partir del banco de datos del programa de monitoreo de incendios forestales del INPE, que emite revistas diarias de hotspots, en shapefile organizado en una única base de datos, para señalar el número total de hotspots por año seguido de identificación mensual y los municipios que presentan una mayor incidencia de manchas, así como correlacionar a los datos pluviométricos del Área Protegida Ambiental (APA) de Rio Preto, de esta manera, indicando pluviometría y la acción antropogénica como una de las posibles causas del aumento/reducción del número de hotspots, los datos demostraron que hubo una disminución en el número de hotspots en función de la elevación de pluviosidad y de hotspots en los años de menor pluviosidad, lo que demuestra una relación directa entre el número de hotspots y los datos climáticos”.

Aragão y Shimabukuro (2010), en su estudio “la incidencia del fuego en los bosques amazónicos con implicaciones para REDD, reportaron que la reducción de las emisiones de la deforestación y degradación (REDD) puede frenar las emisiones de carbono, pero las consecuencias para el riesgo de incendio son poco conocidas, al analizar la deforestación derivada de los satélites y los datos de incendios de la Amazonía brasileña, mostramos que la incidencia de incendios ha aumentado en el 59% de la zona que ha experimentado tasas de deforestación reducidas, las diferencias en las frecuencias de incendios a través de dos gradientes de uso de la tierra revelan que la gestión de tierras libres de incendios puede reducir sustancialmente la incidencia de incendios en un 69%, si en el mecanismo REDD no se adopta la gestión sostenible de las zonas deforestadas sin incendios, el ahorro de carbono logrado al evitar la deforestación puede ser parcialmente negado por el aumento de las emisiones de los incendios”.

Cochrane et al. (1999), reporto en su trabajo “retroalimentación positiva en la dinámica del fuego de los bosques tropicales cerrados del dosel, que la incidencia y la importancia del fuego en el Amazonas han aumentado sustancialmente durante el último decenio, pero los efectos de esta fuerza de perturbación siguen siendo mal entendidos, se estudió la dinámica del fuego forestal en dos regiones del Amazonas oriental, los incendios accidentales han afectado casi el 50 por ciento de los bosques remanentes y han causado más deforestación que el desminado intencional en los últimos años, los incendios forestales crean retroalimentación positiva en la susceptibilidad futura al fuego, la carga de combustible y la intensidad del fuego, a menos que se cambien las prácticas actuales de uso del suelo y uso de fuego, el fuego tiene el potencial de transformar grandes áreas de bosque tropical en matorrales o sabanas”.

2.1.2 Alcance nacional

Zamora (2016), desarrollo estudios de validación para medir “la eficacia de los focos de calor contrastándolos con las cicatrices del paso del fuego dejadas en la superficie del terreno, vistas desde una imagen satelital, previamente, se realizó un análisis histórico de los focos de calor en el Perú

(2000 – 2015) para determinar las zonas, los meses y los sensores de donde se tomarían los focos de calor para las validaciones, la primera validación se realizó con focos de calor MODIS, contrastándolos con imágenes de satelitales Rapid Eye del año 2011-2012, la segunda validación se realizó con los focos de calor VIIRS (NPP-750m y NPP-375m) y MODIS (Aqua y Terra), contrastándolos con imágenes satelitales Landsat del 2015, los resultados arrojaron un 93,2% de afectividad para los focos MODIS, 98,4% para los NPP-750m y 98,8% para los NPP-375m, el 48% de errores frecuentes se dieron en playas de ríos, el 38% en bosques y el 14% en zonas urbanas, otras observaciones indicaron que áreas de 0,5 ha fueron detectadas por los focos de calor de ambos sensores y que la probabilidad de detección de eventos aumenta cuando se usan los cuatro satélites en simultáneo, finalmente, se estableció un protocolo para los reportes el cual incluye un enmascaramiento de las zonas de error frecuente y presenta una metodología para reducir los focos de calor a eventos, de manera que se evite la repetición de alertas”.

2.1.3 Alcance local

Frisancho et al. (2013), determinaron “áreas impactadas por fuego de los años 2009 y 2010 en Iñapari localizada en el Distrito de Tahuamanu, Departamento de Madre de Dios, y cuantificar las áreas impactadas por fuego mediante focos de calor, para la obtención de áreas impactadas por fuego se utilizó imágenes Landsat-5, mediante el Índice de Quemadas Normalizadas (NVDR) y previo a ello el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) y Clasificación Supervisada. El NDVI indica que existe diferencia de áreas entre 2009 y 2010, a través de los resultados del NVDR se pudo observar que al año 2010 (1979,70 ha) presentó 206% de áreas afectas por el fuego más que año 2009 (579,03 ha), la técnica que obtuvo mayor cantidad de extensión de áreas con fuego fue la de NDVR, a razón de 82,63% más que NDVI y 40,18% más que la técnica supervisada, se identificaron 74 focos de calor para los sensores GOES y MODIS en el año 2009 y 133 focos de calor, para el año 2010”.

2.2 Bases teoricas

2.2.1 Incendios forestales

“El termino incendio forestal se refiere a un evento o desastre natural relacionado con la biosfera, e implica incendios fuera de control que queman la superficie vegetal ya sea que se trate del pastizal, la maleza, la tundra, el bosque o el matorral sin la intervención del humano, por lo que estos incendios también se pudieran referir con el termino de incendio silvestre para homologarse con el término inglés wildfire que se aplica a los incendios que son naturales sin la intervención humana, en el idioma inglés cuando los incendios forestales suceden en aéreas rurales se denominan burshfire, adicionalmente, en Australia a los mismos eventos se les conoce como bushfire. Visto de esa manera, los incendios silvestres (forestales y de pastizales) evocan una relación directa con otros fenómenos naturales, entre otros los relámpagos, de la misma manera, se hace hincapié en que el concepto de disturbio empleado en biogeografía y ecología, queda incluido en el concepto de desastre natural empleado por el autor (Rodríguez-Trejo 1996), de tal forma, el incendio es un disturbio del ecosistema”.

“Se sabe que muchos incendios forestales son causados intencionalmente bajo condiciones controladas, esa medida se hace con objetos silvícolas o para disminuir el riesgo de incendios sin control, de todas formas, se estima que la mayoría de los incendios forestales son causados por el hombre ya sea de forma directa o indirecta, solamente un 10% de los incendios forestales son naturales, causados por relámpagos y rayos” (Rodriguez 2000).

Cómo se inicia un incendio forestal o silvestre

“Un incendio forestal es un fuego devastador que se difunde rápidamente y queda fuera de control, los incendios forestales ocurren más frecuentemente durante los meses de verano que es cuando la maleza está seca y las llamas pueden moverse descontroladamente por toda el área forestal, el incendio con frecuencia se inicia sin ser percibido y se extiende rápidamente

quemando tanto la maleza como los árboles y las casas que estén en su paso, es común que los incendios forestales se inicien con una fogata de acampar que no fue apagada por completo, es decir a la que no se cubrió con suficiente agua como para extinguirla por completo; también puede iniciar un incendio forestal una colilla de cigarro, cenizas de una fogata, relámpagos y por causas humanas (incendios causados no naturales), un incendio forestal puede iniciarse lentamente al quemarse la maleza del piso del bosque y de esta manera afectar a los árboles del bosque, los incendios que inician de esa manera se desparraman rápidamente al alcanzar la copa de los árboles, de esta forma, el viento acelera el incendio al difundir las flamas de árbol en árbol, por lo general la primera indicación del incendio es un humo denso, se estima que más del 80% de los incendios forestales son causados por la descuido humano” (Quadri de la Torre 2000).

El comportamiento del incendio

“Está gobernado por la forma en la que el combustible (materia orgánica seca) se incendia, el desarrollo de la flama, y la manera en la que el fuego se desparrama, los factores que determinan el incendio forestal pueden considerarse bajo cuatro categorías (1) el tipo de material combustible, (2) la atmosfera, (3) la topografía, y (4) lo que quema el incendio, de esta forma se reconocen tres tipos fundamentales de incendios forestales, es decir un fuego incontrolado en un área arboleada” (Ellis et al. 2015).

- ✓ **El incendio de copa** ataca principalmente la parte alta de los árboles y arbustos, la copa.
- ✓ **El incendio de superficie** que ataca principalmente la hojarasca y el material suelto de la superficie del bosque, por lo que le fuego ataca primordialmente al material suelto acumulado en el piso.
- ✓ **El incendio del sustrato o suelo orgánico**, en donde se acumula el humus, en ocasiones este tipo de incendio no es visible en la superficie.

“El Sistema Nacional de los Estados Unidos para Medir la Peligrosidad del Incendio “National Fire Danger Rating System (NFDRS)” se estableció en los

Estados Unidos con la idea de capacitar a personal en el control de los incendios usando para el caso una designación numérica que facilita la labor de la planificación del control de fuego y la supresión de incendios específicos, es sistema usa tres índices: (1) el índice de ocurrencia, (2) el índice de quemazón, y (3) el índice de la carga del fuego, estos índices ayudan en el despacho de la toma de decisiones en el ataque del incendio”.

Causas

“Las causas naturales de los incendios forestales incluyen los relámpagos, las erupciones volcánicas, los meteoritos, y la combustión espontánea, las causas antropogénicas de los incendios forestales incluyen un sinnúmero de incidentes tales como la quemazón o sea el crimen deliberado y malicioso de iniciar el fuego, el lanzar colillas de cigarrillos, la quema de desechos de cultivos agrícolas, la deforestación por tala inapropiada, las fogatas mal apagadas y fuera de control por vientos inesperados, los incendios provocados para limpiar los terrenos para uso en la agricultura” (Gutiérrez-Hernández et al. 2015).

2.2.2 Focos de calor

“El término foco de calor se utiliza generalmente para definir un área que presenta una superficie anómala de temperatura y estos son considerados puntos potenciales de fuego” (Armenteras et al. 2009; Deppe et al. 2004; Di Bella et al. 2008).

“La detección de puntos calientes se realiza mediante el empleo de satélites que vienen incorporados con sensores cuyas lecturas están basadas en algoritmos desarrollados para la detección, los datos de focos de calor son básicamente puntos proyectados en coordenadas geográficas que indican el centro de un pixel, que es la unidad mínima de la pantalla del tamaño de la resolución espacial de la imagen” (Armenteras et al. 2009).

2.2.3 Deforestación

La FAO (2005) “define a la deforestación como la transformación del bosque en otros usos de la tierra o a la reducción de la cubierta de la copa por debajo del umbral mínimo de 10%, además, considera que la deforestación y la

quema son principales causantes de las emisiones de los GEI, donde predomina el CO₂, sin embargo, el proceso de descomposición orgánica genera también CH₄ (metano) gas que es 21 veces más nocivo que el CO₂ aunque es generado en bajas concentraciones” (FAO 2016).

La UNFCCC (2001) citado por Achard et al. (2007) define a la deforestación como “La conversión directa, inducida por el hombre de tierras forestales a tierras no forestales”.

2.2.4 Bosque

En el Protocolo de Kioto (Protocolo 17), a través de los acuerdos de Marrakech señala “que el bosque es la superficie mínima de tierras de 0,05 y 1,0 hectáreas, y cuenta con una cubierta coposa entre 10% y 30% y con árboles que pueden alcanzar una altura mínima in situ de 2 hasta 5 metros a su madurez” (UNFCCC 2001).

Pacheco et al. (2011), “definió que la superficie mínima de bosque 1 ha, altura mínima de cubierta 2 m y cobertura mínima de copa de 10%”.

“No existe una definición y clasificación única de los servicios, sin embargo, no existe duda de que los bosques cumplen una valiosa función reguladora clave en todos los procesos relacionadas con el suelo, agua, aire, clima, paisaje, ambiente y con la vida en general” (FAO 2016).

2.2.5 Principios y fundamentos de teledetección

“La Teledetección (*Remote Sensing*) se define como la ciencia y arte de obtención de información acerca de un objeto, área, o fenómeno a través del análisis de información adquirida por un dispositivo que no está en contacto el objeto, área, o fenómeno bajo investigación” (Lillesand y Kiefer 1994).

“Teledetección espacial es la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o por emisión propia” (Chuvienco y Salas 1996).

“Un sensor remoto se define como un instrumento especial cuya tecnología

permite la obtención de información de objetos sin estar físicamente en contacto con él, estos instrumentos se conocen en conjunto como Sensores Remotos incluyendo aparatos como la cámara fotográfica, sistemas scanners y de radar” (Avery y Berlin 1992). “En general los procesos y elementos involucrados en la teledetección electromagnética de los recursos terrestres se pueden separar en dos procesos básicos; la adquisición de información y el análisis de la información, los elementos del proceso de adquisición de información son; la fuente de energía, la propagación de la energía a través de la atmósfera, la interacción de la energía con las características de la superficie terrestre, la retransmisión de la energía a través de la atmósfera, el sensor del aeroplano o plataforma espacial, como resultado el sensor genera información en formato digital y/o gráfico, el proceso de análisis de los datos involucra la aplicación de varios medios de interpretación para compilarla en forma de tablas o como archivos computacionales que pueden ser unidos a un SIG, por último esta información es utilizada en la toma de decisiones de distintos usuarios” (Lillesand y Kiefer 1994).

“Cualquier sistema de teledetección consta de tres elementos fundamentales; el sensor, el objeto observado y un flujo energético que permita poner a ambos en relación, este flujo de energía puede proceder del objeto por reflexión de la luz solar, por algún tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor, de este modo se derivan las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión” (Padilla et al. 2015).

2.2.6 Espectro electromagnético

“El flujo de energía necesario entre el sensor y el objeto observado, en un sistema de teledetección, constituye una forma de radiación electromagnética” (Padilla et al. 2015).

“Esta energía electromagnética es una forma dinámica de energía que es causada por la oscilación o aceleración de una carga eléctrica, de este modo, todas las sustancias naturales o sintéticas continuamente producen o emiten un rango de energía electromagnética en proporción a su

temperatura” (Avery y Berlin 1992).

“Toda energía térmica puede ser transferida mediante tres procesos: convección, conducción y radiación, siendo esta última la base de la mayoría de los sistemas de teledetección” (Chuvienco y Salas 1996). “Así, la radiación es el método por el cual la energía puede ser transferida desde un cuerpo a otro en ausencia de algún material intermediario, si esta intervención se hace presente, debe ser lo suficientemente transparente de modo de que la energía sea transferida, la radiación es el único método por el cual la energía solar puede recorrer millones de kilómetros a través del espacio y alcanzar la tierra, este es el método de transferencia de energía con el cual se concibe un sensor remoto” (Avery y Berlin 1992; Padilla et al. 2015).

“Las propiedades de la radiación electromagnéticas han sido explicadas por dos teorías: la teoría ondulatoria que la concibe como un haz ondulatorio, y la teoría cuántica que considera la radiación electromagnética como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero, según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se trasmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas, uno eléctrico y otro magnético, descritos por la longitud de onda y su frecuencia, de este modo cualquier forma de energía radiante puede ser descrita en función de estos dos elementos” (Padilla et al. 2015).

“Las características espectrales que presentan las distintas superficies terrestres, que son motivo de investigación por distintas disciplinas, permiten reconocer ciertas bandas del espectro electromagnético que son las comúnmente utilizadas por las actuales aplicaciones de las técnicas de teledetección y que entregan las principales plataformas satelitales” (Padilla et al. 2015).

2.2.7 Aplicaciones de la imagen satelital

“Las imágenes de satélite han sido utilizadas por agencias gubernamentales, industriales, civiles, y comunidades educacionales en el mundo, estos datos han sido usados en apoyo a un amplio rango de aplicaciones en áreas como

el cambio global de los recursos, la agricultura, masas boscosas, geología, manejo de los recursos, geografía, cartografía, calidad del agua, y oceanografía, en este sentido se puede señalar la identificación y asociación de suelos y cartografía, el análisis de la cobertura y producción forrajera, clasificaciones regionales de uso de suelo y generación de foto-mapas, exploración minera y de petróleo, monitoreo de la polución, cartografía e interpretación geológica, mediciones de la magnitud de nieve, monitoreo del movimiento de glaciales, detección de la erosión de playas, detección del grado de estrés en asociaciones vegetales, clasificación de la cobertura vegetal, y monitoreo de incendios forestales, esto señala el alto potencial de la aplicación de esta información en el monitoreo de las condiciones de la superficie terrestre” (Coronado-Chacón 2001).

“Una de las utilidades más importante que entrega la información de las imágenes satelitales es la capacidad de monitorear los cambios de uso del suelo en el tiempo, ya que es posible la obtención de bases de datos digitales de cambio en donde las dimensiones espaciales y temporales de las coberturas de uso de suelo y cambio de uso de suelo pueden ser detectadas y evaluadas, en este sentido se destaca al *Landsat Multispectral Scanner (MSS)* que proporciona información de más de 20 años, de una moderada resolución espacial, que permite el monitoreo del tipo y porcentaje de cambio en la cobertura del suelo como efecto antrópico” (Aide et al. 2013).

“Los datos satelitales pueden ser útiles para concentrarse en las áreas en donde se requiere información, como primer paso, se monitorean grandes áreas en orden a detectar las áreas en donde ocurrieron los cambios, luego, los datos de alta resolución son utilizados para la revisión y actualización en áreas en donde los cambios detectados han sido significantes, los datos apropiados en el primer paso podrían ser, por ejemplo, imágenes de gran cobertura y resolución de 20-30 metros” (Aide et al. 2013).

2.2.8 Beneficios de la utilización de observaciones remotas

Algunos de los beneficios obtenidos al utilizar observaciones remotas son los siguientes (Chuvienco 2002):

- ✓ “Monitoreo de grandes extensiones en forma rápida, precisa, económica y homogénea”.
- ✓ “Es posible una rápida apreciación global de la situación, haciendo posible la medición del riesgo y el daño de la polución, enfermedades y ataques de incendios”.
- ✓ “Proporciona información de regiones remotas o áreas de difícil acceso”.
- ✓ “En áreas en donde la cobertura de nubes es persistente, los datos de radar proporcionan información consistente del recurso bosque”.
- ✓ “Incremento de la objetividad, velocidad de repetición y eficiencia en sus aplicaciones”.
- ✓ “Formato digital que permite la interpretación automática”.
- ✓ “Mediciones normalizadas y controladas tanto en el tiempo como en el espacio”.

2.2.9 Tratamiento digital de imágenes satelitales multitemporales

“Normalmente, antes de comenzar cualquier análisis sobre la información recogida desde un sensor remoto es necesario un tratamiento previo de los datos en cuestión, este proceso se conoce en la literatura como *Image Preprocessing* y está destinado a corregir los errores derivados del proceso de adquisición de la información y que puede degradar la calidad de los datos recogidos por el sensor” (Elijah y Jensen 1996).

“Cuando la detección de cambios se realiza comparando, píxel a píxel, los Niveles Digitales (ND) de las distintas imágenes es necesario eliminar previamente cualquier cambio en los ND de la escena que no sea debido a cambios reales en la cubierta, esto implica ajustar con precisión, tanto radiométrica, como geoméricamente, las imágenes que intervienen en el análisis” (Chuvieco 2002).

Corrección geométrica

“Usualmente la información obtenida de sensores remotos presenta errores geométricos de origen sistemático, aquellos que pueden ser corregidos utilizando la información desde la plataforma y conociendo la distorsión interna del sensor, y no sistemático, aquellos que no pueden ser corregidos con una precisión aceptable sin un número suficiente de puntos de control terrestre, entre las causas de errores geométricos de origen sistemático se puede mencionar la velocidad de la plataforma y la rotación de la tierra, por otro lado, las distorsiones de origen no sistemático incluyen los errores producto de la altitud y posición del sensor” (Elijah y Jensen 1996).

Rectificación imagen a imagen

“Es el proceso de traslación y rotación por medio del cual dos imágenes de igual geometría y de la misma zona geográfica son posicionadas una respecto de la otra de manera que los elementos correspondientes aparezcan en el mismo lugar en las imágenes corregidas” (Elijah y Jensen 1996). “Este tipo de corrección se utiliza cuando no es necesario tener asignado a cada píxel una única coordenada x, y en una proyección ortogonal, por ejemplo al comparar visualmente dos imágenes de distinta fecha para detectar los cambios producidos en la zona de interés” (Jensen et al. 1991).

Rectificación imagen a mapa

“Es el proceso por el cual la geometría de una imagen se hace planimétrica. Este es el proceso para aplicar si se requiere precisión en las mediciones de área, dirección y distancia, sin embargo, no todas las distorsiones causadas por la topografía de la imagen pueden ser removidas, este proceso normalmente utiliza puntos de control terrestre a través de los cuales realizar la rectificación, esta operación se realiza por medio de dos operaciones: (1) la interpolación espacial que establece la naturaleza de la transformación de las coordenadas geométricas para así ubicar los píxeles originales a su posición en la imagen rectificadas y (2) la intensidad de interpolación que es la aplicación de algún mecanismo a través del cual determinar el valor de

brillo asignado al píxel rectificado” (Chuvieco 2002; Chuvieco y Salas 1996; Jensen et al. 1991).

Calibración radiométrica

“Idealmente, el flujo de radiación recogido por un sensor remoto, en varias bandas, es una representación precisa del flujo de radiación de las características de la superficie terrestre, desafortunadamente esto no ocurre y pueden ingresar errores al sistema de colección de información de varias maneras, por ejemplo, errores radiométricos en los datos percibidos pueden ser introducidos por el mismo sensor remoto cuando los detectores individuales no funcionan apropiadamente o son inapropiadamente calibrados” (Chuvieco 2002; Elijah y Jensen 1996). “Por otro lado la intervención atmosférica entre el terreno de interés y el sensor remoto pueden contribuir con tanto ruido (error) que la energía recibida por el sensor no se parece a lo que fue reflejado o emitido por el terreno” (Elijah y Jensen 1996).

Calibración absoluta

“La radiación solar es selectivamente difundida y absorbida al entrar en contacto con la atmósfera terrestre, la energía emanada desde el cielo y recibida por el sensor es un indicador verdadero aun cuando se destruya nuestra habilidad para medir la reflectancia espectral de los patrones del terreno, de hecho, los científicos pueden considerar a la difusión y absorción atmosférica de la energía como el verdadero indicador y a la energía reflejada desde la tierra como el origen del ruido o error, no obstante, muchos de los analistas de la tierra consideran nocivo el efecto de la difusión y absorción atmosférica como fuente de error que puede minimizar la habilidad para extraer información útil del terreno desde datos obtenidos por sensores remotos” (Elijah y Jensen 1996; Salinero et al. 2006).

Calibración relativa

“La corrección radiométrica relativa puede ser utilizada para normalizar las intensidades entre las diferentes bandas dentro de una escena (por ejemplo, para remover la respuesta errónea del sensor, líneas abandonadas o

rayados) y, para normalizar las intensidades de las bandas de los datos de una de la imagen en una fecha y estandarizarla a la escena escogida en el análisis, la corrección radiométrica relativa generalmente no requiere reunir mediciones atmosféricas en el tiempo de adquisición de la información, que son muy difíciles de obtener cuando se utiliza información histórica de un sensor remoto” (Salinero et al. 2006).

Mejoramiento espectral

Ciertos estudios considerarán mejoramientos espectrales como aquellas técnicas que permitan mejorar la disposición de los datos satelitales para su análisis cuantitativo

Análisis de componentes principales (ACP)

Pla (1986), “señala que el análisis de componentes principales es un método que permite la estructuración de un conjunto de datos multivariados obtenidos de una población, cuya distribución de probabilidades no necesita ser conocida, siendo los objetivos más importantes de su aplicación los que se mencionan a continuación”:

1. “Generar nuevas variables que puedan expresar la información contenida en el conjunto original de datos”.
2. “Reducir la dimensionalidad del problema que se está estudiando, como paso previo para futuros análisis”.
3. “Eliminar, cuando sea posible, algunas de las variables originales si ellas aportan poca información”.

El Análisis de Principales Componentes (ACP) “es una transformación de los datos crudos del sensor remoto que entrega como resultado nuevas imágenes de componentes principales que son más interpretables que los datos originales” (Singh y Harrison 1985). “El ACP puede también ser utilizado para comprimir la información contenida en las de bandas de una imagen satelital en dos o tres imágenes transformadas de principales componentes, esta habilidad para reducir desde “n” a dos o tres bandas es una importante consideración económica, especialmente si el potencial de información recuperable desde los datos transformados es tan bueno como

los datos originales del sensor” (Elijah y Jensen 1996).

Índices

“Es una alternativa para la medición de la vegetación y su estado sanitario basado en el análisis de la información espectral de los sensores remotos” (Goel y Norman 1992).

“Existen varios algoritmos utilizados para la extracción de información desde sensores remotos que en conjunto reciben el nombre de Índices de Vegetación, la mayoría de los índices de vegetación se basan en la significativa diferencia de las características de la reflexión espectral entre la vegetación verde saludable, la vegetación muerta o senescente, los suelos secos y desnudos, es así como la vegetación verde saludable, en la región del infrarrojo cercano del espectro, refleja una mayor cantidad de energía que la vegetación senescente o que los suelos secos y desnudos, presentado un comportamiento inverso en la región visible del espectro” (Goel y Norman 1992).

“Para la determinación de áreas quemadas, el cociente normalizado de quema (NBR) presenta un comportamiento aceptable, este análisis se basa en el contraste entre el infrarrojo cercano (ρ_{IRC} , 0,78–0,90 μm) que es sensible al contenido de agua en el suelo y la vegetación y el infrarrojo de onda corta (ρ_{SWIR} , 2,09–2,35 μm), que es sensible a la detección de vegetación muerta o no fotosintética, en un entorno post-incendio” (Jia et al. 2006; Kokaly et al. 2007)

Clasificación digital

“Es el proceso mediante el cual los píxeles de una imagen satelital multibanda son etiquetados según la categoría a la que pertenecen, a partir de esta imagen puede generarse una cartografía temática y el inventario estadístico de la superficie involucrada en cada categoría” (Chuvienco y Salas 1996; Pla 1986).

“La clasificación digital distingue las siguientes fases: 1) definición digital de las categorías (fase de entrenamiento), 2) agrupación de los píxeles en una

de esas categorías (fase de asignación), y 3) comprobación y verificación de resultados” (Chuvienco y Salas 1996).

Fase de entrenamiento.

“La clasificación digital comienza con la definición de las categorías que se pretenden distinguir en la imagen, se trata de una clasificación basada en los valores numéricos, por lo tanto, se trata de obtener el rango de ND que identifica a cada categoría para todas las bandas que intervienen en la clasificación, las distintas categorías no se definen solo por un ND sino por un conjunto de ND próximos entre sí, existe una cierta dispersión en torno al ND medio de cada categoría, por esto la fase de entrenamiento trata de definir con rigor cada una de las categorías que se pretenden distinguir teniendo en cuenta su dispersión en la zona de estudio” (Chuvienco y Salas 1996). “Entre los métodos tenemos: 1) Método supervisado, este método de entrenamiento requiere un cierto conocimiento de la zona de estudio que permite delimitar sobre la imagen unas zonas o áreas representativas de las distintas categorías que se pretenden discriminar, estas áreas se conocen como training fields (áreas de entrenamiento) ya que sirven para entrenar al ordenador para que pueda reconocer las distintas categorías, a partir de estas áreas el ordenador calcula diversos parámetros estadísticos de los ND que definen cada clase, para luego clasificar el resto de los píxeles en una categoría determinada atendiendo a sus ND, resulta adecuado seleccionar varias áreas de entrenamiento por clase para reflejar correctamente su variabilidad en la zona de estudio, 2) Método no supervisado, este método de clasificación trata de definir las clases espectrales presentes en la Imagen, no implica ningún conocimiento previo del área de estudio por lo que la intervención humana se centra en la interpretación de los resultados, este método asume que los ND de la imagen se agrupan en una serie de conglomerados (o clúster) que se corresponden con grupos de píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y que, por ello, deberían definir unas clases

informativas de interés, por desgracia estas clases espectrales no pueden ser asimiladas siempre a las categorías temáticas que el usuario pretende deducir por lo que es labor de éste interpretar el significado temático de dichas categorías espectrales”.

Fase de asignación

“En esta etapa se evalúa los principales algoritmos de clasificación, desde un punto de vista estadístico, todos los algoritmos definen un área de dominio de cada clase en torno a su centro mediante un conjunto de funciones, un determinado píxel será asignado a una clase si sus ND se encuentran dentro de los límites establecidos para dicha clase” (Chuvieco y Salas 1996; Elijah y Jensen 1996).

Técnicas de post-clasificación

“La efectividad de esta alternativa depende de cómo se diferencian espectralmente las categorías clasificadas, en ocasiones esta clasificación puede ser complicada, y si se utilizan todas las bandas de cada fecha, se puede tener información redundante” (Means et al. 1999) (West Virginia University. 1999).

“La Post-clasificación es el método cuantitativo de detección más comúnmente utilizado, requiere de la rectificación y clasificación de cada imagen, para luego ser comparados píxel a píxel a través de una matriz, desafortunadamente, los errores en la clasificación individual de cada imagen se ven reflejados clasificación final” (Argany y Saradjian ; Yagoub et al. 2015). “Por ello es necesario que la clasificación individual de las imágenes sea lo más exacto como sea posible” (Müller y Brandl 2009).

2.2.10 Programa Landsat

“Antes de 1972, la idea de utilizar datos de satélite para la vigilancia terrestre, la cartografía o la exploración era un concepto visionario, hecho que da origen al Programa Landsat, el cual se constituye en una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), el programa Landsat ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro

planeta, esta serie de datos, que se inició en 1972, es la más larga de la historia y continúa registrando los cambios en la superficie terrestre desde el espacio, Landsat ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada; de manera general cada píxel en su imagen tiene un tamaño con el que se podría cubrir un campo de béisbol, en la actualidad el programa se encuentra en su octava versión denominada: Landsat Data Continuity Mission (LDCM) es el octavo satélite de observación de la serie Landsat y continuará el legado de archivo de los anteriores satélites, convirtiéndose de esta manera en el futuro de los satélites de observación de la tierra de mediana resolución con más historia, este programa amplía, mejora y avanza en el registro de imágenes multispectrales, manteniendo la misma calidad de sus siete predecesores, tras el lanzamiento, el satélite LDCM será rebautizado como Landsat 8, este sistema está compuesto de dos grandes segmentos”:

- ✓ “El observatorio; el cual consta de una plataforma con capacidad de carga de dos de sensores de observación terrestre, el primero de ellos denominado Operational Land Imager (OLI) y el sensor térmico infrarrojo Thermal Infrared Sensor (TIRS), OLI y TIRS recogerán los datos de forma conjunta para proporcionar imágenes coincidentes de la superficie terrestre, incluyendo las regiones costeras, hielo polar, las islas y las zonas continentales, el OLI es un instrumento construido por la empresa Ball Aerospace y Technologies Corporation en Boulder, Colorado y el TIRS es un instrumento que fue construido por la NASA en el centro de vuelo espacial Goddard en Greenbelt, Md, además, el LDCM seguirá la misma secuencia de trayectoria (también conocida como “paths” o rutas de acceso) como sus antecesores Landsat 4, Landsat 5 y Landsat 7, esto permitirá que todos los datos del LDCM son referenciados al mismo sistema de coordenadas, continuando con el registro de datos desde hace décadas, el satélite almacena los datos del sensor OLI y TIRS en una grabadora de estado sólido incluida a bordo y transmite los datos a estaciones receptoras terrestres”.

- ✓ “El segundo segmento es el sistema terrestre, el cual proporciona la capacidad necesaria para la planificación y programación de las operaciones del LDCM y todas aquellas necesarias para administrar y distribuir los datos”.

“La plataforma LDCM, fue construida por la empresa Orbital Sciences Corporation en Gilbert, Arizona, tiene una vida útil de 5 años, pero lleva suficiente combustible para 10 años de operaciones, la nave orbitará de norte a al sur durante el día, cruzando el ecuador a las 10 am, hora local, con una órbita aproximada de unas 438 millas (705 kilómetros) por encima de la Tierra” (Ariza 2013).

“El satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS), las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares a el sensor Landsat 7 ETM +, proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus, adicionalmente una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado, esto proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve, por otra parte el sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+” (Ariza 2013).

2.2.11 Sentinel

“La misión de toma de imágenes Sentinel-2 se basa en una constelación de dos satélites idénticos: Sentinel-2A, lanzado en junio de 2015, y Sentinel-2B, aunque lanzados por separado, ambos satélites se encuentran en la misma órbita, con una separación de 180°, cada cinco días, entre los dos satélites quedará cubierta toda la superficie terrestre, las mayores islas y las aguas costeras y continentales entre las latitudes 84° S y 84° N, optimizando así la cobertura global y la provisión de datos, cada satélite Sentinel-2 transporta

una innovadora cámara multiespectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie emergida y la vegetación, la combinación de la alta resolución y las nuevas capacidades espectrales, así como un campo de visión que abarca 290 km de ancho y sobrevuelos frecuentes, proporcionará vistas de la Tierra sin precedentes, la información de esta misión va a contribuir a mejorar las prácticas agrícolas, vigilar los bosques del planeta, detectar la contaminación en lagos y aguas litorales, y elaborar mapas de desastres, las seis familias de satélites Sentinel conformarán el núcleo de la red de vigilancia medioambiental Copernicus de la Unión Europea, esta iniciativa emblemática de la UE ofrece información operacional de las superficies emergidas, los océanos y la atmósfera de nuestro Planeta para facilitar la adopción de políticas medioambientales y de seguridad, y para responder a las necesidades de ciudadanos y proveedores de servicios, cada misión Sentinel está formada por una constelación de dos satélites, lo que permite cumplir los requisitos de cobertura y frecuencia de observación y ofrecer un conjunto de datos para los servicios del programa Copérnico, estas misiones transportan las tecnologías más avanzadas para la observación de la Tierra, como los instrumentos radar o multiespectrales que permitirán monitorizar cualquier cambio en el terreno, en los océanos o en la atmósfera” (Olcoz 2016).

2.2.12 Satélite modis

“El sensor, llamado MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) viaja a bordo del satélite Terra de la NASA, y "ve" las radiaciones infrarrojas emitidas por los incendios allá abajo, en la superficie del planeta, la información del MODIS puede ser transformada rápidamente en Mapas Activos de Incendios, que muestran donde están activos los incendios de bosques y hacia donde se mueven la información muy apreciada por los estrategas de la lucha contra el fuego, Los Mapas Activos de Incendios ofrecen la posibilidad de comprender el gran escenario cuando se trata de tomar decisiones para distribuir los recursos, los mapas pueden, además, ayudar a que el público comprenda donde están los incendios” (Tonatto et al. 2008).

“Terra-MODIS y Aqua-MODIS cubren la superficie de la tierra cada 1 a 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales, estos datos nos ayudan a comprender la dinámica global de la Tierra; el comportamiento en la superficie terrestre, en los océanos y en la atmósfera, MODIS está desempeñando un papel vital en el desarrollo de modelos validados y globales capaces de predecir el cambio global que está sufriendo el planeta Tierra y así tomar decisiones sanas referentes a la protección de nuestro ambiente” (Chuvieco et al. 2002).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo de estudio

“La investigación es de tipo descriptiva y correlacional, ya que se tratara de ver la cuantificación de área deforestada por cicatrices de quemas por incendios, así como la correlación entre incendios forestales y la superficie deforestada a partir de focos de calor” (Baray 2006; Castro 2003; Cazau 2006; Hernández et al. 2010).

3.2 Diseño de investigación

“En cuanto al diseño la investigación es Transaccional o transversal ya que se analiza las áreas deforestadas y describe las variables en periodos determinados (2011, 2013 y 2016)” (Baray 2006; Castro 2003; Cazau 2006; Hernández et al. 2010).

3.3 Población

El área de estudio comprende el distrito de Las Piedras, su capital es la localidad de Planchón, y cuenta con una superficie de 760 560,15 ha (7 605,60 km²), (Figura 1).

3.4 Muestra

“Para determinar el número de muestras a coleccionar en campo se utilizó la distribución binomial de probabilidad” (Anaya y Chuvieco 2010; Chuvieco y Hantson 2010), calculándose el tamaño de muestra mediante la fórmula (1):

$$n = \frac{Z^2 p(qN)}{(N-1)E^2 + Z^2 + pq} \quad (1)$$

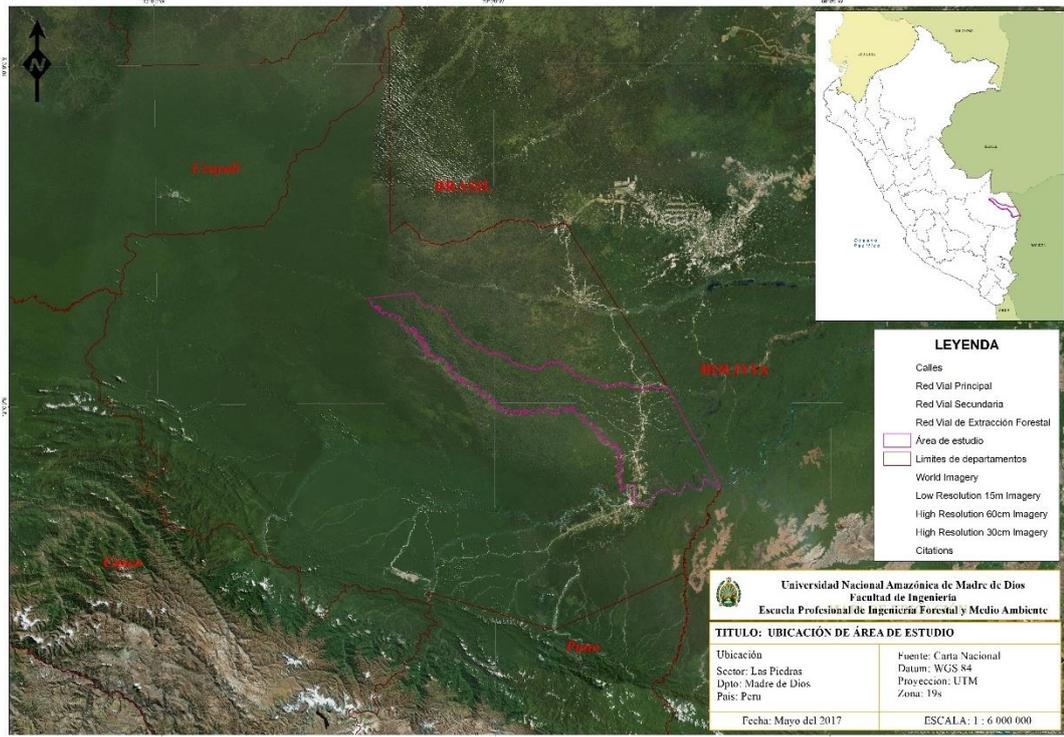


Figura 1. Ubicación del área de estudio, distrito de Las Piedras – provincia de Tambopata – Madre de Dios.

Dónde:

Z: Es el valor de la curva normal estandarizada para un nivel determinado de probabilidad, 1,96 (95%).

p: indica el porcentaje de aciertos estimado, 0,50 (50%).

q: Indica el porcentaje de errores ($q = 1 - p$), 0,50 (50%).

N: Tamaño de la población.

E: El error permitido, 0,05 (5%).

$$n = \frac{(1,96)^2 * 0,5(0,5 * 760\ 560,15)}{(760\ 560,15 - 1) * 0,05^2 + 1,96^2 + (0,5 * 0,5)}$$

$$n = 383,33 = 383$$

“Esta muestra fue distribuida, de tal forma que sea representativa de la totalidad del área, ello se dio a través de un diseño de muestreo probabilista, donde todas las unidades de muestreo presentes en el área tuvieron una

probabilidad conocida superior a cero de ser seleccionadas, a esta probabilidad de selección se le denomina probabilidad de inclusión, las técnicas de muestreo empleada fue el aleatorio estratificado, las coordenadas de los puntos muestreados se presentan en el Anexo 1, y Figura 2, la muestra se realizó de acuerdo con los focos de calor y cicatrices de quemaduras visualizadas en las imágenes de satélite, Figura 3, en el anexo 2, se presentan muestras fotográficas de estas cicatrices”.

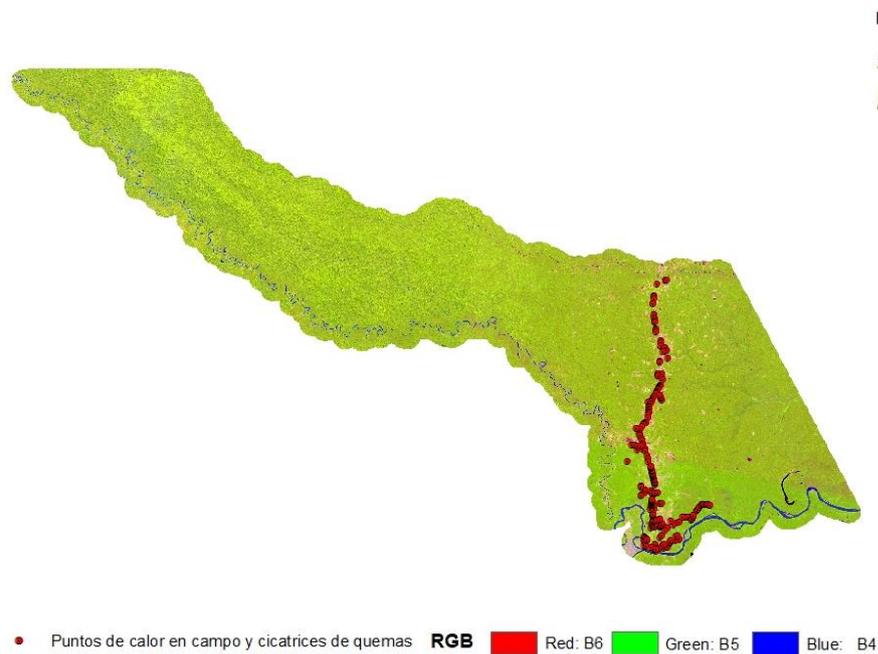


Figura 2. Distribución de muestras para validar cicatrices de quemaduras, Las Piedras, Tambopata – Madre de Dios.



Figura 3. Validación de cicatrices o áreas quemadas con imágenes PlanetScope de 3 m (izquierda) y WorldView (derecha) de 0,38 m de resolución espacial.

3.4 Método y técnicas

3.4.1 Lugar de estudio

“El departamento Madre de Dios está ubicado en la parte sur oriental del territorio nacional, limita por el norte con el departamento de Ucayali y la República de Brasil, por el sur con los departamentos de Puno y Cusco, por el este con la República de Bolivia y al oeste con los departamentos de Cusco y Ucayali, posee una frontera internacional de 584 km, de los cuales 314 km son con Brasil y 270 km con Bolivia, el departamento de Madre de Dios está dividido políticamente en 3 provincias y 11 distritos” (GOREMAD y IIAP 2009).

El área de estudio comprende el distrito de Las Piedras, su capital es la localidad de Planchón. El distrito limita con:

- ✓ Norte: con la provincia de Tahuamanu.
- ✓ Sur: con el distrito de Tambopata.
- ✓ Este: con la República de Bolivia.
- ✓ Oeste: con el distrito de Tambopata y la provincia de Tahuamanu.

3.4.2 Clima e hidrografía

“El clima es de tipo tropical: cálido, húmedo y con abundantes precipitaciones pluviales, la temperatura media anual es de 26°C; las máximas llegan a 38°C entre agosto y setiembre; las mínimas descienden a 8°C, las precipitaciones son escasas entre los meses de junio a agosto, con una época lluviosa entre diciembre y marzo, los recursos hídricos están constituidos por un río caudaloso y riachuelos que atraviesan el distrito, constituyéndose en el principal medio de comunicación y transporte, así como también por su contenido de fauna (peces, nutrias, etc.) que son, en parte, la base de la alimentación de los pobladores de la zona, la vegetación que predomina y abarca la mayor superficie corresponde a la clasificación de bosque húmedo tropical” (GOREMAD y IIAP 2009).

3.4.3 Método

El procesamiento de datos de focos de calor (hotspot) detectadas por el sensor MODIS de los periodos 2011, 2013 y 2016, se aplicó la Autocorrelación espacial (I de Moran) propuesta por Moran (1950), que caracteriza una señal entre otras regiones en el espacio multi-dimensional y multi-direccional, es decir mide la cantidad de objetos cercanos en comparación con otros objetos cercanos. El I de Moran puede ser clasificado como positivo (cercano +1), negativo (cercano -1) y sin autocorrelación espacial (0).

Para la evaluación de cicatrices o áreas quemadas se utilizó imágenes Landsat 5 TM (Tabla 2), correspondientes al año 2011, y Landsat 8 OLI (Tabla 2), para el año 2013. Para el año 2016 se utilizó imágenes Sentinel 2A (Tabla 3), todas están incluidas en el Sistema Geodésico Mundial (WGS) 84 datum. Estas imágenes de satélites fueron elegidos en base a la disponibilidad de imagen libre de nubes durante la estación seca de junio a septiembre.

Tabla 2. Información de adquisición de imágenes Landsat

| Sensor | Pat Row | Fecha de Imagen |
|---------------|---------|-----------------------|
| Landsat 5TM | 002 68 | 27 de agosto 2011 |
| Landsat 5TM | 002 69 | 28 de septiembre 2011 |
| Landsat 5TM | 003 68 | 03 de septiembre 2011 |
| Landsat 8 OLI | 002 68 | 01 de septiembre 2013 |
| Landsat 8 OLI | 002 69 | 01 de septiembre 2013 |
| Landsat 8 OLI | 003 68 | 06 de julio 2013 |

Fuente: USGS (2018).

Para la determinación de áreas quemadas, se aplicó a través del cociente normalizado de quema (NBR) que discrimina áreas quemadas, en nuestro caso Landsat (TM y OLI 8) y Sentinel 2A (Chuvienco et al. 2008).

Tabla 3. Información de adquisición de imágenes Sentinel 2A

| Sensor | Pat Row | Fecha de Imagen |
|-------------|---------|-----------------------|
| Sentinel 2A | 006 142 | 25 de agosto 2016 |
| Sentinel 2A | 006 142 | 25 de agosto 2016 |
| Sentinel 2A | 006 328 | 07 de septiembre 2016 |
| Sentinel 2A | 006 328 | 07 de septiembre 2016 |
| Sentinel 2A | 006 328 | 07 de septiembre 2016 |
| Sentinel 2A | 007 186 | 06 de noviembre 2016 |

Fuente: USGS (2018).

Este análisis se basa en el contraste entre el infrarrojo cercano (ρ_{IRC} , 0,78–0,90 μm) que es sensible al contenido de agua en el suelo y la vegetación, el infrarrojo de onda corta (ρ_{SWIR} , 2,09–2,35 μm), que es sensible a la detección de vegetación muerta o no fotosintética, en un entorno post-incendio (Jia et al. 2006; Kokaly et al. 2007) en la ecuación 2:

$$NBR = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{SWIR}}{\rho_{IRC} + \rho_{SWIR}} \quad (2)$$

Donde:

NBR = Cociente normalizado de quema

ρ_{IRC} = reflectividad del píxel i en la región del infrarrojo cercano.

ρ_{SWIR} = reflectividad del píxel i en la región del infrarrojo medio de onda corta.

A nivel de Post-clasificación se rectificó y clasifiqué cada imagen, comparando píxel a píxel (Jensen et al. 1991; Xiuwan 2002), y el grado de severidad a través de una comparación multitemporal de post incendio (Chuvienco et al. 2008; Miller y Thode 2007; Van Wagtendonk et al. 2004).

Previo a la post-clasificación, se realizó la validación de los resultados, para ello, se empleó un método mixto. Primero, a través de la recolección de puntos de las áreas de entrenamiento extraídas de las diferentes zonas de cicatrices de quemas en el distrito las Piedras, a través de la verificación in situ mediante del uso de GPS (Garmin Map 60 CSx, y Garmin Map 62 CSx).

Segundo, verificación de cicatrices de quemas a través de imágenes de alta resolución PlanetScope (3 m) y WorldView (0,38 m) (Planet Team 2017). Culminada esta etapa se realizó la validación a través de una matriz de confusión (cuya exactitud será medida mediante el índice de Kappa).

3.4.4 Técnicas de recopilación de datos

Material bibliográfico: “Esta etapa se realizó durante todo el proceso de la elaboración de la tesis, a través de la búsqueda exhaustiva de información relacionado al presente estudio”.

Selección y obtención de imágenes satelitales:

1. Inicialmente se procedió a obtener una serie temporal de anomalías térmicas o focos de calor (hotspot) detectadas por el sensor MODIS y procesadas en un software especializado (Chuvienco et al. 2012). Los focos de calor o anomalías térmicas fueron adquiridos en formato shapefile de los periodos 2011, 2013 y 2016. La detección del foco activo de fuego se realiza a través de un algoritmo contextual que utiliza la fuerte emisión de radiación en el infrarrojo medio de los incendios (Davies et al. 2009; Giglio et al. 2003).
2. Seguidamente se utilizaron imágenes provenientes del satélite Landsat 5TM (Tabla 4) y (Figura 4), para el año 2011, Landsat OLI 8 (Tabla 5) y (Figura 5), para el años 2013, y para el año 2016 se empleó el sensor Sentinel 2A (Tabla 6) y (Figura 6), con una resolución de 20m x 20m por píxel, Las imágenes fueron obtenidas de la base de datos de la Agencia Espacial Europea – ESA, y del centro LP DAAC de la NASA.

Tabla 4. Características de la imagen de satélite Landsat 5 TM

| Satélite | Bandas espectrales | Longitudes de Onda (μm) | Resolución |
|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------|
| Landsat Thematic Mapper 5 (TM5) | Banda 1-Azul | 0,45-0,52 | 30m |
| | Banda 2-Verde | 0,53-0,61 | 30m |
| | Banda 3-Rojo | 0,63-0,69 | 30m |
| | Banda 4-Infrarojo cercano | 0,78-0,90 | 30m |
| | Banda 5-Infrarrojos de onda corta | 1,55-1,75 | 30m |
| | Banda 6-Infrarojo térmico | 10,4-12,5 | 60m |
| | Banda 7-Infrarrojos de onda corta | 2,09-2,35 | 30m |

Fuente: (Li et al. 2013; Roy et al. 2014; Sokeng et al. 2016).

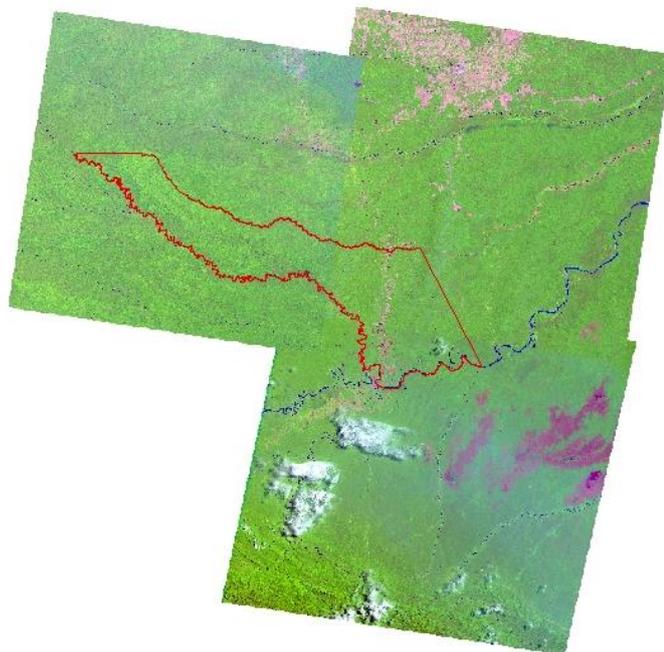


Figura 4. Imagen de satélite Landsat 5 TM, composición de banda 5-4-3 (2011-07-09, 002-068, 002-069, 003-068).

Tabla 5. Características de la imagen de satélite Landsat 8 OLI

| Satélite | Bandas Espectrales | Longitud de Onda (μm) | Resolución |
|-----------|--------------------------------------------|------------------------------------|------------|
| LANDSAT-8 | Banda 1-Costero/Aerosol | 0,433-0,453 | 30m |
| | Banda 2-Azul | 0,450-0,515 | 30m |
| | Banda 3-Verde | 0,525-0,600 | 30m |
| | Banda 4-Roja | 0,630-0,680 | 30m |
| | OLI Banda 5-Infrarrojo cercano | 0,845-0,885 | 30m |
| | Banda 6-Infrarrojo de onda corta | 1,560-1,660 | 30m |
| | Banda 7-Infrarrojo de onda corta | 2,100-2,300 | 30m |
| | Banda 8-Pancromática | 0,500-0,680 | 15m |
| | Banda 9-Cirrus | 1,360-1,390 | 30m |
| TIRS | Banda 10-Infrarrojo termal o de onda larga | 10,30-11,30 | 100m |
| | Banda 11-Infrarrojo termal o de onda larga | 11,50-12,50 | 100m |

Fuente: (Li, et al. 2013; Roy, et al. 2014; Sokeng, et al. 2016).

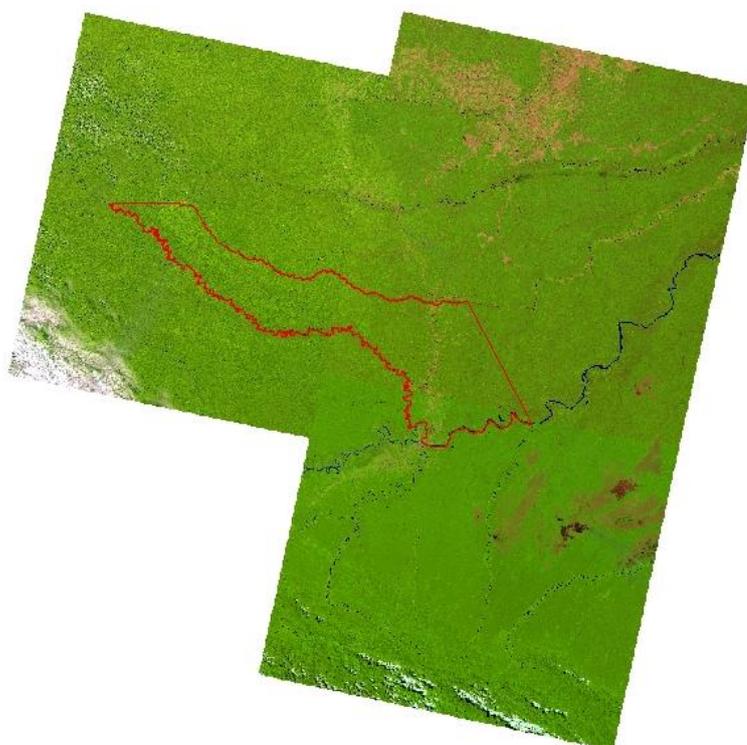


Figura 5. Imagen de satélite Landsat 8 OLI, composición de banda 6-5-4 (2013-07-9, 002-068, 002-069, 003-068).

Tabla 6. Características de las imágenes Sentinel 2A

| Bandas | Resolución (m) | Longitud de onda central (nm) | Ancho de banda (nm) | Propósito |
|--------|----------------|-------------------------------|---------------------|------------------------------------|
| B01 | 60 | 443 | 20 | Detección de aerosoles |
| B02 | 10 | 490 | 65 | Azul |
| B03 | 10 | 560 | 35 | Verde |
| B04 | 10 | 665 | 30 | Rojo |
| B05 | 20 | 705 | 15 | Clasificación de vegetación |
| B06 | 20 | 740 | 15 | Clasificación de vegetación |
| B07 | 20 | 783 | 20 | Clasificación de vegetación |
| B08 | 10 | 842 | 115 | Infrarrojo cercano |
| B08A | 20 | 865 | 20 | Clasificación de vegetación |
| B09 | 60 | 945 | 20 | Vapor de agua |
| B10 | 60 | 1375 | 30 | Nubes grises |
| B11 | 20 | 1610 | 90 | Nieve/hielo/nube de discriminación |
| B12 | 20 | 2190 | 180 | Nieve/hielo/nube de discriminación |

Fuente: Malenovský et al. (2012).

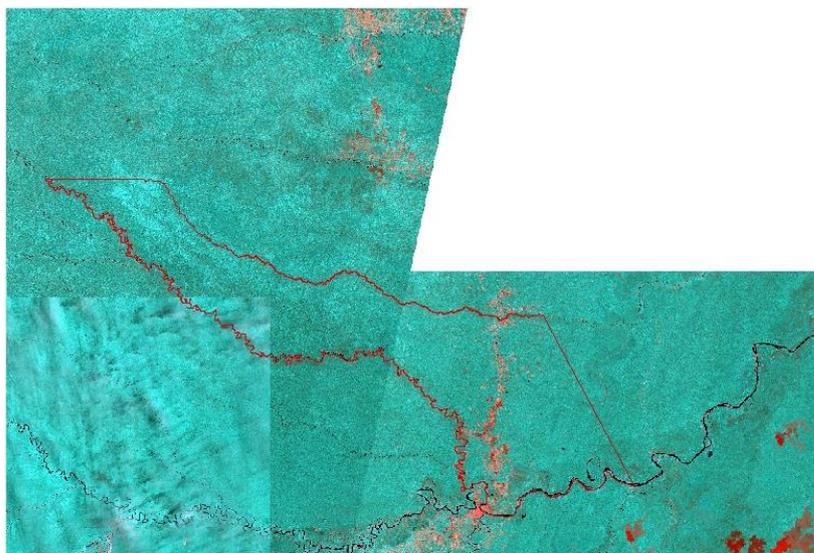


Figura 6. Imagen de satélite Sentinel 2A, composición de banda SWIR 1, Near Infrared y Red (2016-08-09-11).

Para la selección de las imágenes se consideró que el Path-row presente la menor nubosidad, ya que podría inferir negativamente en la clasificación de cicatrices de quemas. Para ello se seleccionó imágenes de época no lluviosa en el área y que tenga similitud de fecha en los años 2011, 2013 y 2016.

3.4.5 Análisis de focos de calor y clasificación supervisada de la imagen satelital

Análisis de focos de calor

El procesamiento de datos de focos de calor (hotspot) detectadas por el sensor MODIS de los periodos 2011, 2013 y 2016, se aplicó la Autocorrelación espacial (I de Moran) propuesta por Moran (1950), que caracteriza una señal entre otras regiones en el espacio multi-dimensional y multi-direccional, es decir mide la cantidad de objetos cercanos en comparación con otros objetos cercanos. El I de Moran puede ser clasificado como positivo, negativo y sin autocorrelación espacial.

La autocorrelación espacial positiva es cuando valores similares se agrupan en un mapa. La autocorrelación espacial negativa es cuando valores disímiles se agrupan en un mapa, mientras que un valor de 0 típicamente indica que no hay autocorrelación.

La I de Moran se define mediante la ecuación 3:

$$I = \frac{N}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_i (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

Donde

I = autocorrelación entre variables

N = es el número de unidades espaciales indexados por *i* y *j*; X es la variable de interés; \bar{X} es la media de X, w_{ij} es un elemento de una matriz de pesos espaciales.

El valor esperado de la I de Moran bajo la hipótesis nula de no autocorrelación espacial es:

$$E(I) = \frac{-1}{N-1} \quad (4)$$

Los criterios de valoración son:

- ✓ alto-alto: una unidad territorial con un valor de análisis por encima del promedio, rodeada significativamente por áreas vecinas que también se encuentran por sobre la media con respecto a la variable de interés. Estas unidades territoriales corresponden a los denominados conglomerados calientes (hot spots).
- ✓ bajo-bajo: una unidad territorial con un valor de análisis inferior al promedio, rodeada por áreas vecinas que también se encuentran bajo la media en relación con la variable de interés. Estas unidades territoriales corresponden a los denominados conglomerados fríos (cold spots).
- ✓ bajo-alto: presencia de una unidad territorial con un valor de análisis bajo, rodeada significativamente por áreas vecinas con valores que se encuentran por sobre la media de la variable de interés.
- ✓ alto-bajo: presencia de una unidad territorial con un valor de análisis alto, rodeada significativamente por áreas vecinas con valores que se encuentran bajo la media de la variable de interés.
- ✓ relación no significativa: presencia de unidades territoriales donde el valor de análisis de la variable de interés no se relaciona significativamente con los valores que presentan sus vecinos.

Clasificación supervisada de la imagen satelital

Es un tratamiento digital que se basa en intensidad radiométrica de cada píxel en las distintas bandas utilizadas para su interpretación. La clasificación para el presente estudio comprenderá 3 fases:

- 1. Pre-Procesamiento:** “El cual consistió en realizar todos los procesos necesarios para la preparación de los datos satelitales, para su posterior clasificación, comprendiendo así desde la unión de bandas hasta el recorte del área de interés”.
- 2. Procesamiento:** “Clasificación propiamente dicha de la imagen, en donde se localizó lugares concretos en la imagen de satélite (con

ayuda de información de campo e interpretación de fotografías aéreas o por conocimiento propio) que representen ejemplos homogéneos de las cicatrices de quema a determinar, el método seleccionado para generar información referencial de áreas quemadas fue el cociente normalizado de quema (NBR) que discrimina áreas quemadas (2)".

Para la imagen Landsat 5TM (año 2011) se aplicó el algoritmo (5)

$$NBR = \frac{(\rho_{SB4} - \rho_{SB7})}{(\rho_{SB4} + \rho_{SB7})} \quad (5)$$

Para la imagen Landsat 8 OLI (año 2013), el algoritmo (6)

$$NBR = \frac{(\rho_{SB5} - \rho_{SB7})}{(\rho_{SB5} + \rho_{SB7})} \quad (6)$$

Para Sentinel 2, el algoritmo utilizado fue el (7)

$$NBR = \frac{(\rho_{SB8A} - \rho_{SB12})}{(\rho_{SB8A} + \rho_{SB12})} \quad (7)$$

Los valores esperados por el índice NBR están comprendidos entre -1 y 1, de manera que los valores negativos corresponden a las zonas quemadas.

- 3. Post-Clasificación:** "Se rectificó y clasificó cada imagen, para luego ser comparados píxel a píxel" (Jensen et al. 1991; Xiuwan 2002), "en el caso de quemas, muchos estudios demuestran la potencialidad para clasificar cicatrices de quemas o incendios forestales, así como evaluar el grado de severidad a través de una comparación multitemporal de post incendio" (Chuvieco et al. 2008; Miller y Thode 2007; Van Wagtendonk et al. 2004).

3.5 Tratamientos de datos

Se aplicó un tratamiento mixto:

Primero, "se utilizó la matriz de confusión, test de estadística descriptiva usada para comparar una clasificación resultante con información fehaciente

de terreno” (Chuvieco 2002; Chuvieco y Hantson 2010; Elijah y Jensen 1996), “la verificación de campo se realizó en septiembre de 2016, la exactitud o precisión de este test fue medido por el Índice de Kappa el cual refleja la concordancia inter-observador y puede ser calculado en tablas de cualquier dimensión, siempre y cuando se contrasten dos observadores” (Cerde y Villarroel 2008).

“El coeficiente kappa (κ), (Tabla 7) toma valores entre -1 y +1; mientras más cercano a +1, mayor es el grado de concordancia inter-observador, por el contrario, un valor de $\kappa = 0$ refleja que la concordancia observada es precisamente la que se espera a causa exclusivamente del azar, la interpretación del coeficiente kappa se realiza correlacionando su valor con una escala cualitativa que incluye seis niveles de fuerza de concordancia (pobre, leve, aceptable, moderada, considerable y casi perfecta), simplificando la comprensión del mismo” (Landis y Koch, 1977 citado por Cerda et al., 2008).

Tabla 7. *Valoración del coeficiente kappa*

| Coeficiente Kappa | Fuerza de la Concordancia |
|--------------------------|-----------------------------------------|
| 0, 00 | Pobre (<i>Poor</i>) |
| 0,01 – 0,20 | Leve (<i>Slight</i>) |
| 0,21 – 0,40 | Aceptable (<i>Fair</i>) |
| 0,41 – 0,60 | Moderada (<i>Moderate</i>) |
| 0,61 – 0,80 | Considerable (<i>Substantial</i>) |
| 0,81 – 1,00 | Casi perfecta (<i>Almost perfect</i>) |

Fuente: (Cerde y Villarroel 2008; Landis y Koch 1977).

Segundo, “se utilizó imágenes de alta resolución PlanetScope (3 m de resolución espacial) y WorldView (0,38 m de resolución espacial) del año 2016, esta última se empleó en lugares de difícil acceso” (Planet Team 2017).

3.5.2 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó la estadística descriptiva e inferencial, para ello se aplicó el programa Microsoft Excel, SigmaPlot 12,5®, ENVI 5,3®, y ArcGis 10,5®.

Para el primer objetivo, sobre caracterizar el espacio temporal de los focos de calor (incendios) durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios, se aplicó la Autocorrelación espacial (I de Moran) con el software ArcGis 10,5®.

Respecto al segundo objetivo, sobre Cuantificar la superficie deforestada a causa de los incendios forestales durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios, se aplico cociente normalizado de quema (NBR) a través de los softwares ENVI 5,3® y ArcGis 10,5®.

El tercer objetivo, sobre el comportamiento dinámico-espacial de la superficie deforestada a causa de los incendios forestales a partir de focos de calor durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios, se aplicó la Autocorrelación espacial (I de Moran) con el software ArcGis 10,5®.

Por último, el cuarto objetivo, sobre la correlación de la superficie deforestada a causa de los incendios forestales a partir de focos de calor durante el periodo 2011-2016, se aplico la correlación de Pearson y Autocorrelación espacial (I de Moran - Bivariante).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

4.1 Caracterización espacio temporal de los focos de calor

Los focos de calor son identificados por diferentes sensores de satélites de forma diaria las 24 horas, el estudio considero el reporte del sensor MODIS de los años 2011, 2013 y 2016. Los focos de calor son importantes por ser la primera alerta temprana de una posible quema y su monitoreo. En el distrito de Las Piedras se reportó en el año 2016 un total de 1 765 focos de calor, que representan un aumento del 563,33% respecto al año 2013, y 782,50% respecto al año 2011. Los datos muestran una tendencia creciente de focos de calor en los últimos años. (Figura 7)

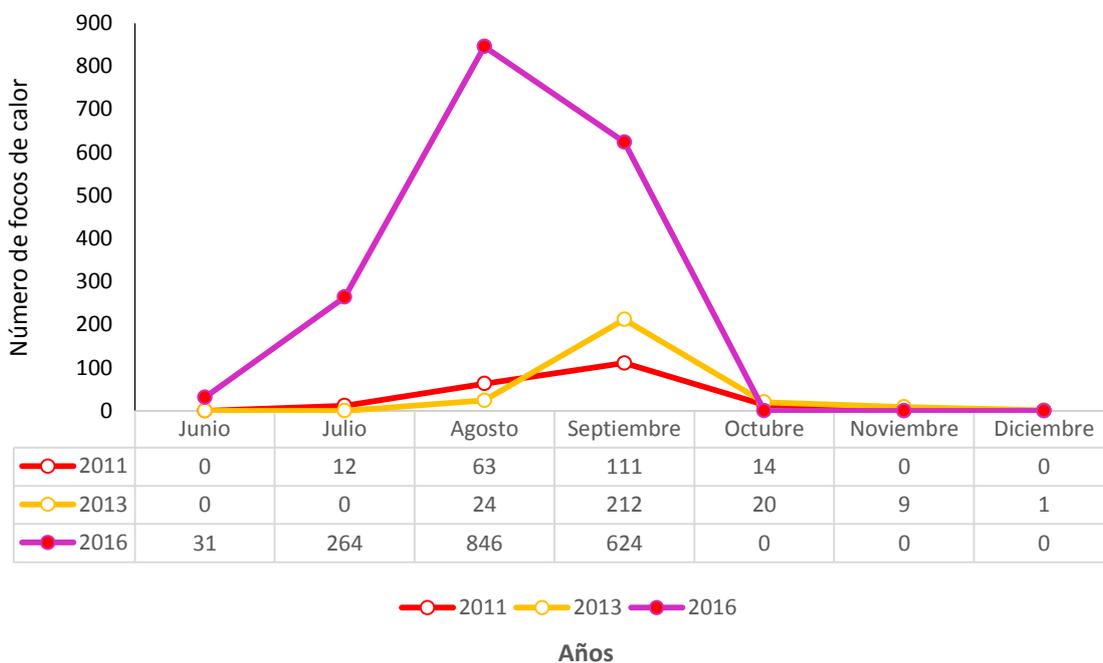


Figura 7. Análisis multi-temporal de focos de calor en Madre de Dios.

Los resultados concuerdan con los hallazgos reportados por Chuvieco et al. (2012), donde las tendencias temporales de focos de calor (25 años) del sensor MODIS en la zona mediterránea de Portugal se incrementan, detectando la ocurrencia de grandes incendios, sin embargo, el comportamiento cambia en las zonas de España y Chile central, donde la tendencia de variación es mínima. Del mismo modo, Santos, et al. (2011), reportaron una mayor incidencia de puntos calientes durante los años 2007 a 2009 en la región media del extremo oeste de Bahía, atribuyendo las causas del aumento o reducción a factores como la pluviometría y la acción antropogénica (ganadería y agricultura). A nivel del Perú, Zamora (2016), reporta un incremento de los focos de calor en la amazonia peruana de los años 2000 y 2015 a través de los sensores MODIS, VIIRS y MODIS (Aqua y Terra), atribuyendo a la roza y quema de los bosques y comunidades vegetales.

Por su parte, Trinidad y Carvalho (2011), muestran una tendencia a la reducción de puntos calientes en el período de 1998 a 2009 en el estado de Mato Grosso, y ello debe en gran parte, por la implementación de sistemas de monitoreo de quemas, así como la aplicación de normas cada vez más drásticas para los trabajadores del campo que afectan el bosque y la salud pública.

La figura 8 muestra los resultados de la prueba de autocorrelación espacial a través del coeficiente I de Moran. Estos resultados indican que el patrón no parece ser significativamente diferente al azar, por lo que no presenta autocorrelación ($I = 0,256$, $Z = 0,709$) (Moran 1950). Los resultados son similares a lo reportado por Alejandro y Di Bella (2018), donde, la caracterización de los focos de calor, régimen de incendios, su relación con el clima y su efecto en la resiliencia y estructura de la vegetación, mostraron una distribución espacial aleatoria en parte de los periodos 2000 - 2011.

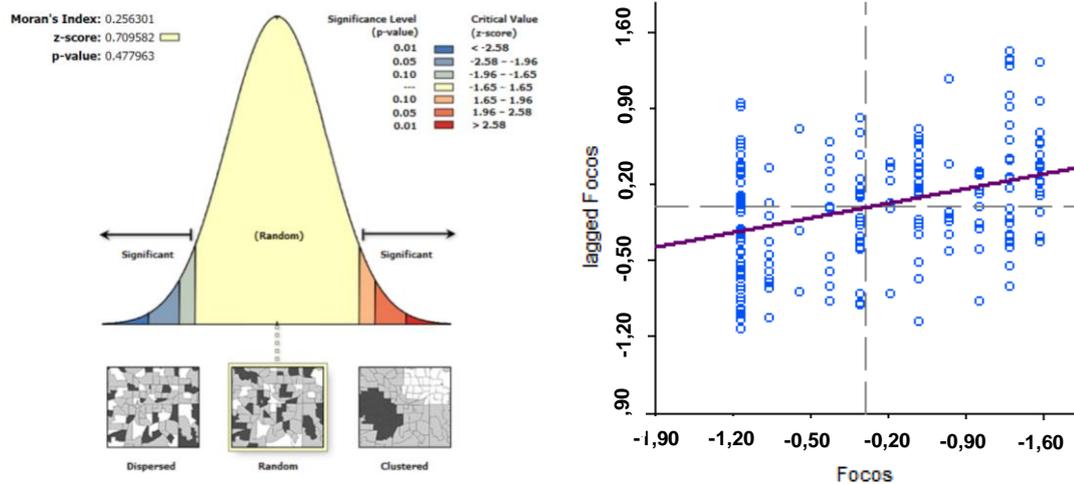


Figura 8. Autocorrelación espacial de focos de color del año 2011.

La figura 9 muestra los resultados de la prueba de autocorrelación espacial a través del coeficiente I de Moran. Estos resultados indican la presencia de una autocorrelación positiva y estadísticamente no significativa ($I = 0,359$, $Z = 1,654$); es decir, una tendencia a la concentración espacial de calificaciones. El valor de Z es menor a 2,58, por lo que puede concluirse con un nivel de confianza de 90% que la concentración no es aleatoria, con el supuesto de una distribución normal de valores probables de Z^i (Moran 1950).

Los resultados son similares a lo reportado por Alejandro y Di Bella (2018), donde, la caracterización de los focos de calor, régimen de incendios, su relación con el clima y su efecto en la resiliencia y estructura de la vegetación, mostraron una distribución espacial agrupada bajo – bajo en parte de los periodos 2000 – 2011.

La figura 10 muestra los resultados de la prueba de autocorrelación espacial a través del coeficiente I de Moran. Estos resultados indican la presencia de una autocorrelación positiva y estadísticamente significativa ($I = 0,324$, $Z = 7,235$); es decir, una tendencia a la concentración espacial de calificaciones. El valor de Z es mayor a 2,58, por lo que puede concluirse con un nivel de

ⁱ El valor crítico para rechazar una hipótesis como no estadísticamente significativa o probable bajo una curva normal de probabilidades es de 2,58 o menos; si es el caso, se rechaza la hipótesis de aleatoriedad, y concluimos que la configuración geográfica de estas calificaciones no es aleatoria.

confianza de 99% que la concentración no es aleatoria, con el supuesto de una distribución normal de valores probables de Z.

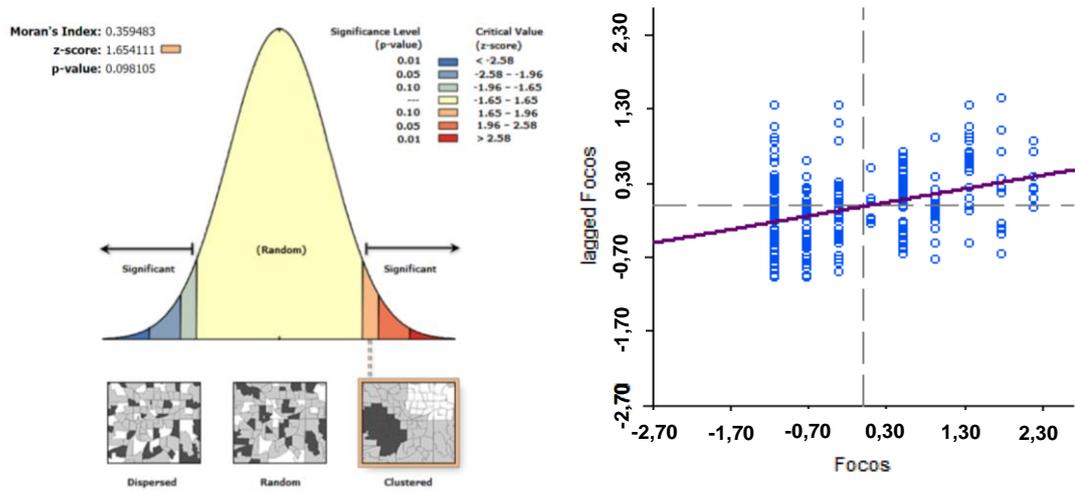


Figura 9. Autocorrelación espacial de focos de color del año 2013.

Los resultados son similares a lo reportado por Alejandro y Di Bella (2018), donde, la caracterización de los focos de calor, régimen de incendios, su relación con el clima y su efecto en la resiliencia y estructura de la vegetación, mostraron una distribución espacial agrupada bajo – alto en parte de los periodos 2000 – 2011.

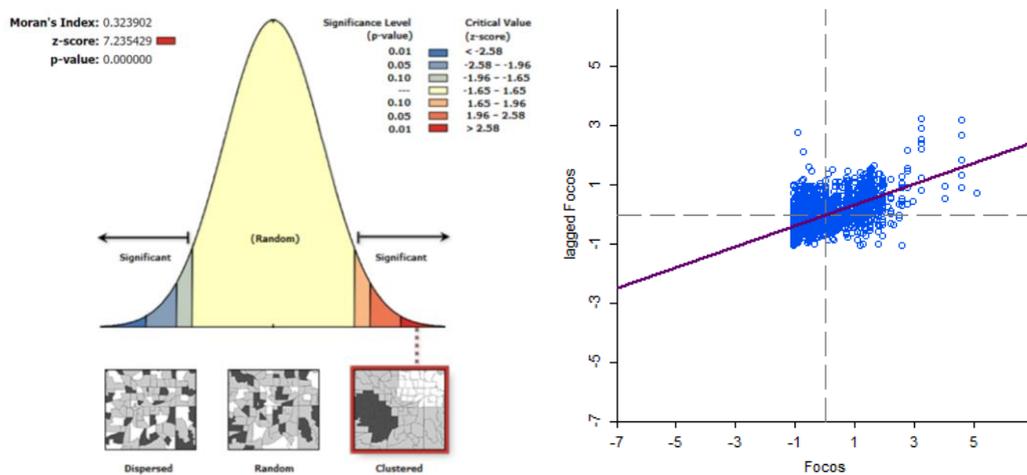


Figura 10. Autocorrelación espacial de focos de color del año 2016.

4.2 Superficie y dinámica-espacial de la deforestación a causa de incendios forestales

La evaluación de la superficie deforestada por efecto de los incendios forestales durante el periodo 2011 – 2016 en el distrito Las Piedras – Tambopata - Madre de Dios, a través de focos de calor tomados por el satélite MODIS, y su validación con imágenes Landsat 5 TM y 8 OLI, no ha podido desarrollarse en marco al agente impulsor “*incendios forestales*”, ello debido a factores como la sensibilidad de los sensores en la discriminación cicatrices o áreas quemadas por incendios forestales o incendios, así como, la dinámica y la cultura de trabajo en las diferentes partes de la región amazónica del Perú, en nuestro caso, el distrito de Las Piedras – Madre de Dios, donde se practica la agricultura de roza, tumba y quema, también conocida como agricultura nómada o itinerante.

Por estas razones, el trabajo se enfocó en mostrar resultados de la superficie deforestada por efecto de los incendios durante el periodo 2011 – 2016 en el distrito Las Piedras – Tambopata - Madre de Dios.

Bajo ese esquema, los resultados obtenidos en las tres imágenes del satélite Landsat 5 TM, 8 OLI, y Sentinel 2A son similares, por lo tanto, las imágenes tienen una distribución prácticamente idéntica a simple vista, sin embargo, al analizar los valores de los píxeles vemos que difieren poco.

Las variaciones son debidas a la resolución temporal y disponibilidad de imágenes del área de estudio con las menores anomalías (tabla 2 y 5).

Los resultados provistos por las imágenes Sentinel 2A (figura 13), los valores de NBR son más amplios que las imágenes Landsat (figura 11 y 12), aunque en general los valores de NBR oscilan entre -1 y 1 (Chuvieco et al. 2012).

Las imágenes landsat presentan valores de NBR correspondiente a áreas deforestadas (cicatrices o áreas quemadas) a causa de incendios en el rango de -0,20 a 0,10, mientras que los valores del satélite Sentinel 2 entre -0,45 a 0,10, estos valores concuerdan con los hallazgos de Delgado (2017).

La cuantificación de áreas deforestadas a través del NBR para el año 2011 (figura 11) reporto 2 535, 91 ha. Para el año 2013 (figura 12), la

cuantificación de áreas deforestadas a través del NBR reporto 1 720,80 ha. Mientras, que para el año 2016 (figura 13), la cuantificación de áreas deforestadas a través del NBR reporto 7 081,74 ha.

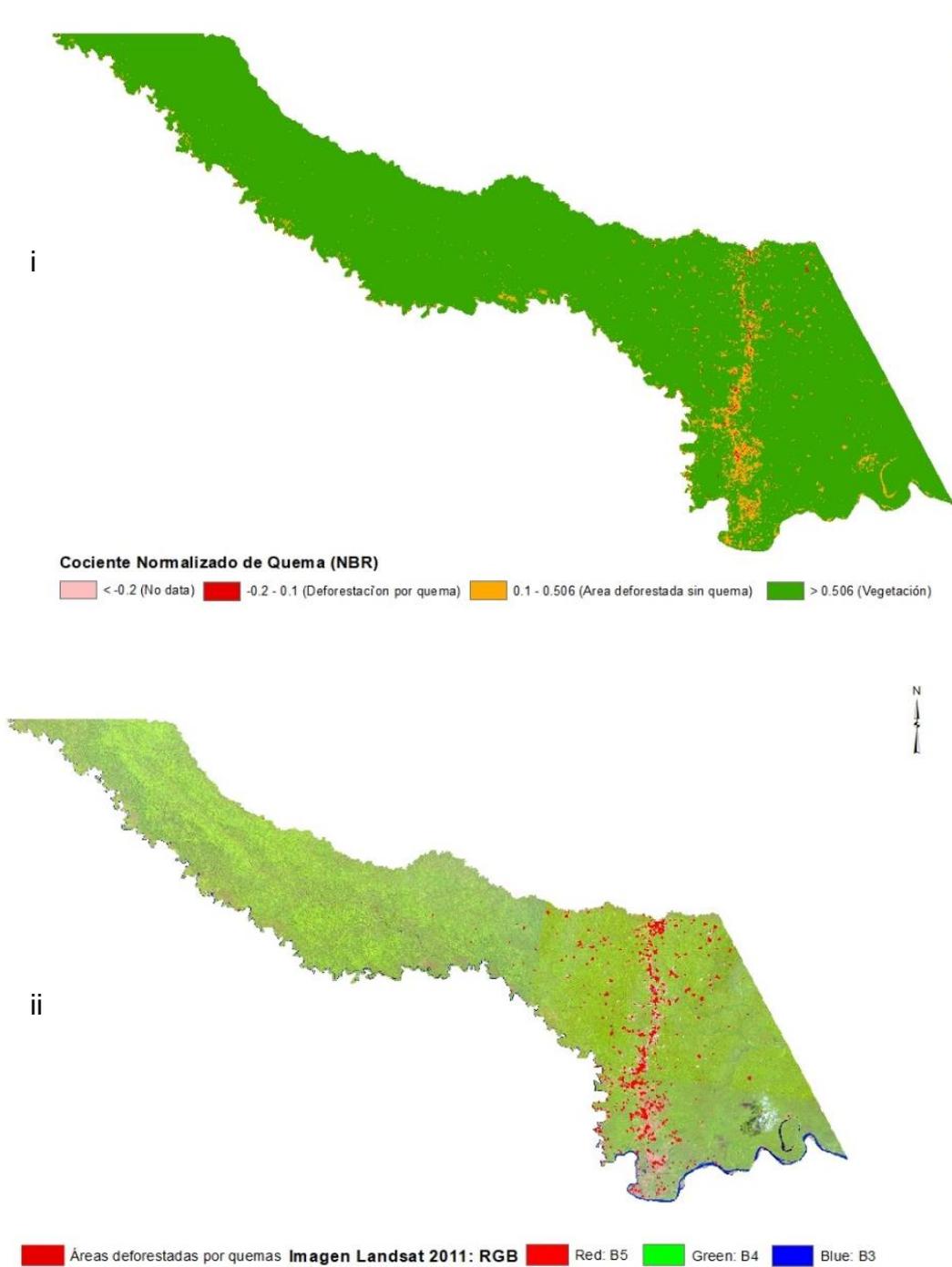


Figura 11. NBR y áreas quemadas captadas en imágenes satélite Landsat 5TM, año 2011. i) agosto 2011 y ii) setiembre 2011.

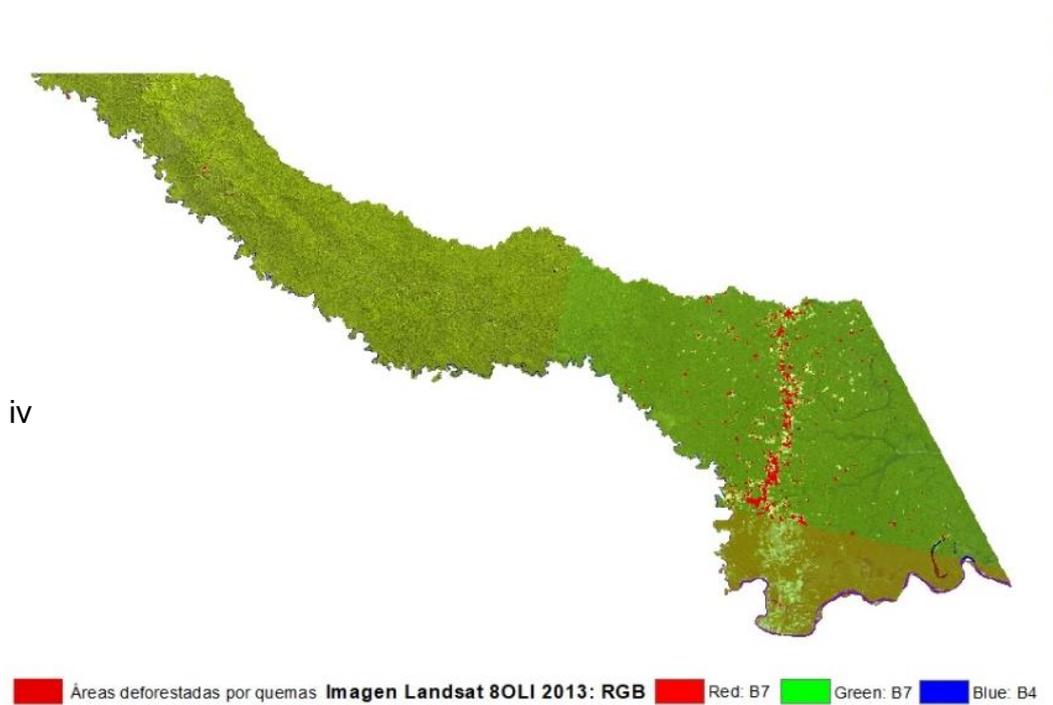
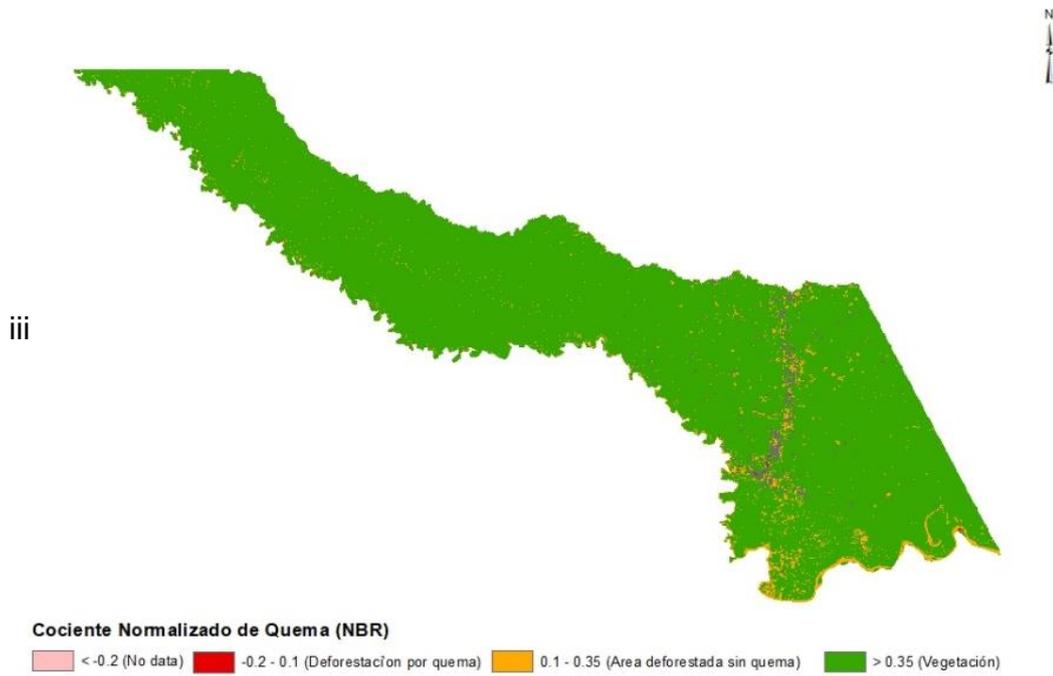


Figura 12. NBR y áreas quemadas captadas en imágenes satélites Landsat 8 OLI, año 2013
 iii) julio 2013 y iv) setiembre 2013.

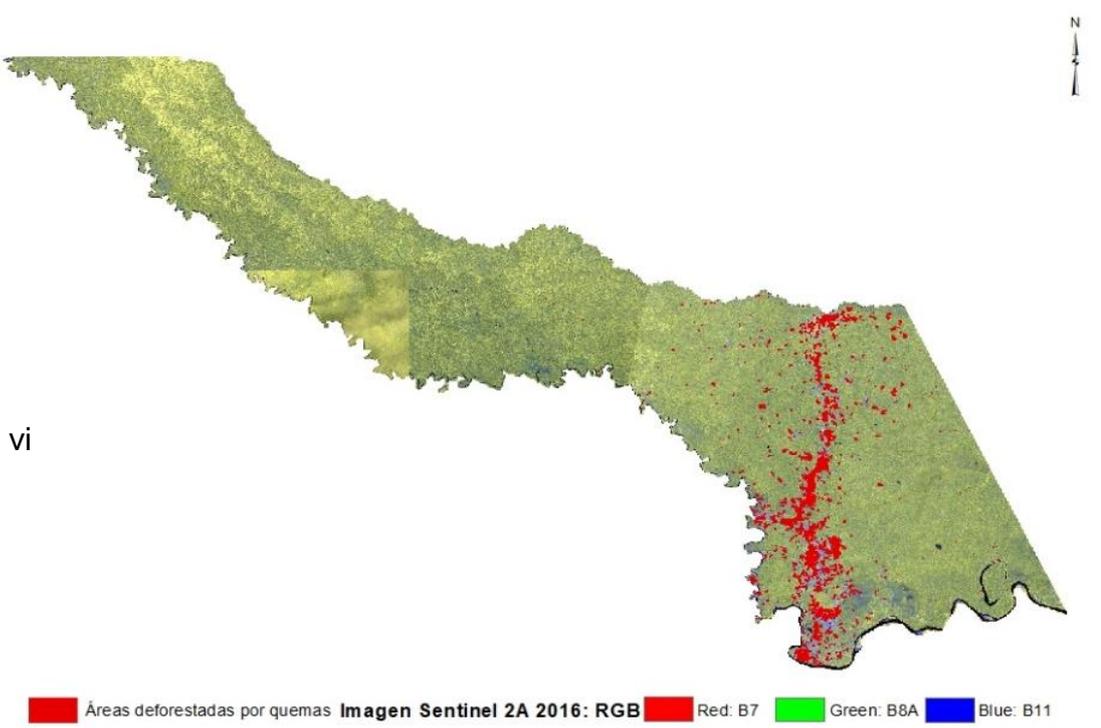
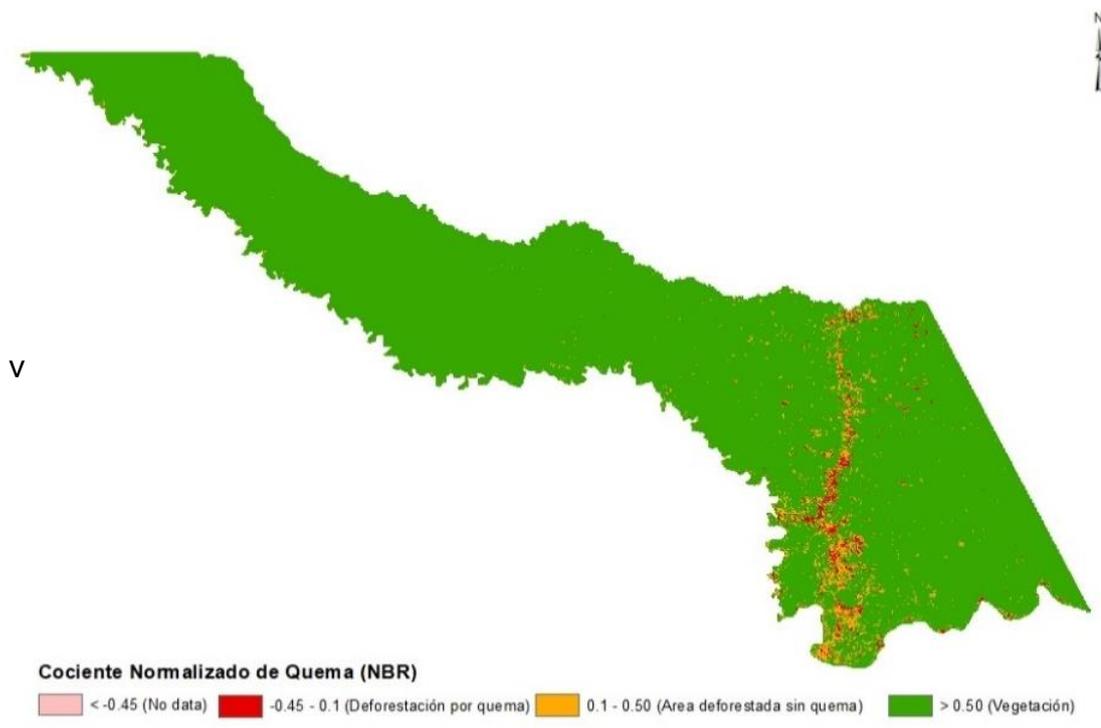


Figura 13. NBR y áreas quemadas captadas en imágenes satélites Sentinel 2A, año 2016
v) agosto 2016 y vi) setiembre 2016

En cuanto a la dinámica espacial y temporal de las áreas deforestadas por incendios (figura 14), esta, presenta altibajos en los años evaluados, el 2011 (2 535, 91 ha) presenta una mayor cuantificación de áreas deforestadas respecto al año 2013 (1 720,80 ha), esta tendencia cambia considerablemente, y se incrementa para el año 2016 en 7 081,74 ha, 311,54% y 179,26% respecto al año 2013 y 2011.

El reporte de la tendencia creciente de áreas deforestadas por incendios coinciden por los hallazgos globales reportados por Verhegghen et al. (2016), donde la cubierta vegetal de la cuenca del Congo, principalmente conformado por Marantaceae, se ve afectada por los incendios de origen antropogénico al año 2016. Del mismo modo, Fuentes (2015), reporta una superficie total significativa creciente afectada por incendios en 2013 de 33 885 ha, lo que representa el 0,52% del área total del departamento de Pando.

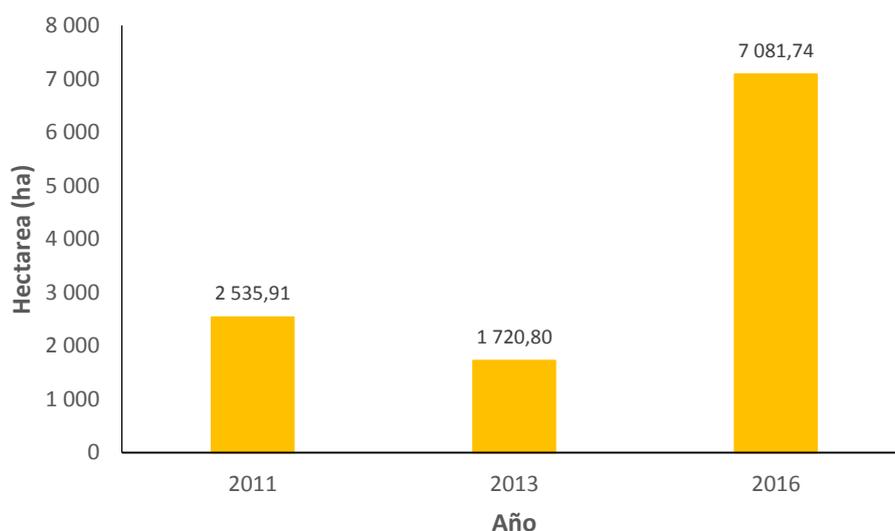


Figura 14 Dinámica de cambios de superficie de áreas quemadas en el distrito de Las Piedras, años 2011, 2013 y 2016.

En esa misma línea, Rodríguez (2012), muestra área quemadas en la amazonia Boliviana. El monitoreo de áreas quemadas cuantifica una serie de once años en 22 012 910 ha, de las cuales el 20% (4 287 512 ha) corresponden a incendios forestales y la mayor parte de las superficies de quemadas en pastos y sabanas. Alencar et al. (2011), muestra una serie

temporal de 23 años de cicatrices anuales de quemaduras en un bosque fragmentado del Amazonas oriental, donde cuantifica la conversión del bosque quemado a otros usos del suelo en un área de 32 400 km². Asimismo, Rodrigues y Borges (2011), reporta áreas afectadas por incendios en el período comprendido entre los años 2004 y 2009 en el Parque Nacional Chapada Diamantina y su zona de amortiguamiento aumentó. Atribuyéndose a causas antropogénicas, el 64% es agrícola y el 36% está relacionado con la minería y la caza.

A nivel local, Frisancho et al. (2013), en el distrito de Iñapari, Madre de Dios – Perú, a través del NVDR determino para el 2010, 1979,70 ha, 206% más de áreas afectas por el fuego que el año 2009 (579,03 ha). Los resultados respaldan el trabajo propuesto, por lo que podemos deducir la creciente actividad antropogénica en la conversión del bosque y formaciones vegetales para usos agrícolas.

4.2.1 Evaluación de precisión de clasificación

La evaluación en la precisión de la clasificación de la imagen Sentinel 2A del año 2016, reporta un 85,57% de precisión global, mientras que el coeficiente Kappa muestra una clasificación total del área de estudio de 0,8101.

Según los rangos del coeficiente kappa (κ) (0,8101), presenta una fuerza de concordancia casi perfecta (0,81 – 1,00), por lo que se deduce que nos encontramos ante una correcta clasificación de las categorías, y que simplifica la comprensión del área de estudio (Cerdeja y Villarroel 2008).

Los errores de “omisión” y “comisión” expresan dos enfoques del mismo problema. “Los primeros se refieren a una definición imperfecta de la categoría y los segundos, a una delimitación excesivamente amplia, desde otro punto de vista, algunos autores hablan de exactitud del usuario y del productor. La primera está en relación inversa con los errores de omisión, mientras la segunda lo está con los de comisión” (Barandela 1987; Cortijo y erez de la Blanca 1996). En nuestro caso, se utilizó 383 puntos de muestreo, 229 verificados en campo (anexo 1), y 154 a través de imágenes de satélite

de alta resolución (PlanetScope y WorldView). Del total, 341 fueron clasificadas como áreas deforestadas por incendios, y 42 fueron confundidas con otras categorías. (Tabla 8).

Tabla 8. *Precisión de resultados, imagen del año 2016*

| Nivel de clasificación | Referencia Totales | Clasificados Totales | Número Correcto | Productores (omisión) Precisión | Usuarios (comisión) Precisión |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
| Áreas deforestadas por incendios | 383 | 341 | 341 | 85,57% | 100,00% |
| Totales | 383 | 341 | 341 | | |

Según Hudson (1987), el Índice de Kappa o coeficiente de conformidad de capa, es una medida de la exactitud de la clasificación y su varianza es usada en la comunidad de teledetección, para realizar pruebas estadísticas de diferencias significativas, cuando la efectividad global es elevada se corresponde con un valor elevado del Índice de Kappa, aunque no es una relación lineal muestra un elevado grado de concordancia, en nuestro caso muestra una concordancia casi perfecta (0,8101), por lo que determina que las fases de muestreo, de pre-procesamiento de las muestras de aprendizaje/control, la fase del entrenamiento y método de clasificación han sido certeros (Hart 1968; Pontius 2000; Preparata y Shamos 1985).

4.3 Nivel de acierto y correlación de la superficie deforestada a causa de incendios forestales y focos de calor

La figura 15 muestra la totalidad de focos de calor evaluados en el distrito de Las Piedras, separado por aciertos y no validos del satélite MODIS. El total de focos analizados suman 200, 266 y 1 765, para los años 2011, 2013 y 2016. Los focos de calor “acertados” son aquellos que efectivamente presentaron una cicatriz de quema dentro de su buffer cuadrado. El porcentaje de acierto de los focos de calor son: 36,50% (73 puntos) para el 2011, 16,54% (44 puntos) para el 2013, y 66,74% para el año 2016 (1178

puntos). De la evaluación, se deduce que los focos de calor son buenos definidores de los incendios ocurridos en una determinada zona, pero no describen adecuadamente la ignición, por un lado, ya que apenas recogen incendios de tamaño pequeño y, por otro, muchos puntos de calor pueden referirse al mismo incendio si es suficientemente grande y extenso en el tiempo (Chuvienco et al. 2012), esta analogía, explica nuestros resultados, el año 2011 y 2013, la presencia de un número reducido de focos de calor en el distrito de Las Piedras, presenta un nivel bajo de aciertos en la determinación de cicatrices o áreas quemadas.

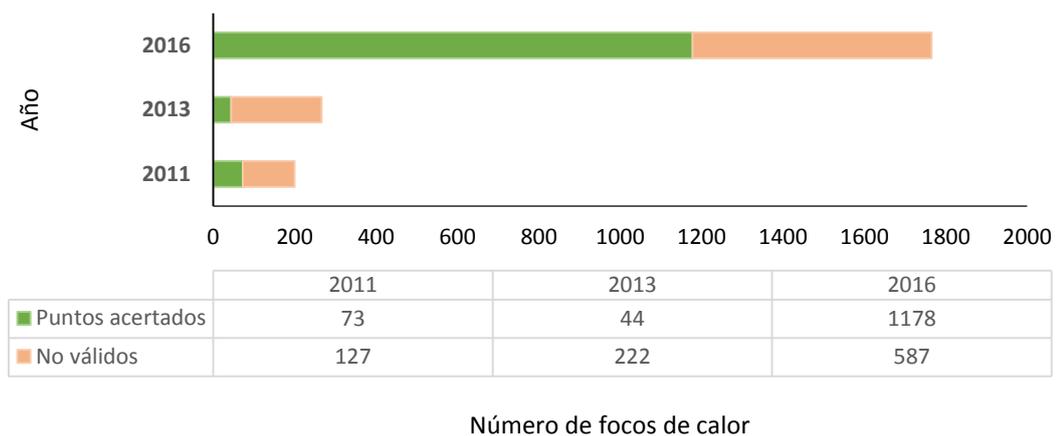


Figura 15. Total de focos de calor analizados en la determinación de cicatrices o áreas quemadas; aciertos y no válidos.

Mientras que el año 2016, el nivel de aciertos sube considerable en función al incremento del número de focos de calor, este comportamiento es respaldado por los hallazgos reportados por Zamora (2016), en su estudio “Análisis histórico de los focos de calor en el Perú (2000 – 2015)”.

Para evaluar la correlación de la superficie deforestada a causa de los incendios forestales a partir de focos de calor, se determinó la relación del número de focos de calor por superficie de cicatriz o área quemada.

Los valores de cicatrices o áreas quemadas y de los focos de calor para el año 2011 presenta una correlación positiva considerable ($r = 0,75 < r < 0,90$), mostrando que a medida que incrementan el número de focos de calor aumentan las áreas deforestadas productos de incendios (Figura 16).

Para el año 2013, los valores de cicatrices o áreas quemadas y de los focos de calor presenta una correlación positiva considerable ($r = 0,75 < r < 0,90$), mostrando que a medida que incrementan el número de focos de calor aumentan las áreas deforestadas productos de incendios (Figura 17).

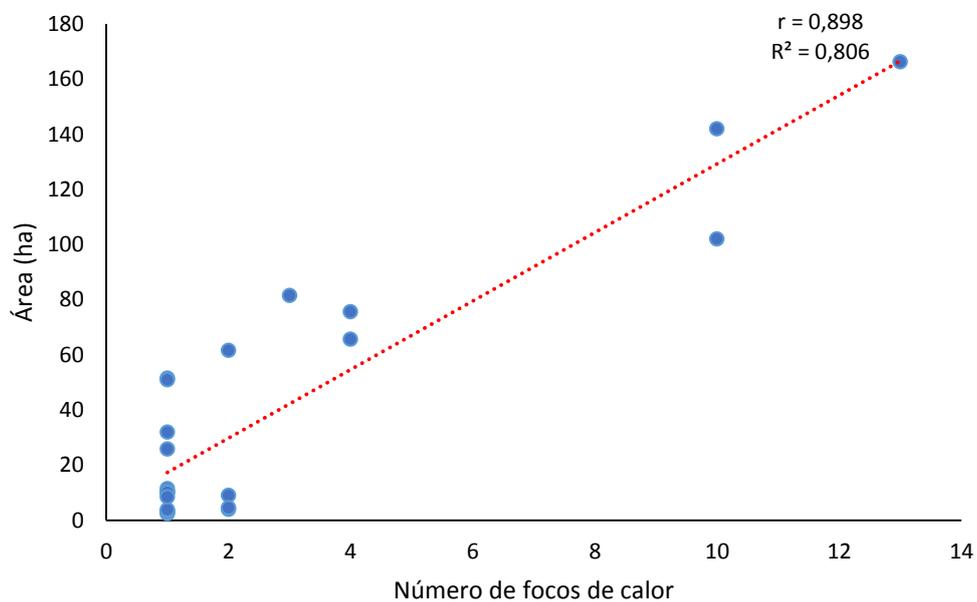


Figura 16. Correlación espacial del área deforestada por incendios y de focos de calor del año 2011.

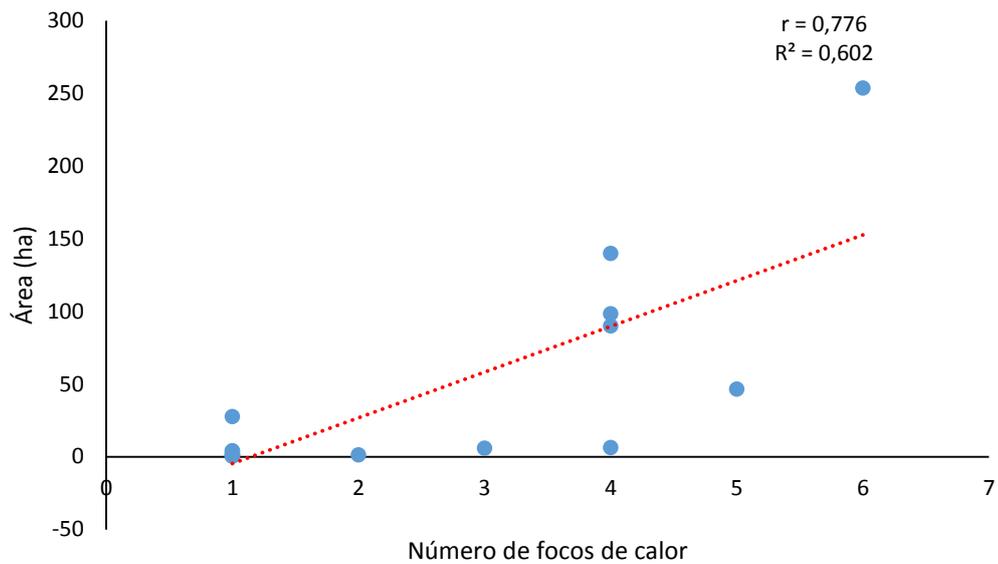


Figura 17 Correlación espacial del área deforestada por incendios y de focos de calor del año 2013.

Finalmente, los valores de cicatrices o áreas quemadas y de los focos de calor para el año 2016 presenta una correlación positiva muy fuerte ($r = 0,90 < r < 1,0$), mostrando que a medida que incrementan el número de focos de calor aumentan las áreas deforestadas productos de incendios (Figura 18).

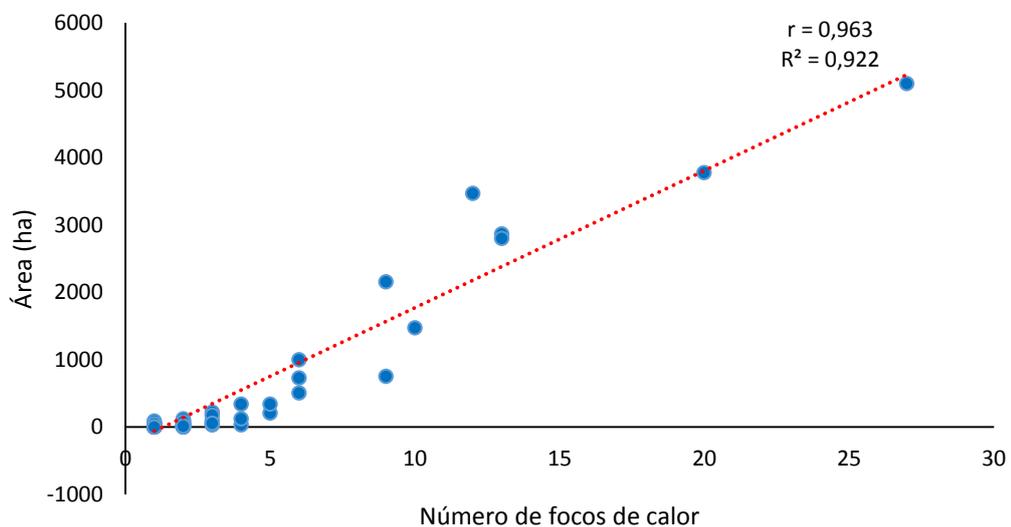


Figura 18. Correlación espacial del área deforestada por incendios y de focos de calor del año 2016.

De la evaluación, se deduce que los focos de calor son buenos definidores de los incendios ocurridos en una determinada zona, pero no describen adecuadamente la ignición, por un lado, ya que apenas recogen incendios de tamaño pequeño y, por otro, muchos puntos de calor pueden referirse al mismo incendio si es suficientemente grande y extenso en el tiempo (Chuvieco et al. 2012). Con este argumento, la correlación calculada entre el área deforestada por incendios y número de puntos de calor es positiva, de considerable a muy fuerte, por lo que podríamos deducir la correcta predicción de cicatrices o áreas quemadas a través de focos de calor acertados. Estos resultados se respaldan por estudios similares reportados por Chuvieco et al. (2012); Fuentes (2015); Ramos et al. (2011).

CONCLUSIONES

La actividad agropecuaria a través de la roza y quema son una práctica común en la conversión de bosques. La información de focos de calor proporcionada por satélites son un instrumento de ayuda para el monitoreo de la deforestación por incendios.

El reporte de los focos de calor del satélite MODIS en el distrito de Las Piedras, periodos 2011, 2013 y 2016, muestran una tendencia creciente, por lo que se puede presumir el incremento de las prácticas de roza y quema en las actividades agropecuarias. En cuanto a distribución espacial, si bien presenta una autocorrelación positiva, esta es muy baja, no siendo ni disperso ni agrupado, tendiendo a una distribución aleatorizada.

La cuantificación del índice de quema (NBR) del 2016 (7 081,74 ha), determina un incremento de 179,26% y 311,54% respecto al año 2011 y 2013. Estos valores contrastan con el número de focos de calor para los periodos respectivos, y por consiguiente el incremento de prácticas de roza y quema en la conversión de cobertura vegetal a áreas deforestadas por incendios.

A nivel de precisión, que los focos de calor se traduzcan en cicatrices o áreas quemadas, el reporte del 2016 muestra un 66,74% de aciertos respecto a los años 2011 (36,50%) y 2013 (16,54%). Ello es posible, por la precisión de los satélites y el incremento de los focos de calor en el área de estudio.

La superficie deforestada a causa de los incendios a partir de focos de calor en el año 2011 fue de 2 535,91 ha, 2013 fue de 1 720,80 ha y el 2016 fue de 7 081,74 ha, determinando una correlación positiva de considerable a muy fuerte, presentando un mejor comportamiento en el año 2016. Por lo que podríamos aceptar, que la superficie deforestada a causa de los incendios presenta una alta correlación con los focos de calor durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios. Sin embargo, por argumentos expuesto en acápite anteriores, no podríamos rechazar la hipótesis nula, donde la superficie deforestada a causa de los incendios

forestales no presenta una alta correlación con los focos de calor durante el periodo 2011-2016 en el distrito Las Piedras-Tambopata-Madre de Dios.

SUGERENCIAS

Los avances tecnológicos en teledetección permiten el monitoreo y detección de focos de calor e incendios cada vez más precisos, sin embargo, es muy importante considerar que su valor solo se define con la interpretación que con base en la experiencia humana se haga de la misma. Así como de su potencial como apoyo para la toma de decisiones en los planes de manejo del fuego. En ese sentido, es necesario:

- ✓ Fortalecer la capacidad de gestión institucional de las instituciones públicas y la sociedad civil para plantear y definir políticas públicas, y de educación ambiental, así como programas de mitigación de la vulnerabilidad física y de la población de influencia directa.
- ✓ Implementar un Sistema de Alerta Temprana de uso y acción multisectorial en la prevención de incendios.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

ACHARD, F., DEFRIES, R., EVA, H., HANSEN, M., MAYAUX, P. y STIBIG, H. Pan-tropical monitoring of deforestation. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(4), 045022.

AIDE, T. M., CLARK, M. L., GRAU, H. R., LÓPEZ-CARR, D., LEVY, M. A., REDO, D., BONILLA-MOHENO, M., RINER, G., ANDRADE-NÚÑEZ, M. J. y MUÑIZ, M. Deforestation and reforestation of Latin America and the Caribbean (2001–2010). *Biotropica*, 2013, 45(2), 262-271.

ALEJANDRO, B. L. M. y DI BELLA, C. M. Caracterización del régimen de incendios, su relación con el clima y su efecto en la resiliencia y estructura de la vegetación. Universidad Nacional de Córdoba, 2018.

ALENCAR, A., ASNER, G. P., KNAPP, D. y ZARIN, D. Temporal variability of forest fires in eastern Amazonia. *Ecological Applications*, 2011, 21(7), 2397-2412.

ANAYA, J. A. y CHUVIECO, E. Validación para Colombia de la estimación de área quemada del producto L3JRC en el periodo 2001-2007/Validation of the L3JRC burned area product estimation in Colombia from 2001 to 2007. *Actualidades Biológicas*, 2010, 32(92), 29.

ARAGÃO, L. E. y SHIMABUKURO, Y. E. The incidence of fire in Amazonian forests with implications for REDD. *Science*, 2010, 328(5983), 1275-1278.

ARGANY, M. y SARADJIAN, M. R. Digital change detection and expansion monitoring of urban areas using satellite images by means of classification methods.

ARIZA, A. Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2013.

ARMENTERAS, D., GONZALEZ, F. y FRANCO, C. Distribución geográfica y temporal de incendios en Colombia utilizando datos de anomalías térmicas. *Caldasia*, 2009, 31(2).

AVERY, T. E. y BERLIN, G. L. *Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation* 1992.

ÁVILA, D. Y., GONZÁLEZ, M. A., JIMÉNEZ, J., AGUIRRE, O. A., TREVIÑO, E., VARGAS, B. y ALANÍS, E. Efecto de la severidad del fuego en las características de la estructura forestal en rodales de coníferas. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 2014, 20(1), 34-45.

BARANDELA, R. *The Nearest Neighbor rule: an empirical study of its methodological aspects*. 1987.

BARAY, H. L. Á. *Introducción a la metodología de la investigación*. Edtion ed.: Juan Carlos Martínez Coll, 2006. ISBN 8469019996.

BARCIA, S., FONTES, M. y VIERA, E. Y. Comportamiento temporal de los focos de calor detectados por satélites en la provincia de Cienfuegos. *Revista Cubana de Meteorología*, 2018, 24(3), 324-334.

CASTRO, F. *El proceso de investigación y su esquema de elaboración*. Editorial Uyapar. Caracas, 2003.

CAZAU, P. *Introducción a la investigación en ciencias sociales*. Lima. Editorial Universidad Ricardo Palma, 2006.

CERDA, J. y VILLARROEL, L. Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista chilena de pediatría*, 2008, 79(1), 54-58.

COCHRANE, M. A. Fire science for rainforests. *Nature*, 2003, 421(6926), 913-919.

COCHRANE, M. A., ALENCAR, A., SCHULZE, M. D., SOUZA, C. M., NEPSTAD, D. C., LEFEBVRE, P. y DAVIDSON, E. A. Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. *Science*, 1999, 284(5421), 1832-1835.

COCHRANE, M. A. y LAURANCE, W. F. Fire as a large-scale edge effect in Amazonian forests. *Journal of Tropical Ecology*, 2002, 18(03), 311-325.

CORONADO-CHACÓN, L. Comprobación de técnicas de procesamiento de imágenes del sensor remoto ETM+ de Landsat 7, en la identificación de Bosques Secundarios en la Región Huetar Norte de Costa Rica 2001.

CORTIJO, F. y EREZ DE LA BLANCA, N. Image classification using non-parametric classifiers and contextual information. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1996, 31, 120-124.

CHUVIECO, E. Teledetección espacial: la observación de la Tierra desde el espacio 2002.

CHUVIECO, E., CIFUENTES, Y., HANTSON, S., LÓPEZ, A. A., RAMO, R. y TORRES, J. Comparación entre focos de calor MODIS y perímetros de área quemada en incendios mediterráneos. *Revista Española de Teledetección*, 2012, 37, 9-22.

CHUVIECO, E., GIGLIO, L. y JUSTICE, C. Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data. *Global Change Biology*, 2008, 14(7), 1488-1502.

CHUVIECO, E. y HANTSON, S. Procesamiento estándar de imágenes Landsat. Documento técnico de algoritmos a aplicar. Version1. Plan Nacional de Teledetección. Instituto Geográfico Nacional. On line. http://www.ign.es/PNT/pdf/especificacionestecnicas-pnt-mediario-landsat_v2-2010.pdf, 2010.

CHUVIECO, E., MARTÍN, M. P. y VENTURA, G. Evaluación de imágenes NOAA-AVHRR y TERRA-MODIS para cartografía regional de áreas quemadas. In *X Simposio Internacional de la Sociedad de Expertos Latinoamericanos en Percepción Remota (SELPER)*. 2002.

CHUVIECO, E. y SALAS, J. Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 1996, 10(3), 333-345.

DAVIES, D. K., ILAVAJHALA, S., WONG, M. M. y JUSTICE, C. O. Fire information for resource management system: archiving and distributing MODIS active fire data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1), 72-79.

DE DIOS, V. R., KARAVANI, A., BOER, M. M., BAUDENA, M., COLINAS, C., DÍAZ-SIERRA, R., PEMÁN, J., DE LUIS, M. y DE SALAMANCA, Á. E. Deforestación inducida por el fuego en bosques mediterráneos sometidos a sequía. *Foresta*, 2018, (70), 56-65.

DELGADO, A. Detección de incendios. *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2017.

DEPPE, F., DE PAULA, E. V., MENEGHETTE, C. R. y VOSGERAU, J. Comparação de índice de risco de incêndio florestal com focos de calor no Estado do Paraná. *Floresta*, 2004, 34(2).

DI BELLA, C. M., POSSE, G., BEGET, M. E., FISCHER, M. D. L. A., MARI, N. y VERÓN, S. La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Revista Ecosistemas*, 2008, 17(3).

ELIJAH, R. y JENSEN, J. R. Remote sensing of mangrove wetlands: relating canopy spectra to site-specific data 1996.

ELLIS, E. A., ROMERO MONTERO, J. A. y HERNÁNDEZ GÓMEZ, I. U. Evaluación y mapeo de los determinantes de la deforestación en la Península Yucatán. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), The Nature Conservancy (TNC), Alianza México REDD+, México, Distrito Federal, 2015.

FAO Evaluación de los recursos forestales mundiales 2005. México. Informe nacional núm. 189. Roma. 68 p. , 2005.

----- Los bosques y el cambio climático en el Perú. Bosques y cambio climático. Documento de trabajo 14, 2016.

FRANÇOIS-MAS, J., REYES DÍAZ-GALLEGOS, J. y PÉREZ-VEGA, A. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. Investigaciones geográficas, 2003, (51), 53-72.

FRISANCHO, R., HANCCO, E., ALARCÓN, G., VELA, M., PORTAL, L., BAEZ, S., LIRA, G. y CAIRO, I. Determinación de áreas impactadas por fuego el año 2009 y 2010 en Iñapari a través de sensoriamiento remoto. In. Puerto Maldonado, 2013, p. 85.

FUENTES, H. L. 2015. Monitoreo de Cicatrices de Quemadas en el Departamento de Pando–Bolivia mediante sistemas de información geográfica y teledetección. In *Proceedings of the Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE*, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril 2015.

GAVILÁN, J. y CATALINA, J. Análisis del uso de la reforestación y la regeneración natural en zonas degradadas de la Amazonía Peruana 2018.

GIGLIO, L., DESCLOITRES, J., JUSTICE, C. O. y KAUFMAN, Y. J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(2), 273-282.

GIGLIO, L., VAN DER WERF, G., RANDERSON, J., COLLATZ, G. y KASIBHATLA, P. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(4), 957-974.

GOEL, N. y NORMAN, J. Biospheric models, measurements and remote sensing of vegetation. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 1992, 47(2-3), 163-188.

GOBIERNO REGIONAL DE MADRE DE DIOS (GOREMAD) E INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE LA AMAZONIA PERUANA (IIAP). Macro Zonificación Ecológica Económica de Madre de Dios. In G.D.R.N.Y.M. AMBIENTE. Madre de Dios - Perú, 2009, p. 208.

GUTIÉRREZ-HERNÁNDEZ, O., SENCIALES-GONZÁLEZ, J. M. y GARCÍA, L. V. Los incendios forestales en Andalucía: investigación exploratoria y modelos explicativos. *Flamma*, 2015, 6, 144-148.

HART, P. The condensed nearest neighbor rule (Corresp.). *IEEE transactions on information theory*, 1968, 14(3), 515-516.

HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. y BAPTISTA, P. Metodología de la Investigación (Quinta edición ed.).(J. Mares Chacón, Ed.) Mexico, México DF. In.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, SA de CV, 2010.

HUDSON, W. D. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1987, 53(4), 421-422.

JENSEN, J. R., LIN, H., YANG, X., RAMSEY III, E., DAVIS, B. A. y THOEMKE, C. W. The measurement of mangrove characteristics in southwest Florida using SPOT multispectral data. *Geocarto International*, 1991, 6(2), 13-21.

JIA, G. J., BURKE, I. C., GOETZ, A. F., KAUFMANN, M. R. y KINDEL, B. C. Assessing spatial patterns of forest fuel using AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(3), 318-327.

KODANDAPANI, N., COCHRANE, M. A. y SUKUMAR, R. Conservation threat of increasing fire frequencies in the Western Ghats, India. *Conservation Biology*, 2004, 18(6), 1553-1561.

KOKALY, R. F., ROCKWELL, B. W., HAIRE, S. L. y KING, T. V. Characterization of post-fire surface cover, soils, and burn severity at the Cerro Grande Fire, New Mexico, using hyperspectral and multispectral remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(3), 305-325.

LANDIS, J. R. y KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 1977, 159-174.

LI, P., JIANG, L. y FENG, Z. Cross-comparison of vegetation indices derived from Landsat-7 enhanced thematic mapper plus (ETM+) and Landsat-8 operational land imager (OLI) sensors. *Remote Sensing*, 2013, 6(1), 310-329.

LILLESAND, T. M. y KIEFER, R. W. Remote sensing and photo interpretation. John Wiley and Sons: New York, 1994, 750.

LIMA, A., SILVA, T. S. F., DE FEITAS, R. M., ADAMI, M., FORMAGGIO, A. R. y SHIMABUKURO, Y. E. Land use and land cover changes determine the spatial relationship between fire and deforestation in the Brazilian Amazon. *Applied Geography*, 2012, 34, 239-246.

MALENOVSKÝ, Z., ROTT, H., CIHLAR, J., SCHAEPMAN, M. E., GARCÍA-SANTOS, G., FERNANDES, R. y BERGER, M. Sentinels for science: Potential of Sentinel-1,-2, and-3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120, 91-101.

MANTA, M. y LEÓN, H. Los incendios forestales del Perú: Grave problema por resolver. *Floresta (Brasil)*, 2004, 34(2), 179-189.

MEANS, J. E., ACKER, S. A., HARDING, D. J., BLAIR, J. B., LEFSKY, M. A., COHEN, W. B., HARMON, M. E. y MCKEE, W. A. Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(3), 298-308.

MENDOZA, E., PERZ, S., SCHMINK, M. y NEPSTAD, D. Participatory stakeholder workshops to mitigate impacts of road paving in the Southwestern Amazon. *Conservation and Society*, 2007, 5(3), 382.

MILLER, J. D. y THODE, A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(1), 66-80.

MORAN, P. A. Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 1950, 37(1/2), 17-23.

MÜLLER, J. y BRANDL, R. Assessing biodiversity by remote sensing in mountainous terrain: the potential of LiDAR to predict forest beetle assemblages. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(4), 897-905.

NEPSTAD, D., SCHWARTZMAN, S., BAMBERGER, B., SANTILLI, M., RAY, D., SCHLESINGER, P., LEFEBVRE, P., ALENCAR, A., PRINZ, E. y FISKE, G. Inhibition of Amazon deforestation and fire by parks and indigenous lands. *Conservation Biology*, 2006, 20(1), 65-73.

OLCOZ, I. Copernicus: Automatización de la descarga de imágenes de Sentinel 2016.

ORELLANA, D. Determinantes de la deforestación en la Amazonia. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo-RIAT*, 2012, 8(1), 17-25.

PACHECO, C., AGUADO, I. y MOLLICONE, D. Las causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo. *Biollania*, 2011, 10, 281-292.

PADILLA, M., STEHMAN, S. V., RAMO, R., CORTI, D., HANTSON, S., OLIVA, P., ALONSO-CANAS, I., BRADLEY, A. V., TANSEY, K. y MOTA, B. Comparing the accuracies of remote sensing global burned area products using stratified random sampling and estimation. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 160, 114-121.

PLA, L. E. *Análisis multivariado: método de componentes principales*. Edtion ed.: Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, 1986. ISBN 0827024517.

Planet Team (2017). Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth. San Francisco, CA. <https://api.planet.com>

PONTIUS, R. G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2000, 66(8), 1011-1016.

PREPARATA, F. P. y SHAMOS, M. I. Introduction. In *Computational Geometry*. Springer, 1985, p. 1-35.

QUADRI DE LA TORRE, G. Incendios Forestales y Deforestación en México: una Perspectiva Analítica. Comisión de estudios del sector privado para el desarrollo sustentable (CESPEDES), México. In., 2000.

QUINTANA, B. I., CARRERA, C. y ENRIQUE, L. Propuesta de un plan de contingencia contra incendios forestales para el Refugio de Vida Silvestre Laquipampa y su zona de amortiguamiento, 2017 2018.

RAMOS, A. B. R., DO NASCIMENTO, E. R. P. y DE OLIVEIRA, M. J. Temporada de incêndios florestais no Brasil em 2010: análise de série histórica de 2005 a 2010 e as influências das chuvas e do desmatamento na quantidade dos focos de calor 2011.

RODRIGUES, R. P. y BORGES, E. F. Identificação das zonas de ocorrência de incêndios no Parque Nacional da Chapada Diamantina-BA. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.8043, 2011.

RODRÍGUEZ-TREJO, D. A. Incendios forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Multi-Prensa. México, 1996.

RODRIGUEZ, A. Cartografía multitemporal de quemas e incendios forestales en Bolivia: Detección y validación post-incendio. *Ecología en Bolivia*, 2012, 47(1), 53-71.

RODRIGUEZ, M. Incendios forestales. *El Ecologista*, 2000, (21), 36-39.

ROY, D. P., WULDER, M., LOVELAND, T., WOODCOCK, C., ALLEN, R., ANDERSON, M., HELDER, D., IRONS, J., JOHNSON, D. y KENNEDY, R. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 145, 154-172.

SALINERO, C., SALINERO, E. C., VIOLA, A. B. B. V., MACLEAN, A. S. A. S., GOODMAN, R. E., KRYNINE, D. P. y WILLIAM, R. *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Edtion ed.: Ariel, 2006. ISBN 8434480727.

SANTOS, C. D., SOUZA, U. D. y SILVA, W. Quantificação dos focos de calor na Meso-região do Extremo Oeste Baiano. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, 7926-7933.

SINGH, A. y HARRISON, A. Standardized principal components. *International journal of remote sensing*, 1985, 6(6), 883-896.

SOKENG, V.-C. J., KOUAMÉ, F., N'DA, H. D., TANKOANO, B., YOU, L. A. y NGATCHA, B. N. Cartographie de l'occupation de sol des Hauts Plateaux de l'Ouest Cameroun par réseaux de neurones appliqués à une image LANDSAT 8 OLI [Mapping land cover in Western Cameroon Highlands using neural networks applied to a Landsat 8 OLI image] 2016.

TONATTO, M. J., FERNÁNDEZ DE ULLIVARRI, J., ALONSO, J. M. y ROMERO, E. R. Teledetección de quema de cañaverales en la provincia de Tucumán (Argentina) mediante sistema MODIS. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 2008, 85(1), 31-35.

TRINIDADE, A. y CARVALHO, M. Análise e quantificação de focos de calor utilizando satélites NOAA-12 e NOAA-15 no estado de Mato Grosso. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.7888*, 2011.

UHL, C. y KAUFFMAN, J. B. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. *Ecology*, 1990, 71(2), 437-449.

UNFCCC Decision 5/CP.6, Implementation of the Buenos Aires Plan of Action. UNFCCC Document FCCC/CP/2001/L.7 2001.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). United States Geological Survey. Earth Explore with imagery gallery Landsat. In., 2018, vol. 2018, p. Descarga de imágenes de satélite Landsat.

VALENCIA, J. y GONZÁLEZ, J. Estimación del estado del tiempo utilizando los modelos numéricos WRF y GFS para un sistema de alerta temprana ante eventos climáticos extremos. *Ciencia e Ingeniería*, 2017, 3(2), 6-6.

VAN WAGTENDONK, J. W., ROOT, R. R. y KEY, C. H. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(3), 397-408.

VERHEGGHEN, A., EVA, H., CECCHERINI, G., ACHARD, F., GOND, V., GOURLET-FLEURY, S. y CERUTTI, P. O. The potential of sentinel satellites for burnt area mapping and monitoring in the Congo Basin forests. *Remote Sensing*, 2016, 8(12), 986.

XIUWAN, C. Using remote sensing and GIS to analyse land cover change and its impacts on regional sustainable development. *International journal of remote sensing*, 2002, 23(1), 107-124.

YAGOUB, Y. E., BO, Z., DING-MIN, J., JAHELNABI, A. E. y FADOUL, S. M. Land Use and Land Cover Change in Northeast Gadarif State: Case of El Rawashda Forest, Sudan. *Journal of Geographic Information System*, 2015, 7(02), 140.

ZAMORA, A. Estudio metodológico para el monitoreo de alertas tempranas de deforestación basado en focos de calor en la Amazonía peruana. Universidad Nacional Agraria La Molina, 2016.

ANEXOS

Anexo 1. Puntos de muestreo tomados en campo en el distrito de Las Piedras, Tambopata – Madre de Dios.

| Numero | Categoría | Este | Norte |
|---------------|-------------------------|-------------|--------------|
| 1 | Cicatriz o área quemada | 488394 | 8680773 |
| 2 | Cicatriz o área quemada | 488548 | 8680699 |
| 3 | Cicatriz o área quemada | 488683 | 8680633 |
| 4 | Cicatriz o área quemada | 486034 | 8679550 |
| 5 | Cicatriz o área quemada | 485328 | 8676402 |
| 6 | Cicatriz o área quemada | 485253 | 8676103 |
| 7 | Cicatriz o área quemada | 485197 | 8675686 |
| 8 | Cicatriz o área quemada | 485092 | 8674491 |
| 9 | Cicatriz o área quemada | 485092 | 8674491 |
| 10 | Cicatriz o área quemada | 485242 | 8671321 |
| 11 | Cicatriz o área quemada | 485359 | 8670719 |
| 12 | Cicatriz o área quemada | 485455 | 8670011 |
| 13 | Cicatriz o área quemada | 485492 | 8669705 |
| 14 | Cicatriz o área quemada | 485513 | 8669569 |
| 15 | Cicatriz o área quemada | 485567 | 8669220 |
| 16 | Cicatriz o área quemada | 485771 | 8667578 |
| 17 | Cicatriz o área quemada | 485805 | 8667308 |
| 18 | Cicatriz o área quemada | 485876 | 8666763 |
| 19 | Cicatriz o área quemada | 487039 | 8664288 |
| 20 | Cicatriz o área quemada | 487057 | 8663775 |
| 21 | Cicatriz o área quemada | 487105 | 8662896 |
| 22 | Cicatriz o área quemada | 488284 | 8662470 |
| 23 | Cicatriz o área quemada | 488661 | 8661678 |
| 24 | Cicatriz o área quemada | 488252 | 8661468 |
| 25 | Cicatriz o área quemada | 487640 | 8661384 |
| 26 | Cicatriz o área quemada | 486925 | 8658804 |
| 27 | Cicatriz o área quemada | 487009 | 8658363 |
| 28 | Cicatriz o área quemada | 488991 | 8659413 |
| 29 | Cicatriz o área quemada | 487424 | 8655290 |
| 30 | Cicatriz o área quemada | 486575 | 8655205 |
| 31 | Cicatriz o área quemada | 486289 | 8655267 |
| 32 | Cicatriz o área quemada | 486292 | 8655268 |
| 33 | Cicatriz o área quemada | 486392 | 8654662 |
| 34 | Cicatriz o área quemada | 486400 | 8654663 |
| 35 | Cicatriz o área quemada | 487545 | 8654368 |
| 36 | Cicatriz o área quemada | 487617 | 8653830 |
| 37 | Cicatriz o área quemada | 487174 | 8652117 |
| 38 | Cicatriz o área quemada | 487027 | 8652060 |
| 39 | Cicatriz o área quemada | 486846 | 8651808 |
| 40 | Cicatriz o área quemada | 486677 | 8651544 |

| | | | |
|----|-------------------------|--------|---------|
| 41 | Cicatriz o área quemada | 486563 | 8651342 |
| 42 | Cicatriz o área quemada | 486445 | 8651134 |
| 43 | Cicatriz o área quemada | 486185 | 8650668 |
| 44 | Cicatriz o área quemada | 485981 | 8650302 |
| 45 | Cicatriz o área quemada | 485902 | 8649905 |
| 46 | Cicatriz o área quemada | 487552 | 8648037 |
| 47 | Cicatriz o área quemada | 487215 | 8648620 |
| 48 | Cicatriz o área quemada | 487268 | 8648967 |
| 49 | Cicatriz o área quemada | 487257 | 8649083 |
| 50 | Cicatriz o área quemada | 486976 | 8649416 |
| 51 | Cicatriz o área quemada | 486895 | 8649447 |
| 52 | Cicatriz o área quemada | 486711 | 8649533 |
| 53 | Cicatriz o área quemada | 485429 | 8649313 |
| 54 | Cicatriz o área quemada | 485141 | 8648792 |
| 55 | Cicatriz o área quemada | 484839 | 8648252 |
| 56 | Cicatriz o área quemada | 484696 | 8647998 |
| 57 | Cicatriz o área quemada | 484595 | 8647824 |
| 58 | Cicatriz o área quemada | 484403 | 8647477 |
| 59 | Cicatriz o área quemada | 483771 | 8647649 |
| 60 | Cicatriz o área quemada | 484148 | 8647024 |
| 61 | Cicatriz o área quemada | 484083 | 8646549 |
| 62 | Cicatriz o área quemada | 484058 | 8646280 |
| 63 | Cicatriz o área quemada | 484013 | 8645853 |
| 64 | Cicatriz o área quemada | 483974 | 8645526 |
| 65 | Cicatriz o área quemada | 483908 | 8644911 |
| 66 | Cicatriz o área quemada | 483893 | 8644758 |
| 67 | Cicatriz o área quemada | 483846 | 8644269 |
| 68 | Cicatriz o área quemada | 483600 | 8643324 |
| 69 | Cicatriz o área quemada | 483190 | 8642197 |
| 70 | Cicatriz o área quemada | 483033 | 8642117 |
| 71 | Cicatriz o área quemada | 482747 | 8641774 |
| 72 | Cicatriz o área quemada | 482444 | 8641418 |
| 73 | Cicatriz o área quemada | 482191 | 8641119 |
| 74 | Cicatriz o área quemada | 482071 | 8640973 |
| 75 | Cicatriz o área quemada | 481524 | 8640334 |
| 76 | Cicatriz o área quemada | 481282 | 8639475 |
| 77 | Cicatriz o área quemada | 481437 | 8638989 |
| 78 | Cicatriz o área quemada | 481540 | 8638687 |
| 79 | Cicatriz o área quemada | 481856 | 8637762 |
| 80 | Cicatriz o área quemada | 482009 | 8637335 |
| 81 | Cicatriz o área quemada | 482323 | 8636374 |
| 82 | Cicatriz o área quemada | 482523 | 8635775 |
| 83 | Cicatriz o área quemada | 482022 | 8635044 |
| 84 | Cicatriz o área quemada | 482799 | 8634986 |
| 85 | Cicatriz o área quemada | 482980 | 8634473 |

| | | | |
|-----|-------------------------|--------|---------|
| 86 | Cicatriz o área quemada | 483485 | 8633050 |
| 87 | Cicatriz o área quemada | 483749 | 8632297 |
| 88 | Cicatriz o área quemada | 483838 | 8631376 |
| 89 | Cicatriz o área quemada | 482588 | 8610225 |
| 90 | Cicatriz o área quemada | 482539 | 8610172 |
| 91 | Cicatriz o área quemada | 482603 | 8611031 |
| 92 | Cicatriz o área quemada | 482801 | 8610830 |
| 93 | Cicatriz o área quemada | 483081 | 8610533 |
| 94 | Cicatriz o área quemada | 484467 | 8613393 |
| 95 | Cicatriz o área quemada | 485010 | 8613921 |
| 96 | Cicatriz o área quemada | 485206 | 8613946 |
| 97 | Cicatriz o área quemada | 485588 | 8613677 |
| 98 | Cicatriz o área quemada | 486319 | 8613989 |
| 99 | Cicatriz o área quemada | 486830 | 8613855 |
| 100 | Cicatriz o área quemada | 487094 | 8613847 |
| 101 | Cicatriz o área quemada | 487312 | 8613973 |
| 102 | Cicatriz o área quemada | 487629 | 8614134 |
| 103 | Cicatriz o área quemada | 487922 | 8614113 |
| 104 | Cicatriz o área quemada | 491375 | 8614874 |
| 105 | Cicatriz o área quemada | 492234 | 8615141 |
| 106 | Cicatriz o área quemada | 493869 | 8616284 |
| 107 | Cicatriz o área quemada | 494592 | 8616471 |
| 108 | Cicatriz o área quemada | 495497 | 8615740 |
| 109 | Cicatriz o área quemada | 495663 | 8615901 |
| 110 | Cicatriz o área quemada | 495768 | 8616456 |
| 111 | Cicatriz o área quemada | 496703 | 8618032 |
| 112 | Cicatriz o área quemada | 496835 | 8618321 |
| 113 | Cicatriz o área quemada | 497089 | 8618553 |
| 114 | Cicatriz o área quemada | 497434 | 8619113 |
| 115 | Cicatriz o área quemada | 498038 | 8619713 |
| 116 | Cicatriz o área quemada | 498360 | 8619898 |
| 117 | Cicatriz o área quemada | 498651 | 8619929 |
| 118 | Cicatriz o área quemada | 498861 | 8619926 |
| 119 | Cicatriz o área quemada | 499299 | 8619886 |
| 120 | Cicatriz o área quemada | 499580 | 8619812 |
| 121 | Cicatriz o área quemada | 499793 | 8619746 |
| 122 | Cicatriz o área quemada | 500387 | 8619640 |
| 123 | Cicatriz o área quemada | 500391 | 8619639 |
| 124 | Cicatriz o área quemada | 495893 | 8617047 |
| 125 | Cicatriz o área quemada | 492986 | 8616349 |
| 126 | Cicatriz o área quemada | 490700 | 8614363 |
| 127 | Cicatriz o área quemada | 487190 | 8614231 |
| 128 | Cicatriz o área quemada | 487464 | 8614722 |
| 129 | Cicatriz o área quemada | 489806 | 8615303 |
| 130 | Cicatriz o área quemada | 482726 | 8608847 |

| | | | |
|-----|-------------------------|--------|---------|
| 131 | Cicatriz o área quemada | 483061 | 8609685 |
| 132 | Cicatriz o área quemada | 483428 | 8610105 |
| 133 | Cicatriz o área quemada | 483491 | 8610254 |
| 134 | Cicatriz o área quemada | 485736 | 8607138 |
| 135 | Cicatriz o área quemada | 487936 | 8607830 |
| 136 | Cicatriz o área quemada | 489045 | 8608295 |
| 137 | Cicatriz o área quemada | 489517 | 8609193 |
| 138 | Cicatriz o área quemada | 489918 | 8609621 |
| 139 | Cicatriz o área quemada | 489615 | 8609547 |
| 140 | Cicatriz o área quemada | 487026 | 8610860 |
| 141 | Cicatriz o área quemada | 489058 | 8613630 |
| 142 | Cicatriz o área quemada | 489053 | 8613629 |
| 143 | Cicatriz o área quemada | 488190 | 8612583 |
| 144 | Cicatriz o área quemada | 487440 | 8611336 |
| 145 | Cicatriz o área quemada | 485490 | 8609124 |
| 146 | Cicatriz o área quemada | 485301 | 8608091 |
| 147 | Cicatriz o área quemada | 485648 | 8607647 |
| 148 | Cicatriz o área quemada | 486943 | 8608037 |
| 149 | Cicatriz o área quemada | 487367 | 8608375 |
| 150 | Cicatriz o área quemada | 487909 | 8608930 |
| 151 | Cicatriz o área quemada | 492176 | 8610355 |
| 152 | Cicatriz o área quemada | 491264 | 8610106 |
| 153 | Cicatriz o área quemada | 491246 | 8611103 |
| 154 | Cicatriz o área quemada | 491537 | 8611344 |
| 155 | Cicatriz o área quemada | 489799 | 8610165 |
| 156 | Cicatriz o área quemada | 487846 | 8608893 |
| 157 | Cicatriz o área quemada | 486113 | 8607829 |
| 158 | Cicatriz o área quemada | 485894 | 8607749 |
| 159 | Cicatriz o área quemada | 484624 | 8608233 |
| 160 | Cicatriz o área quemada | 483311 | 8608549 |
| 161 | Cicatriz o área quemada | 484836 | 8614631 |
| 162 | Cicatriz o área quemada | 485053 | 8615209 |
| 163 | Cicatriz o área quemada | 485093 | 8615318 |
| 164 | Cicatriz o área quemada | 485726 | 8615568 |
| 165 | Cicatriz o área quemada | 486371 | 8615641 |
| 166 | Cicatriz o área quemada | 486540 | 8615728 |
| 167 | Cicatriz o área quemada | 486918 | 8615858 |
| 168 | Cicatriz o área quemada | 486863 | 8615965 |
| 169 | Cicatriz o área quemada | 485978 | 8615615 |
| 170 | Cicatriz o área quemada | 485239 | 8615714 |
| 171 | Cicatriz o área quemada | 484987 | 8616650 |
| 172 | Cicatriz o área quemada | 485007 | 8617034 |
| 173 | Cicatriz o área quemada | 485029 | 8617230 |
| 174 | Cicatriz o área quemada | 484268 | 8618589 |
| 175 | Cicatriz o área quemada | 485271 | 8618655 |

| | | | |
|-----|-------------------------|--------|---------|
| 176 | Cicatriz o área quemada | 484569 | 8619652 |
| 177 | Cicatriz o área quemada | 484687 | 8619663 |
| 178 | Cicatriz o área quemada | 484989 | 8619714 |
| 179 | Cicatriz o área quemada | 485171 | 8619745 |
| 180 | Cicatriz o área quemada | 485609 | 8619817 |
| 181 | Cicatriz o área quemada | 486959 | 8620090 |
| 182 | Cicatriz o área quemada | 487365 | 8620138 |
| 183 | Cicatriz o área quemada | 485116 | 8620262 |
| 184 | Cicatriz o área quemada | 484896 | 8620181 |
| 185 | Cicatriz o área quemada | 484688 | 8620273 |
| 186 | Cicatriz o área quemada | 484721 | 8620564 |
| 187 | Cicatriz o área quemada | 484759 | 8620933 |
| 188 | Cicatriz o área quemada | 484775 | 8621077 |
| 189 | Cicatriz o área quemada | 482956 | 8623065 |
| 190 | Cicatriz o área quemada | 482977 | 8623727 |
| 191 | Cicatriz o área quemada | 482316 | 8623727 |
| 192 | Cicatriz o área quemada | 481817 | 8624796 |
| 193 | Cicatriz o área quemada | 481834 | 8624708 |
| 194 | Cicatriz o área quemada | 482263 | 8622467 |
| 195 | Cicatriz o área quemada | 481777 | 8622321 |
| 196 | Cicatriz o área quemada | 481902 | 8622336 |
| 197 | Cicatriz o área quemada | 484536 | 8623498 |
| 198 | Cicatriz o área quemada | 484710 | 8623151 |
| 199 | Cicatriz o área quemada | 484768 | 8623049 |
| 200 | Cicatriz o área quemada | 485538 | 8622890 |
| 201 | Cicatriz o área quemada | 485695 | 8622997 |
| 202 | Cicatriz o área quemada | 486408 | 8623102 |
| 203 | Cicatriz o área quemada | 485632 | 8625037 |
| 204 | Cicatriz o área quemada | 485490 | 8625604 |
| 205 | Cicatriz o área quemada | 485445 | 8625795 |
| 206 | Cicatriz o área quemada | 485400 | 8625989 |
| 207 | Cicatriz o área quemada | 485313 | 8626349 |
| 208 | Cicatriz o área quemada | 485229 | 8626703 |
| 209 | Cicatriz o área quemada | 485104 | 8627232 |
| 210 | Cicatriz o área quemada | 485032 | 8627540 |
| 211 | Cicatriz o área quemada | 484969 | 8627820 |
| 212 | Cicatriz o área quemada | 484944 | 8627949 |
| 213 | Cicatriz o área quemada | 484874 | 8628304 |
| 214 | Cicatriz o área quemada | 484784 | 8628759 |
| 215 | Cicatriz o área quemada | 484702 | 8629235 |
| 216 | Cicatriz o área quemada | 484608 | 8629739 |
| 217 | Cicatriz o área quemada | 484568 | 8629880 |
| 218 | Cicatriz o área quemada | 484489 | 8630154 |
| 219 | Cicatriz o área quemada | 478288 | 8631540 |
| 220 | Cicatriz o área quemada | 480868 | 8634554 |

| | | | |
|-----|-------------------------|--------|---------|
| 221 | Cicatriz o área quemada | 482074 | 8635823 |
| 222 | Cicatriz o área quemada | 479999 | 8635957 |
| 223 | Cicatriz o área quemada | 479163 | 8635927 |
| 224 | Cicatriz o área quemada | 479970 | 8635971 |
| 225 | Cicatriz o área quemada | 480050 | 8635944 |
| 226 | Cicatriz o área quemada | 480905 | 8635804 |
| 227 | Cicatriz o área quemada | 481884 | 8635783 |
| 228 | Cicatriz o área quemada | 480696 | 8640442 |
| 229 | Cicatriz o área quemada | 480445 | 8640611 |

Anexo 2. Panel fotográfico.



Figura 19. Captura de puntos UTM de cicatrices de quema.



Figura 20. Captura de puntos UTM de cicatrices de quema.



Figura 21. Captura de puntos UTM de cicatrices de quema.



Figura 22. Acezando al punto UTM de cicatrices de quema.