



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

**APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES PARA
ESTIMACIÓN DE ÁREAS QUEMADAS DESDE UNA PERSPECTIVA
MULTITEMPORAL EN LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO**

TRABAJO DE TITULACIÓN

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA TITULACIÓN DE GRADO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER

EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL

ESTEBAN DAVID TOAZA PATIÑO

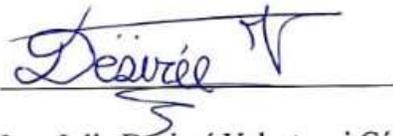
RIOBAMBA – ECUADOR

2019

HOJA DE CERTIFICACIÓN

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA, que el trabajo de investigación titulado: **APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES PARA ESTIMACIÓN DE ÁREAS QUEMADAS DESDE UNA PERSPECTIVA MULTITEMPORAL EN LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO** de responsabilidad del señor Esteban David Toaza Patiño, ha sido prolijamente revisado, quedando autorizada su presentación.

TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN

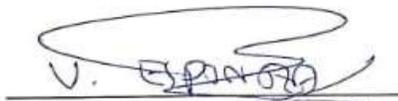


Ing. Julia Desiree Velastegui Cáceres

DIRECTORA

14 - 11 - 2019

FECHA



Ing. Víctor Manuel Espinoza

ASESOR

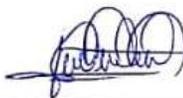
14 - 11 - 2019

FECHA

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Esteban David Toaza Patiño, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.



Esteban David Toaza Patiño

172085972-5

AUTORÍA

La autoría del presente trabajo investigativo es de propiedad intelectual del autor y de la carrera de Ingeniería Forestal de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Esteban David Toaza Patiño

172085972-5

DEDICATORIA

A mis padres, Rubén y Nancy por su apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida que siempre me motivan para cumplir todas las metas que me he propuesto y me motivaron día tras día durante mi formación académica.

A mis hermanos Elizabeth, Aldo y Daniela, crecer y seguirlo haciendo día a día junto a ustedes ha sido el mejor regalo que la vida me pudo haber dado.

A mis sobrinos Emilia, Valentina e Iker, quienes desde su nacimiento se convirtieron en una gran fuente de inspiración para lograr ser un gran profesional y enseñarles que el esfuerzo demanda grandes esfuerzos y sacrificios.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar gracias a Dios que en los momentos más difíciles de mi vida siempre me lleno de fortaleza y enjundia para no rendirme y seguir adelante. A mis padres y hermanos por ser el motor en cada aspecto de mi vida.

A mis maestros, aquellos que a lo largo de mi formación académica me nutrieron de conocimientos. Un agradecimiento especial a la Ing. Julia Velastegui e Ing. Víctor Espinoza, quienes me guiaron y brindaron todos sus conocimientos y experiencias que fueron de gran valía para la elaboración del presente trabajo de investigación, convirtiéndose así en pilares fundamentales del mismo.

A mis mejores amigos Jennifer Moncada, Diego Arcos y Juan Guerra quienes se convirtieron en una segunda familia y me brindaron su apoyo y motivación en los momentos de flaqueza.

A todos los amigos que hice al cursar esta maravillosa carrera que de una u otra forma se volvieron parte de mi vida y ayudaron a la consecución de este objetivo.

TABLA DE CONTENIDO

Contenido	Página
Lista de Figuras.....	i
Lista de Tablas.....	ii
Lista de Gráficos.....	ii
Lista de Mapas.....	iii
Simbología y Siglas.....	iv
I. TEMA	1
II. INTRODUCCIÓN.....	1
A. JUSTIFICACIÓN	3
B. OBJETIVOS	4
1. General	4
2. Específicos	4
C. HIPÓTESIS.....	4
1. Hipótesis Nula	4
2. Hipótesis Alternante	4
III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
A. LA TELEDETECCIÓN	5
1. Naturaleza de las radiaciones electromagnéticas	5
2. El espectro electromagnético.....	6
3. Interacción con los objetos	7
4. Interacción de la atmósfera con la radiación electromagnética	8
a. Absorción	8

b. Dispersión	9
c. Emisión	9
C. FIRMAS ESPECTRALES	10
1. Tipos de firmas espectrales	10
2. Respuestas espectrales.....	10
a. Respuesta espectral del agua.....	10
b. Respuesta espectral del suelo.....	11
c. Respuesta espectral de la vegetación	12
D. SENSORES REMOTOS.....	13
1. Tipos de sensores.....	13
a. Sensores pasivos	13
b. Sensores activos.....	13
2. Resolución de los sensores remotos	13
a. Resolución espacial.....	13
b. Resolución espectral	15
c. Resolución radiométrica	16
d. Resolución temporal	17
E. TIPOS DE IMÁGENES DE TELEDETECCIÓN	18
1. Imagen multiespectral (MS).....	18
2. Imagen pancromática (PAN).....	18
3. Imagen fusionada (PS)	18
4. Imagen estéreo.....	19
F. SATÉLITES.....	19
G. SATÉLITE LANDSAT.....	19
1. Satélite Landsat 8	19

H. SATELITE SENTINEL	20
1. Niveles de procesamiento.....	21
I. INSTRUMENTO MODIS.....	22
1. Descripción del producto satelital MCD64A1	24
a. Capas de datos.....	24
J. IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA GESTIÓN DE INCENDIOS FORESTALES.....	25
H. DELIMITACIÓN DE ÁREAS QUEMADAS MEDIANTE TELEDETECCIÓN.	26
1. Normalized Burn Ratio (NBR).....	27
2. Índice de Vegetación Normalizada (NDVI).....	27
L. ESTUDIO DEL GRADO DE SEVERIDAD	27
1. Análisis de severidad mediante NBR	28
2. Análisis de severidad mediante NDVI	28
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
A. CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR.....	30
1. Localización y Ubicación geográfica.....	30
Fuente: (Autor, 2019)2. Condiciones climáticas.....	31
2. Hidrología	32
3. Precipitación.....	32
4. Temperatura	32
5. Clasificación ecológica	33
B. MATERIALES	36
1. Materiales informáticos.....	36
2. Equipos.....	36
C. METODOLOGÍA	37

1.	Esquema de trabajo	37
2.	Identificación de áreas quemadas.....	38
	a. Recopilación del producto MODIS MCD64A1	38
	b. Reproyección del producto MODIS MCD64A1	38
	c. Corte del producto MODIS MCD64A1	38
	d. Identificación de píxeles con quema.....	39
3.	Digitalización de áreas quemadas	40
4.	Validación de áreas quemadas	41
	a. Validación de áreas de quemas mediante Teledetección.	41
	Recopilación de imágenes satelitales Landsat 8 y Sentinel 2.	41
	b. Contraste de los datos con registros de incendios existentes mediante la plataforma DesInventar	43
5.	Delimitación de áreas afectadas por incendios forestales	44
	a. Pre-procesamiento de imágenes satelitales	45
	b. Cálculo de NBR	45
6.	Determinación de la severidad de los incendios forestales	48
	a. Severidad mediante la diferencia de NBR	48
	b. Severidad mediante NDVI.....	49
7.	Análisis de los resultados obtenidos	50
8.	Presentación de Resultados	51
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
1.	Resultados Generales.....	51
	a. Incendios forestales por año.....	51
	b. Incendios forestales a nivel Cantonal	52
2.	Superficie afectada	54

a. Coberturas afectadas	56
3. Severidad de los incendios forestales	58
a. Mediante NBR	58
Fuente: (Autor, 2019)b. Mediante NDVI	59
VI. CONCLUSIONES63
VII. RECOMENDACIONES53
VIII. RESUMEN53
IX. SUMMARY53
X. BIBLIOGRAFÍA67
XI ANEXOS73

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Espectro electromagnético	6
Figura 2. Tipos de interacción de la radiación con la materia.	8
Figura 3. Clorofila en el agua	11
Figura 4. Comportamiento espectral de algunos tipos de suelo.	12
Figura 5. Niveles de reflectancia para los diferentes tipos de vegetación.	12
Figura 6. Formato de una imagen digital (7 x 9 píxeles).	14
Figura 7. Imágenes con distinta resolución espacial: 2 m/píxel (izquierda) frente a 0,5 m/píxel(derecha)	14
Figura 8. Bandas espectrales de diferentes sensores de teledetección.	16
Figura 9. Imagen original captada por el satélite (izquierda). Imagen corregida del efecto atmosférico (derecha).	17
Figura 10. Mayor resolución temporal gracias a la reorientación de sensores en pases consecutivos.	17
Figura 11. Cuadrícula global MODIS.	22
Figura 12. Esquema metodológico.	37
Figura 13. Producto MODIS MCD64A1 para la zona de estudio.	39
Figura 14. Lugares que registraron quema imagen producto MCD64A1 para el mes de septiembre año 2015.	40
Figura 15. Imagen Landsat 8, 15 de noviembre del 2016.	41
Figura 16. Imagen Sentinel 2A, 29 de septiembre del 2018.	42
Figura 17. Combinación de bandas (12,8,4) imagen Sentinel 2A para delimitación de área afectada por incendio 29 de agosto del 2018.	43
Figura 18. Interfaz de la base de datos de DesInventar para incendios forestales en la provincia de Chimborazo.	44
Figura 19. Diagrama de procesamiento.	45
Figura 20. Índices NBR pre y post incendio ocurrido 29 de agosto del 2018.	46
Figura 21. Valores utilizados para la reclasificación para delimitación de áreas quemadas.	47

Figura 22. Valores de reclasificación para determinar severidad de incendios forestales ..	48
Figura 23. Tabla de atributos de archivo shp (NBR) severidad del incendio del 29 de agosto del 2018.....	49
Figura 24. Tabla de atributos de archivo shp (NDVI) severidad del incendio del 29 de agosto del 2018.....	50

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1. Clasificación del espectro electromagnético.....	7
Tabla 2. Escala del mapa mediante la resolución espacial (m).....	15
Tabla 3. Característica imagen LandSat 8.	20
Tabla 4. Característica imagen SENTINEL-2.	21
Tabla 5. Resoluciones de las imágenes MODIS.	23
Tabla 6. Resoluciones de las imágenes MODIS.	24
Tabla 7. Capas producto satelital MCD64A1.	25
Tabla 8. Rango de valores de severidad post-incendio.....	28
Tabla 9. Clases de actividad fotosintética.	29
Tabla 10. Ecosistemas presentes en áreas de afectación.....	33
Tabla 11. Codificación de incendios forestales	54

LISTA DE GRÁFICOS

Figura	Página
Gráfico 1. Incendios forestales analizados por año	52
Gráfico 2. Incendios forestales por cantones	52
Gráfico 3. Área afectada por incendios forestales (ha).....	54
Gráfico 4. Coberturas vegetales afectadas por incendios forestales (ha).....	56
Gráfico 5. Severidad de los incendios forestales (ha).....	58
Gráfico 6. Actividad fotosintética de la vegetación pre incendios	60
Gráfico 7. Actividad fotosintética de la vegetación post incendios	60

LISTA DE MAPAS

Mapa	Página
Mapa 1. Ubicación de la zona de estudio	31
Mapa 2. Ubicación incendios determinados en la provincia de Chimborazo periodo 2015-2018	53
Mapa 3. Área de afectación incendio suscitado entre el 15 al 20 de septiembre del 2015	55
Mapa 4. Coberturas vegetales afectadas por el incendio forestal suscitado entre el 15 al 20 de septiembre del 2015	57
Mapa 5. Severidad del incendio suscitado el 27 de agosto del 2018	59
Mapa 6. <i>Actividad fotosintética antes del incendio ocurrido el 27 de agosto del 2018</i>	61
Mapa 7. <i>Actividad fotosintética después del incendio ocurrido el 27 de agosto del 2018</i>	62

SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

Art.	Artículo
EOS	Earth Observing System
ESA	European Space Agency
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
GPS	Global Position System
HDF	Hierarchical Data Format
IGM	Instituto Geográfico Militar
LDCM	Misión de Continuidad de Datos de LandSat
MAE	Ministerio Del Ambiente de Ecuador
MCD	MODIS combined Terra/Aqua Products
MCD64A1	MODIS Burned Area Product Level 3
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Normalizaed Burn Ratio
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PDOT	Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial
SIG	Sistema de Información Geográfica
SNDGR	Sistema Nacional Descentralizado de Gestión de Riesgos
SNGR	Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos
SIN	Sistema Nacional de Información
TIRS	Sensor Térmico Infrarrojo
TM	Thematic Sensor
USGS	United States Geological Survey

I. APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES PARA ESTIMACIÓN DE ÁREAS QUEMADAS DESDE UNA PERSPECTIVA MULTITEMPORAL EN LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO.

II. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial los incendios forestales son considerados una catástrofe natural de primera magnitud. Es un fenómeno global que afecta a una gran variedad de ecosistemas en todo el planeta llegando a devastar cerca de 350 millones de hectáreas por año. Las quemaduras de biomasa producto de incendios forestales y agrícolas son la segunda mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, porque durante la combustión de la vegetación se liberan gases como dióxido de carbono o metano, óxidos de nitrógeno y aerosoles, todos estos son serios contaminantes atmosféricos (Corti, 2014). Los incendios forestales representan un elemento medioambiental de carácter global; que influye en la vegetación, biodiversidad, reservas de carbono y cambio en el uso del suelo. El fuego es un agente de cambio preponderante afectando la estructura del ecosistema, el ciclo del carbono y de los nutrientes (Boschetti *et al.*, 2015).

El fuego es un actor natural de cambios sobre los ecosistemas naturales y colabora en el mantenimiento y evolución de los ecosistemas. El hombre al modificar el espacio, ha alterado el ciclo natural de incendios e incluso algunos siniestros adquieren dimensiones dramáticas al afectar económicamente su patrimonio. Por eso es imperativo contar con información precisa de cada siniestro (Michalijos & Uboldi, 2014).

Según el Ministerio del Ambiente (2016), en el Ecuador toda la información respecto a incendios forestales se encuentra dispersa e incluso no se cuenta con estadísticas oficiales de algunos años, sobre localización geográfica de áreas de afectadas por incendios forestales, número de eventos ocurridos, intensidad de los mismos, en el país no existe un levantamiento sistemático de información in-situ de las áreas afectadas por los incendios forestales. La información que se genera se basa en un análisis visual llevado a cabo por las entidades de respuesta y que incluye la localización de un punto de referencia tomado por medio de un GPS, así como la estimación del área y vegetación afectada.

En la Región Interandina de nuestro país hay lugares donde los incendios forestales son reincidentes y muy pocos se producen naturalmente. Al contrario, la gran mayoría de eventos tienen un origen antrópico como; fogatas que salen de control, quema de pajonales para la agricultura y ganadería, o incendios forestales provocados intencionalmente. La mayor incidencia de incendios forestales, se produce en la región Sierra, especialmente en épocas de verano, donde las condiciones climáticas son favorables para que los incendios se produzcan y desarrollen, los meses de mayor riesgo son agosto y en especial el mes de septiembre. Agosto y septiembre se caracterizan por altas temperaturas del aire, escasez de precipitaciones y fuertes vientos (Bustos *et al.*, 2019).

En la actualidad la teledetección surge como una alternativa viable para cartografiar y evaluar áreas quemadas, ya que provee una observación sistemática de toda la superficie y nos brinda información espectral sensible a la discriminación de la señal quemada (Heredia, 2003), El objetivo de este estudio es explorar el uso de información satelital para completar y complementar la información disponible en las bases de datos sobre incendios forestales de las instituciones competentes, mediante la obtención de datos espaciales georreferenciados de las áreas quemadas aplicando un análisis multitemporal para la provincia de Chimborazo.

A. JUSTIFICACIÓN

Los incendios de gran magnitud pueden dañar dramáticamente los hábitats. Este tipo de incendios, sobre todo si son de gran extensión, pueden eliminar la mayor parte e incluso totalmente la cubierta protectora que las especies vegetales proporcionan al suelo. (Botella-Martínez & Fernández-Manso, 2017). Según la Secretaría Nacional de Riesgos (SNGR, 2018), en el año 2018 los incendios forestales mayores o iguales a 2 hectáreas; han ocasionado la pérdida de 13452,6 hectáreas de cobertura vegetal en 929 eventos registrados y la provincia de Chimborazo con un total de 82 eventos reportados, esta se encuentra entre las cuatro provincias que reportan mayor número de incendio. La deficiencia de la información asociada a incendios forestales que existe en nuestro país no permite desarrollar sistemas de adaptación y mitigación en zonas que hayan tenido un alto grado de afectación por incendios forestales. La necesidad de información completa y actualizada de áreas afectadas por incendios forestales ha promovido el uso de tecnologías geoespaciales que actualmente presentan un acelerado desarrollo, generando información útil y rápida para el estudio y gestión integral de incendios forestal (Michalijos & Uboldi, 2014). La necesidad de encontrar soluciones oportunas a los problemas de mayor complejidad y manejar de forma eficiente la información, ha convertido a las Sistemas de Información Geográfica (SIG) y a los Sensores Remotos en herramientas clave cuando se trata de analizar, planificar y administrar los recursos naturales (Rodríguez & Arredondo, 2005). Se espera que el presente trabajo de investigación genere información útil sobre áreas afectadas por incendios forestales en la provincia de Chimborazo en los últimos años que sirvan como base para elaboración de planes integrales de gestión para incendios forestales. Además, con este estudio se desea promover la utilización de información geoespacial y aplicación de diferentes metodologías para la generación de información sobre incendios forestales.

B. OBJETIVOS

1. General

Aplicar tecnologías geoespaciales para la estimación de áreas quemadas desde una perspectiva multitemporal en la provincia de Chimborazo.

2. Específicos

- a. Delimitar las áreas afectadas por incendios forestales en la provincia de Chimborazo.
- b. Determinar la intensidad de los incendios forestales por medio de índices espectrales.

C. HIPÓTESIS

1. Hipótesis Nula

No es posible determinar áreas quemadas en la provincia de Chimborazo mediante la aplicación de tecnologías geoespaciales.

2. Hipótesis Alternante

Es posible determinar áreas quemadas en la provincia de Chimborazo mediante la aplicación de tecnologías geoespaciales.

III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A. LA TELEDETECCIÓN

La Teledetección es un técnica que nos permite generar imágenes de la superficie de la Tierra, por medio de sensores gracias a la interacción energética entre la Tierra y el sensor que puede ser por la reflexión de la energía natural o por la de energía generada por una fuente artificial y mediante el uso de una aplicación específica se logra interpretar esta interacción para su análisis, dicha interacción es conocida como radiación electromagnética que es mayormente emitida por el sol y es reflejada por los objetos presentes en la superficie terrestre (Chuvieco, 2000).

El flujo de radiación o la interacción energética entre los objetos y el sensor puede ser de tres tipos según su origen.

- Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado).
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico).
- Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar).

Las dos primeras técnicas de Teledetección son conocidas generalmente como teledetección pasiva, y la última es conocida también como teledetección activa. La radiación emitida o reflejada por los objetos hacia el sensor es almacenada en un formato digital, el que nos permite realizar un análisis de esta información y con esto el reconocimiento de las características de los objetos observados (Chuvieco, 2000).

1. Naturaleza de las radiaciones electromagnéticas

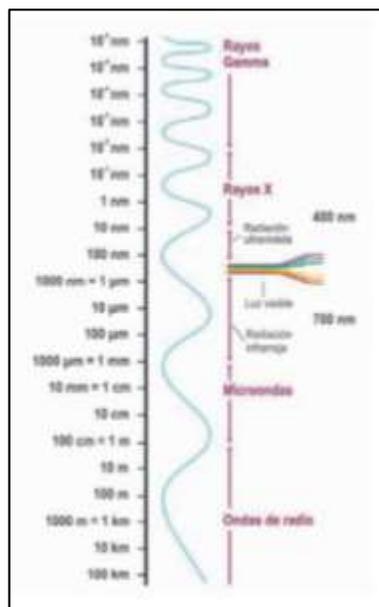
La radiación electromagnética es un tipo energía que puede ser percibida únicamente por su interacción con la materia, esta radiación electromagnética está formada por componentes eléctricos y magnéticos y es afectada por las mismas propiedades eléctricas y magnéticas de la materia con la que interactúa (Reuter, 2009).

2. El espectro electromagnético

Los ojos de los seres humanos se pueden considerar como sensores remotos ya que detectan la luz reflejada por los objetos de nuestro entorno. Sin embargo, la visión humana sólo es capaz de percibir una pequeña parte del espectro electromagnético, el visible.

La luz visible solo es una de varias formas de radiación electromagnética que existen. Así, también ondas de radio, el calor, los rayos ultravioletas o los rayos X son otras formas comunes. En teledetección, es normal caracterizar a las ondas electromagnéticas por su longitud de onda en micrómetros (μm , 10 m) o nanómetros (nm, 10 m), es decir, por la posición que ocupan dentro del espectro electromagnético (ver figura 1). Así es como se definen varias regiones del espectro. Cabe mencionar que no existen divisiones exactas entre las regiones, para una mejor comprensión se les asignan diferentes nombres a estas regiones (ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas, etc.), los sensores a bordo de los satélites de teledetección pueden detectar y grabar radiaciones de las regiones no visibles del espectro electromagnético, desde el ultravioleta hasta las microondas (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

Figura 1. Espectro electromagnético



Fuente: (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

Según Leonberger (2002). El espectro electromagnético es la radiación electromagnética que emite o absorbe cualquier objeto en la tierra, así como en el espacio estelar. Las ondas electromagnéticas contienen una amplia escala de longitudes y ondas y se las puede clasificar por medio de su principal fuente de producción. La energía electromagnética en una particular longitud de onda λ (en el vacío) tiene una frecuencia f asociada (ver tabla 1) y una energía de fotón. Por tanto, el espectro electromagnético puede ser expresado igualmente en cualquiera de esos términos.

Tabla 1. Clasificación del espectro electromagnético.

Región del espectro	Intervalo de frecuencias (Hz)
Radio-microondas	$0-3.0 \cdot 10^{12}$
Infrarrojo	$3.0 \cdot 10^{12}-4.6 \cdot 10^{14}$
Luz visible	$4.6 \cdot 10^{14}-7.5 \cdot 10^{14}$
Ultravioleta	$7.5 \cdot 10^{14}-6.0 \cdot 10^{16}$
Rayos X	$6.0 \cdot 10^{16}-1.0 \cdot 10^{20}$
Radiación gamma	$1.0 \cdot 10^{20}-\dots$

Fuente: (Leonberger, 2002).

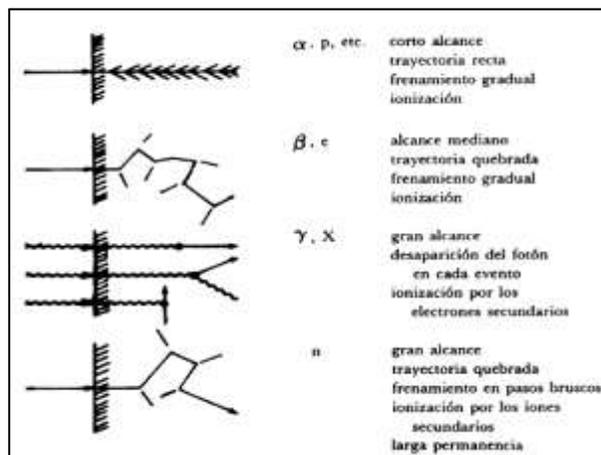
3. Interacción con los objetos

Para cualquier tipo de uso de la radiación, se debe contemplar dos principios fundamentales que son: penetración de la energía y depósito de energía. Como ya conocemos el origen de las radiaciones pueden ser atómicos o nucleares, por eso es de esperarse que sus efectos se den a nivel atómico o nuclear. Cuando la radiación penetrar en un material va a encontrar a su paso electrones y núcleos, pero la interacción se producirá en mayor parte con los electrones, ya que existen un número Z de electrones por cada núcleo. Teniendo en cuenta que los efectos más comunes son el de ionización y el de excitación atómica (Campbell, 1995).

Dependiendo de su interacción con la materia (ver figura 2) se puede agrupar a la radiación en 4 grupos: 1) Las partículas pesadas cargadas positivamente, que incluyen partículas alfa,

protones e iones pesados energéticos; 2) Las partículas ligeras cargadas, como electrones, betas y positrones; 3) Las radiaciones electromagnéticas, incluyendo rayos X y gamma; 4) Los neutrones (Campbell, 1995).

Figura 2. Tipos de interacción de la radiación con la materia.



Fuente: (Campbell, 1995).

4. Interacción de la atmósfera con la radiación electromagnética

Según Reuter (2009), al de considerar la radiación que existe entre el sol. La superficie terrestre y los satélites la atmosfera tiene un papel preponderante, ya que en el espacio exterior no hay perdida de radiación debido a la obstrucción de algún tipo de material, solo se produce una atenuación de acuerdo a la ley del cuadrado de la distancia. La atmosfera está formada por gases y aerosoles, debido a estos la atmosfera produce un triple efecto sobre la radiación:

- Absorción
- Dispersión
- Emisión.

a. Absorción

Los gases que conforman la atmosfera poseen la capacidad de absorber la radiación en distintas longitudes de onda dependiendo del tipo de gas, es así tenemos que:

- Ozono (O₃): Responsable de absorber la radiación ultravioleta.
- Dióxido de carbono (CO₂): Absorbe radiación en 13 – 17.5μ.
- Vapor de agua (H₂O): Absorbe radiación en 5.5 - 7μ y por encima de 27μ.

Por lo antes mencionado la atmosfera no produce absorción en algunas regiones del espectro, fenómeno que se conoce como ventanas atmosféricas, las cuales son las que utiliza la teledetección y las principales son: visible e infrarrojo cercano, infrarrojo cercano de onda corta, infrarrojo medio, infrarrojo térmico, microondas por encima de 20 μ la atmósfera es prácticamente transparente (Reuter, 2009).

b. Dispersión

La dispersión es la reflectancia de la radiación electromagnética por la presencia de partículas y/o gases en la atmosfera. Hay tres tipos de dispersión:

- Dispersión de Rayleigh, se da cuando la longitud de onda es mucho menor que el tamaño de los objetos responsables de la dispersión. Afecta por tanto a las longitudes de onda más cortas y provoca el color azul del cielo (Reuter, 2009).
- Dispersión de Mie, aquí la longitud de onda tiene el mismo orden de magnitud que los objetos dispersores (vapor de agua, polvo y aerosoles). Afecta a todas las longitudes de onda del visible (Reuter, 2009).
- Dispersión no selectiva, si la longitud de onda es mucho menor que los objetos, la producen gotas de agua en la atmósfera (Reuter, 2009).

c. Emisión

Es la refracción de la energía electromagnética por medio de los gases y partículas que constituyen la atmosfera, las cuales ocasionan que esta emisión se realice en forma recta en su lugar se da a manera de ondas (Reuter, 2009).

C. FIRMAS ESPECTRALES

Es la capacidad de los objetos de absorber, reflejar o emitir energía electromagnética, la misma que es distinta y única para cada uno de los elementos de la naturaleza, y gracias a esto nos permite identificarlos mediante capturas de las diferentes porciones del espectro con el uso de sensores remotos (Haydee, 2001).

1. Tipos de firmas espectrales

Según las características de captura de la información por parte del sensor podemos clasificarlos en los siguientes tipos de firmas espectrales:

- Firmas monobandas: la firma espectral del elemento únicamente es la respuesta espectral dentro de un solo canal disponible (Abreu, 2017).
- Firmas multibandas: las firmas están contenidas en varios canales caracterizados individualmente por el intervalo del ancho de onda total. Otros satélites pueden ofrecer más canales incluso casos extremos que son alguna toma en hiperefrecuencias activas alcanzando más de cien canales (Abreu, 2017).
- Firmas de origen opcional: la toma de algunos factores fijados previamente por el usuario para un posterior tratamiento de la información en función de los mismos factores (Abreu, 2017).

2. Respuestas espectrales

Una firma espectral está constituida por señales registradas por los sensores remotos en distintas partes del espectro electromagnético, es así que cada uno de los elementos dentro de la naturaleza emite una energía electromagnética característica de ese elemento, razón por la cual podemos diferenciarlos unos de los otros.

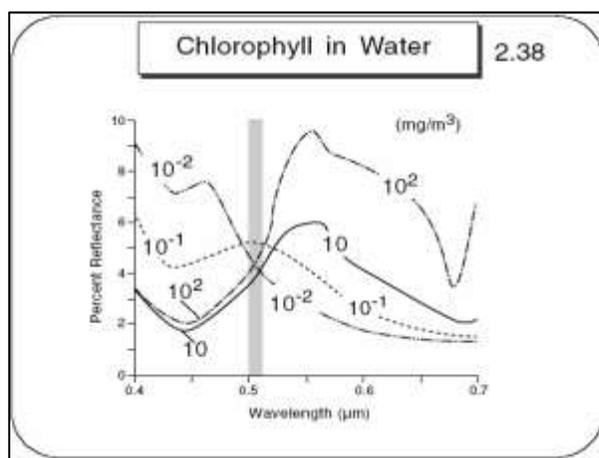
a. Respuesta espectral del agua

La reflectividad del agua es muy baja y con una tendencia descendente a medida que aumenta la longitud de onda (ver figura 3). Esta se ve alterada por factores tales como: el contenido de clorofila, materiales en suspensión, rugosidad superficial y profundidad. El agua cristalina

tiene excelentes propiedades en cuanto a transmisión de la energía electromagnética en el espectro visible y absorción en el infrarrojo. Gracias a su reflectancia que se ve como un pico en el verde y va reduciéndose hasta el infrarrojo, lo cual nos permite distinguir entre áreas de tierra y agua tanto en costas como lagos incluso ríos (Haydee, 2001).

La profundidad a la que la luz logra penetrar en el agua depende de la longitud de onda del espectro, en aguas claras la profundidad de penetración se encuentra entre 10m, 0.5m y 0.6m. En aguas no claras o turbias, la reflectancia va a depender del tipo de turbidez. Es así que si en el agua hay presencia de fitoplancton se encontrará variaciones en el verde el cual aumenta debido a la presencia de clorofila y el azul disminuye, en cambio si se trata de sedimentos inorgánicos la reflectividad aumenta especialmente en el rojo (Abreu, 2017).

Figura 3. Clorofila en el agua

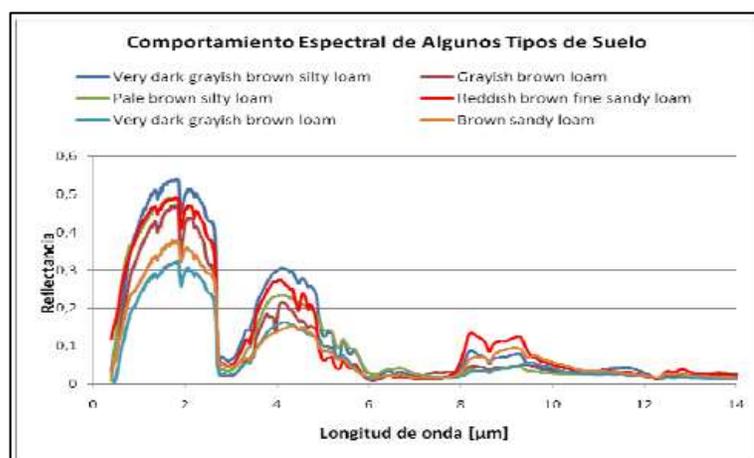


Fuente: (Haydee, 2001)

b. Respuesta espectral del suelo

La respuesta espectral del suelo (ver figura 4), está sujeta a algunos factores como: contenido de humedad, contenido de materia orgánica, tamaño de las partículas, contenido de óxido de hierro, mineralogía y su estructura, por ejemplo, en suelos secos con tierra oscurecidas la reflectancia será mayor, mientras que en suelos con alto contenido de humedad el cual la reflectancia será dos veces menor registrando las mayores diferencias en la zona de infrarrojo cercano (Hernández, 2009).

Figura 4. Comportamiento espectral de algunos tipos de suelo.

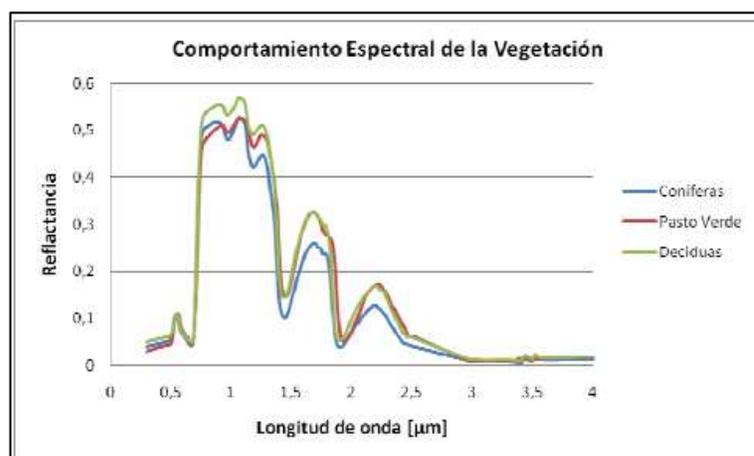


Fuente: (Hernández, 2009)

c. Respuesta espectral de la vegetación

Los niveles de reflectancia en la vegetación (ver figura 5), dependen de: estructura de las hojas, contenido de humedad y tipos de pigmentos, la estructura de las hojas (capa esponjosa del mesófilo) aumenta la reflectividad en la zona del infrarrojo cercano, y en el infrarrojo medio, la reflectividad está influenciada por el contenido de agua entre y dentro de las células, en condiciones de hidratación normales ambos escenarios son profundos y marcados, mientras que en condiciones de estrés hídrico estos son menos marcados aumentando su reflectividad (Hernández, 2009).

Figura 5. Niveles de reflectancia para los diferentes tipos de vegetación.



Fuente: (Hernández, 2009).

D. SENSORES REMOTOS

Es la ciencia y el arte de extraer información de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis de datos obtenidos mediante un dispositivo, el mismo que no está en contacto directo con lo que se está investigando. La obtención de los datos involucra el uso de instrumentos llamados sensores, capaces de captar las relaciones espectrales y espaciales de objetos y materiales observables a una considerable distancia (Pérez, 2007).

1. Tipos de sensores

a. Sensores pasivos

Son de mayor utilidad en las aplicaciones de la percepción remota sobre la evaluación de los recursos naturales. Los sensores pasivos simplemente recogen las señales emitidas naturalmente y reflejadas por los objetos percibidos. Estas señales, generadas por la radiación solar natural, puede provisionar una información muy rica de los objetos percibidos. Ejemplos: ASTER, Landsat, MODIS, SENTINEL (Bravo, 2017).

b. Sensores activos

El sensor emite radiación dirigida hacia el objeto o material estudiado. La radiación reflejada de ese objeto es detectada y medida por el sensor. Ejemplos: Lidar, Radar, Sonar (Bravo, 2017).

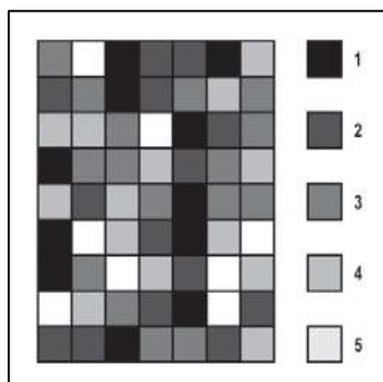
2. Resolución de los sensores remotos

Los sensores instalados en los satélites de teledetección poseen una serie de particularidades que determinan las características de las imágenes que van a proporcionar. Estas características vienen definidas básicamente por diferentes tipos de resolución.

a. Resolución espacial.

La resolución espacial es la medida de la distancia angular o lineal más pequeña que puede captar un sensor remoto de la superficie, y está representada por un píxel. Un píxel es la unidad mínima que conforma una imagen digital (ver figura 6).

Figura 6. Formato de una imagen digital (7 x 9 píxeles).



Fuente: (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

El píxel generalmente tiene una forma cuadrada, por lo que la longitud medida sobre el terreno de un lado del píxel define la resolución espacial del sensor. La resolución espacial de un sensor se suele expresar en metros o metros/píxel. Hay varios factores que determinan la resolución espacial de un sensor remoto. En los sensores montados en satélites estos factores prácticamente son fijos, por lo que tienen una resolución espacial constante, siempre y cuando el ángulo de visión no sea grande. Mientras mayor sea la resolución espacial, es decir, menor superficie represente un píxel de la imagen, más pequeños serán los objetos que se pueden distinguir en la superficie y viceversa. A modo de ejemplo (ver figura 7), una imagen con una resolución de 0,5 m/píxel permitirá distinguir objetos más pequeños que una imagen de 2 m/píxel (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

Figura 7. Imágenes con distinta resolución espacial: 2 m/píxel (izquierda) frente a 0,5 m/píxel(derecha)



Fuente: (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

Para que un objeto homogéneo logre ser detectado, su tamaño tiene que ser igual o mayor que el de la superficie de terreno que representa un píxel. Si el tamaño del objeto es menor puede que no sea detectado y el sensor grabará un promedio de todo lo que este a su alrededor (Labrador, Évora, & Pérez, 2012). Mediante la resolución espacial podemos aplicar la escala topográfica (ver tabla 2) para la presentación de mapas (Bravo, 2017).

Tabla 2. Escala del mapa mediante la resolución espacial (m).

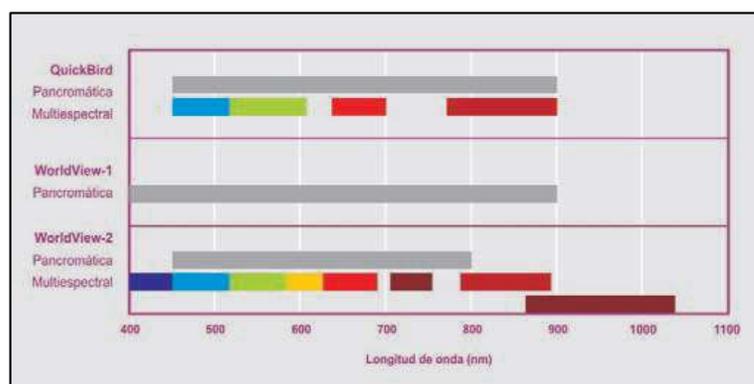
Resolución espacial (metros)	Escala
1000	1: 1,500,000
30	1: 80,000
20	1: 50,000
1	1: 2,000

Fuente: (Bravo, 2017)

b. Resolución espectral

Los distintos tipos de superficie, ya sean naturales o no, se pueden discriminar por medio de sus firmas espectrales, pero se necesita que el espectro sea suficientemente detallado en términos de intervalos de longitud de onda y que cubra un rango espectral ancho. Los dispositivos de teledetección generalmente sólo muestrean el espectro electromagnético detectando la radiación en determinados intervalos de longitudes de onda. Por ejemplo, un sensor que es sensible a las longitudes de onda entre 0.4 y 0.5 μm detectaría la luz azul. Este intervalo se conoce con el nombre de banda espectral o canal de los datos de una imagen (ver figura 8) (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

Figura 8. Bandas espectrales de diferentes sensores de teledetección.



Fuente: (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

Se define la resolución espectral de un sensor como el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar (ver figura 8). Mientras mayor sea el número de canales o bandas espectrales mayor es la resolución espectral de un sensor.

c. Resolución radiométrica

Se define como la cantidad mínima de energía necesaria para incrementar el valor de un píxel en un nivel digital (ND). También, se define la amplitud radiométrica como el intervalo dinámico, o número máximo de niveles digitales, que pueden ser detectados por un sensor particular. En los sensores más recientes lo habitual suele ser que los niveles vayan de 0 a 2047. En este caso hablaríamos de 11 bits de resolución radiométrica, ya que todos los valores de ese intervalo se pueden representar mediante 11 bits (dígitos binarios) en un sistema digital. La resolución radiométrica en imágenes digitales se puede comparar con el número de tonos de gris en una fotografía en blanco y negro, ya que ambos se relacionan con el contraste. La dispersión y absorción que provoca la atmósfera en la radiación que alcanza el sensor reducen el número de ND en las imágenes, especialmente en las longitudes de onda más cortas. A efectos visuales esto se traduciría en una pérdida de contraste (ver figura 9). Existen procedimientos que permiten obtener medidas de reflectancia relativas a los objetos de la superficie eliminando o reduciendo el efecto de la atmósfera (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

Figura 9. Imagen original captada por el satélite (izquierda). Imagen corregida del efecto atmosférico (derecha).

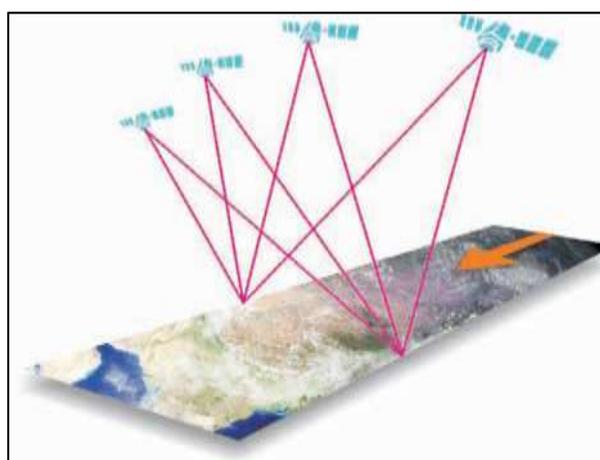


Fuente: (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

d. Resolución temporal

Es el intervalo de tiempo, entre dos adquisiciones de imágenes sucesivas de la misma porción de la superficie. En gran medida depende de las características orbitales del satélite (ver figura 10). Normalmente los satélites meteorológicos tienen una frecuencia diaria (NOAA) o incluso menor (METEOSAT), mientras que la de los satélites de recursos naturales (tipo LANDSAT) es de 16 a 18 días (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

Figura 10. Mayor resolución temporal gracias a la reorientación de sensores en pases consecutivos.



Fuente: (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

E. TIPOS DE IMÁGENES DE TELEDETECCIÓN

El tipo de producto más común que proveen los satélites de teledetección es una imagen digital tipo raster, donde cada píxel tiene asignado uno o varios valores numéricos (niveles digitales) que hacen referencia a la energía media recibida dentro de una determinada banda espectral. Teniendo esto en cuenta, se pueden adquirir los siguientes tipos de imágenes (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

1. Imagen multispectral (MS)

Imagen que tiene asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor. A priori, es el tipo de producto más útil ya que nos proporciona, en cierto modo, la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen. Mientras mayor sea el número de bandas que proporciona el sensor, mayor será la capacidad de análisis de los elementos presentes en la imagen (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

2. Imagen pancromática (PAN)

Posee una sola banda espectral que generalmente abarca gran parte del visible y comienzo del infrarrojo, obteniendo como resultado una imagen que normalmente se representa en una escala de grises (imagen en blanco y negro). Sin embargo, tienen la ventaja de poseer mayor resolución espacial que las multispectrales que proporciona el mismo satélite. Por esta razón son muy interesantes para la detección de elementos pequeños de la superficie terrestre que no son distinguibles en la imagen multispectral (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

3. Imagen fusionada (PS)

Es el resultado de la fusión de una imagen multispectral con una pancromática. Consiste en asignar a cada píxel de la imagen pancromática los valores procedentes de un algoritmo que combina la imagen pancromática con la multispectral. El resultado final es una imagen multispectral que tiene la resolución espacial de la pancromática. El inconveniente de esta clase de imágenes es que altera la información espectral original captada por los sensores por medio de los algoritmos usados, por lo que es recomendable utilizarlas únicamente como

herramientas para interpretación visual y no para análisis espectral (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

4. Imagen estéreo

Hace referencia a dos imágenes de una misma zona tomadas con distintos ángulos de visión. Muchos satélites poseen la capacidad de reorientar el sensor, lo que permite tomar, en una o en sucesivas pasadas, este tipo de imágenes. Generalmente se emplean para generar modelos de elevación del terreno (Labrador, Évora, & Pérez, 2012).

F. SATÉLITES

El satélite pionero en la conquista del espacio fue el ruso Sputnik, el término satélite hace referencia a un cuerpo que gravita alrededor de una masa preponderante, aquí satélite hace referencia a plataformas que son puestas en órbita de manera artificial y en los que se colocan los sensores. Como los Landsat 1 a 3, en estos se colocaron sensores MSS; en el Landsat 5, el sensor TM 5 y en el Landsat 7 el sensor ETM +7 (Pérez, 2007).

G. SATÉLITE LANDSAT

El programa Landsat es una serie de misiones para la observación de la Tierra por satélite conducido conjuntamente por el Servicio Geológico de EEUU y la NASA. En 1972, el lanzamiento de ERTS-1 (Tierra Recursos Tecnología por Satélite, más tarde renombrado Landsat1) comenzó la era de una serie de satélites que tienen desde que adquirida forma continua de tierras datos obtenidos por Teledetección remota basados en el espacio. El último satélite de la serie Landsat, la Misión de Continuidad de Datos de Landsat (LDCM), empezó el 11 de febrero de 2013. Ahora se lo conoce con el nombre de Landsat 8, los datos adquiridos por el satélite continúan expandiendo el archivo para los usuarios de en todo el mundo (Bravo, 2017).

1. Satélite Landsat 8

El satélite de Landsat 8 posee una Imagen Operacional de la Tierra (OLI) y el sensor térmico infrarrojo (TIRS) – Landsat 8 y las imágenes están compuestas por nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros en las bandas 1 a 7 y 9. La banda ultra azul 1 es útil

para estudios costeros y aerosoles. Banda 9 es útil para la detección de nubes cirrus. La resolución de la banda 8 (pancromática) es de 15 metros (ver tabla 3). Bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas de la superficie más precisa y se recogen a 100 metros. El tamaño aproximado es de 170 km escena de norte a sur por 183 km de este a oeste.

Tabla 3. Característica imagen Landsat 8.

Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1 - Ultra Blue (coastal/aerosol)	0.435 - 0.451	30
Band 2 – Blue	0.452 - 0.512	30
Band 3 – Green	0.533 - 0.590	30
Band 4 – Red	0.636 - 0.673	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.851 - 0.879	30
Band 6 - Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.566 - 1.651	30
Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.107 - 2.294	30
Band 8 – Panchromatic	0.503 - 0.676	15
Band 9 – Cirrus	1.363 - 1.384	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)

Fuente: (United States Geological Survey, 2019).

H. SATELITE SENTINEL

Sentinel-2 es una misión de imágenes multispectral (ver tabla 4) para el monitoreo de la tierra y está compuesto por una constelación de dos satélites: Sentinel 2A y 2B que nos posibilita recopilar información de la superficie de la tierra, con una frecuencia de 5 días. Sentinel 2A se lanzó el 23 de junio de 2015 y el Sentinel 2B el 7 de marzo de 2017. El Sentinel 2B vuela a 180° opuesto a Sentinel-2A, con ambas naves ocupando órbitas sincrónicas del Sol a una altitud de aproximadamente 786 km y cubriendo las superficies terrestres, grandes islas, aguas continentales y costeras de la Tierra 84° N y 56° S cada cinco días. El Sentinel-2 está dotado de un escáner multispectral que permite obtener información en las dos longitudes de onda, visibles e infrarrojos, facilitando monitorizar los cambios en la tierra y en la vegetación, así como también vigilar el cambio climático a nivel mundial,

con una resolución espacial de 10m. Las imágenes se encuentran disponibles de manera gratuita y pueden ser usadas en un rango amplio de aplicaciones (Bravo, 2017).

Tabla 4. Característica imagen SENTINEL-2.

Bandas Sentinel-2	Sensor	Longitud de Onda Central (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1 – Costero / aerosol	VNIR	0.443	60
Banda 2 – Azul		0.49	10
Banda 3 – Verde		0.56	10
Banda 4 – Rojo		0.665	10
Banda 5-Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)		0.705	20
Banda 6-Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)		0.74	20
Banda 7-Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)		0.783	20
Banda 8-Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)		0.842	10
Banda 8A-Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)		0.865	20
Banda 9-Vapor de Agua	SWIR	0.945	60
Banda 10 – Cirrus		1.375	60
Banda 11 - Onda Corta Infrarroja (SWIR)		1.61	20
Banda 12 - Onda Corta Infrarroja (SWIR)		2.19	20

Fuente: (Bravo, 2017).

1. Niveles de procesamiento

El procesamiento de NIVEL 1C incluye correcciones radiométricas y geométricas que incluyen orto-rectificación y registro espacial en un sistema de referencia global con precisión de subpíxeles. El procesamiento de Level-1C se descompone en los siguientes pasos:

- Asociación de azulejos: selección de azulejos predefinidos que intersecan la huella de la imagen requerida.
- Cálculo de la rejilla: permite vincular la imagen de geometría nativa a la imagen de geometría de destino (orto-rectificada).

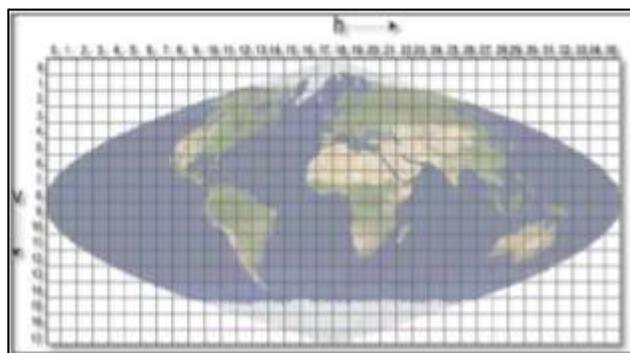
- Re-muestreo de cada banda espectral en la geometría de la orto imagen usando las rejillas de re-muestreo y un filtro de interpolación. El cálculo de las reflectancias TOA también ocurre en este paso.
- Cálculo de máscaras: se generan máscaras de nubes y tierra / agua.
- Compactación de imágenes de las imágenes de nivel 1C resultante mediante el algoritmo JPEG2000 y un encabezado codificado por imágenes geográficas GML (Bravo, 2017).

I. INSTRUMENTO MODIS

El sensor MODIS es un instrumento que se encuentra acoplado en los satélites Terra y Aqua, los mismos que se encuentran en órbita desde el año 1999 y 2000, respectivamente. Estos dos satélites en su totalidad la superficie de la tierra en 1 a 2 días, captando datos en 36 bandas espectrales. MODIS brinda datos que facilitan la comprensión de la dinámica global de la tierra y nos ayuda a predecir los cambios que están sucediendo; permitiendo conocer el comportamiento en la superficie terrestre, en la atmósfera y en los océanos (Mas, 2011).

MODIS cuenta con un mosaico para delimitar y separar la información obtenida a escala mundial y divide en cuadrículas de área constante de 10 grados por 10 grados de tamaño aproximadamente (ver figura 11). A cada cuadro se le ha asignado una coordenada horizontal (h) y vertical (v) que varía de 0 a 35 y 0 a 17, respectivamente. Por ejemplo, el cuadro o imagen de la esquina superior izquierda se designa como (h0, v0); Para Ecuador se debe hacer uso de las imágenes (h9,v8), (h10,v8), (h9,v9) y (h10, v9) (Ospina, 2017).

Figura 11. Cuadrícula global MODIS.



Fuente: (Boschetti et al,2015).

Es necesario resaltar que la información obtenida por MODIS es de acceso libre y se ofrece para toda una comunidad diversa de usuarios alrededor del mundo; facilitando una observación detallada de la superficie terrestre, la atmosfera y la fenomenología del océano (Rodríguez & Arredondo, 2005).

Existe gran diversidad de productos MODIS gracias a que registra la temperatura superficial de la tierra y de los océanos, cambios en color del océano, cambios en la vegetación características de las nubes, concentración de aerosoles y sus propiedades, corrientes oceánicas, focos de calor e incendios forestales, y cobertura de nieve (Mas, 2011). Para Rodríguez & Arredondo (2005), estas son algunas importantes aplicaciones de los productos MODIS;

- Herramientas para la gestión de incendios.
- Herramienta para el pronóstico de tormentas.
- Identificados del uso de la tierra.
- Herramienta para la cobertura del hielo.
- Control de los casquetes polares.
- Observador espacia para componentes del medio ambiente.
- Herramienta para estudios en la vegetación.

Se debe indicar que no todos los productos MODIS poseen las mismas características. Una de las desventajas de los productos MODIS son su resolución espacial (ver tabla 5).

Tabla 5. Resoluciones de las imágenes MODIS.

Tamaño coloquial (km)	Tamaño real (m)
1	926,6
250	234,7
500	463,3

Fuente: (Boschetti et al, 2015).

El lanzamiento del sensor MODIS brindó nuevas oportunidades para el campo de la investigación, con resoluciones espaciales mejoradas, pero independientemente de la metodología utilizada, dentro del estudio para la cartografía de áreas afectadas por incendios

forestales a escala regional o global, la resolución espacial de las imágenes satelitales sigue siendo su principal limitación (Pilar et al., 2010).

1. Descripción del producto satelital MCD64A1

MCD64A1 versión 6 es un producto mensual con una resolución espacial de 500 m que contiene información sobre el área quemada por píxel y la calidad. El enfoque que se utiliza para el mapeo de área quemada MCD64A1 emplea imágenes de reflectancia de superficie MODIS de 500 m conjuntamente con observaciones de incendio activo MODIS de 1 km. El algoritmo identifica la fecha de grabación para las celdas de la cuadrícula de 500 m dentro de cada mosaico MODIS individual. La fecha se codifica en una sola capa de datos como el día ordinal del año calendario en el que se produjo la grabación, con valores asignados a píxeles de tierra no quemados y valores especiales adicionales reservados para datos faltantes y celdas de la red de agua (ver tabla 6) (Giglio *et al.*, 2016).

Tabla 6. Resoluciones de las imágenes MODIS.

Característica	Descripción
Granularidad temporal	Mensual
Extensión temporal	Noviembre 2000 – Presente
Extensión espacial	Global
Tamaño del archivo	~ 9 MB
Sistema coordinado	Sinusoidal
Dato	N / A
Formato de archivo	HDF-EOS
Dimensiones geográficas	1200 km x 1200 km

Fuente: (Giglio *et al.*, 2016).

a. Capas de datos

Las capas de datos contenidas en el producto MCD64A1 (ver tabla7) incluyen: fecha de grabación, incertidumbre de datos de grabación, garantía de calidad y Primer día y Último día de detección confiable de cambios del año.

Tabla 7. Capas producto satelital MCD64A1.

Nombre SDS	Descripción	Unidades	Tipo de datos	Valor de llenado	Rango válido	Factor de escala
Fecha de quema	Quemar el día del año	Día del año	Entero de 16 bits con signo	0 = sin quemar 1 = sin datos -2 = agua	0 a 366	N / A
Incertidumbre en la fecha de quemado	Incertidumbre estimada en el día de la quemadura	Días	Entero sin signo de 8 bits	0	0 a 100	N / A
QA	Indicadores de aseguramiento de la calidad	Campo de bits	Entero sin signo de 8 bits	N / A	0 a 255	N / A
Primer día	Primer día del año de detección de cambio confiable	Día del año	Entero de 16 bits con signo	-1 = llenar -2 = agua	0 a 366	N / A
Último día	Último día del año de detección de cambio confiable.	Día del año	Entero de 16 bits con signo	-1 = llenar -2 = agua	0 a 366	N / A

Fuente: (Giglio *et al.*, 2016).

J. IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA GESTIÓN DE INCENDIOS FORESTALES.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas que facilitan la obtención de información espacial, la realización de análisis avanzados y el desarrollo de aplicaciones para la gestión de incendios forestales. Estas ventajas permiten la generación de datos para el estudio de fenómenos geográficos dinámicos; ya que brindan información casi en tiempo real y a bajo costo (Fernández *et al.*, 2009).

La importancia de los SIG es que permiten elaborar análisis muy complejos por medio de una abstracción de la realidad con la ventaja que permiten desarrollar procesos de forma rápida, optimizando recursos y reduciendo costos. Entre las utilidades que nos brinda la utilización de los SIG tenemos (Maguire *et al.*, 2012):

- Permite visualizar la realidad geográfica a gran escala.
- Contrasta, fusiona y almacena información.
- El formato digital permite trabajar con conjuntos de datos compactos.
- Permite trabajar e integrar información de distintas fuentes.
- Brinda un procesamiento rápido de la información
- Ofrece resultados de alta calidad.
- Permite trabajar con grandes volúmenes de datos.
- Es aplicable en la gestión y estudio de incendios forestales.

Durante dos décadas aproximadamente el monitoreo de biomasa quemada a escala global y regional se lo ha realizado usando datos satelitales mediante el uso de algoritmos que detectan la ubicación de incendios activos solamente en el momento en que los satélites sobrepasen zonas afectadas y en la última década se utilizan algoritmos de área afectada por los incendios. Actualmente, la disponibilidad de sistemas de geolocalización calibrados con corrección atmosférica es proporcionada por sistemas de teledetección de resolución moderada de la última generación que permiten hacer avances importantes en la cartografía por satélite de áreas afectadas por incendios (Boschetti *et al.*, 2015).

H. DELIMITACIÓN DE ÁREAS QUEMADAS MEDIANTE TELEDETECCIÓN.

Es posible la delimitación de zonas afectadas por incendios forestales mediante el uso de imágenes de satélite gracias a tres condiciones primordiales. Primero, la pérdida de biomasa verde (clorofila) provoca una disminución de la actividad fotosintética y por ende de la absorción de luz, aumentando sensiblemente la reflectividad de las bandas visibles del espectro (Guyot *et al.*, 1992). Segundo, el deterioro de la estructura celular de la hoja provoca una reducción de la señal en el infrarrojo cercano, así como también en el infrarrojo medio, como consecuencia de la pérdida de humedad (Chuvieco & Congalton, 1988). Y, por último, la temperatura del área quemada tiende a ser mayor, tanto por la mayor absorción (a

consecuencia de su color negro), como por la menor evapotranspiración (Hope & McDowell, 1992).

1. Normalized Burn Ratio (NBR)

El Índice Normalizado de Quema (NBR), fue desarrollado por Hunt & Rock (1989) y pretende estimar la severidad del incendio forestal. Para ello utiliza el contraste entre el infrarrojo cercano (IRC) por ser sensible al contenido de agua en la vegetación y el suelo; y el infrarrojo de onda corta (SWRI) que es sensible a la detección de vegetación sin actividad fotosintética, en el medio post-incendio Jia et al., (2006). La fórmula de este índice es la siguiente ecuación:

Fórmula 1. NBR

$$NBR = \frac{IRC - SWRI}{IRC + SWRI}$$

Fuente: (Hunt & Rock, 1989).

2. Índice de Vegetación Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), fue descrito por (Rouse *et al.*, 1973), permite la estimación de la actividad fotosintética de la vegetación. Este cálculo se basa en medir la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que refleja la vegetación. Estas bandas son la del infrarrojo cercano (IRC) y el rojo (R). El NDVI se expresa con la siguiente fórmula:

Fórmula 2. NDVI

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

Fuente: (Rouse et al, 1973).

L. ESTUDIO DEL GRADO DE SEVERIDAD

La severidad de un incendio agrupa los cambios físicos, químicos y biológicos producidos en un lugar como consecuencia del fuego (White *et al.*, 1996). La teledetección es una técnica idónea estudiar la severidad del fuego, ya que el proceso de combustión provoca cambios en la reflectividad superficial asociados a la eliminación de la vegetación, la exposición del

suelo, los cambios en el contenido de humedad y la aparición de nueva vegetación. El mayor cambio que se produce es la disminución de la reflectividad en las regiones del visible e infrarrojo cercano y el aumento en la del infrarrojo medio de onda corta (Key & Benson, 2006).

1. Análisis de severidad mediante NBR

El análisis de la severidad de áreas quemadas mediante el NBR permite la identificación de las zonas donde hubo gran pérdida de vegetación. Esto gracias a la combinación de dos bandas espectrales que reaccionan al fuego de manera más acusada y contrastada: el infrarrojo cercano (IRC), cuya reflectividad disminuye debido a la desaparición de la vegetación activa, y el infrarrojo medio de onda corta (SWIR), donde su reflectividad aumenta por la pérdida de humedad, la mayor exposición del suelo y las menores sombras proyectadas por la vegetación (Hunt & Rock, 1989).

El rango de valores de severidad post-incendio proyecto FIREMAN (ver tabla 8) (Lutes *et al.*, 2006), tomando los siguientes valores:

Tabla 8. Rango de valores de severidad post-incendio.

Nivel	Rango de ΔNBR
Alta severidad	< - 0,5
Media severidad	- 0,5 a -,25
Baja severidad	- 0,25 a -0,1
Nula severidad	- 0,1 a 0,1

Fuente: (Lutes *et al.*, 2006).

2. Análisis de severidad mediante NDVI

El NDVI se puede utilizar para estimar la cantidad de biomasa verde, independientemente de las especies que formen la comunidad Blackburn & Milton (1995) y es una buena herramienta para cuantificar el recubrimiento vegetal Duncan *et al.*, (1993). El NDVI ha sido uno de los índices de vegetación más utilizados debido a su alto éxito, gracias a la fuerte

relación que existe entre la severidad del fuego y la cantidad de vegetación consumida por los incendios (De Santis & Chuvieco, 2007). El resultado del NDVI se puede agrupar en las siguientes clases según la actividad fotosintética (ver tabla 9).

Tabla 9. Clases de actividad fotosintética.

Actividad fotosintética	Rango
Nula	< 0
Muy baja	0 a 0,1
Baja	0,1 a 0,2
Media	0,2 a 0,3
Media-alta	0,3 a 0,4
Alta	0,4 a 0,6
Muy alta	> 0,6

Fuente: (De Santis & Chuvieco, 2007)

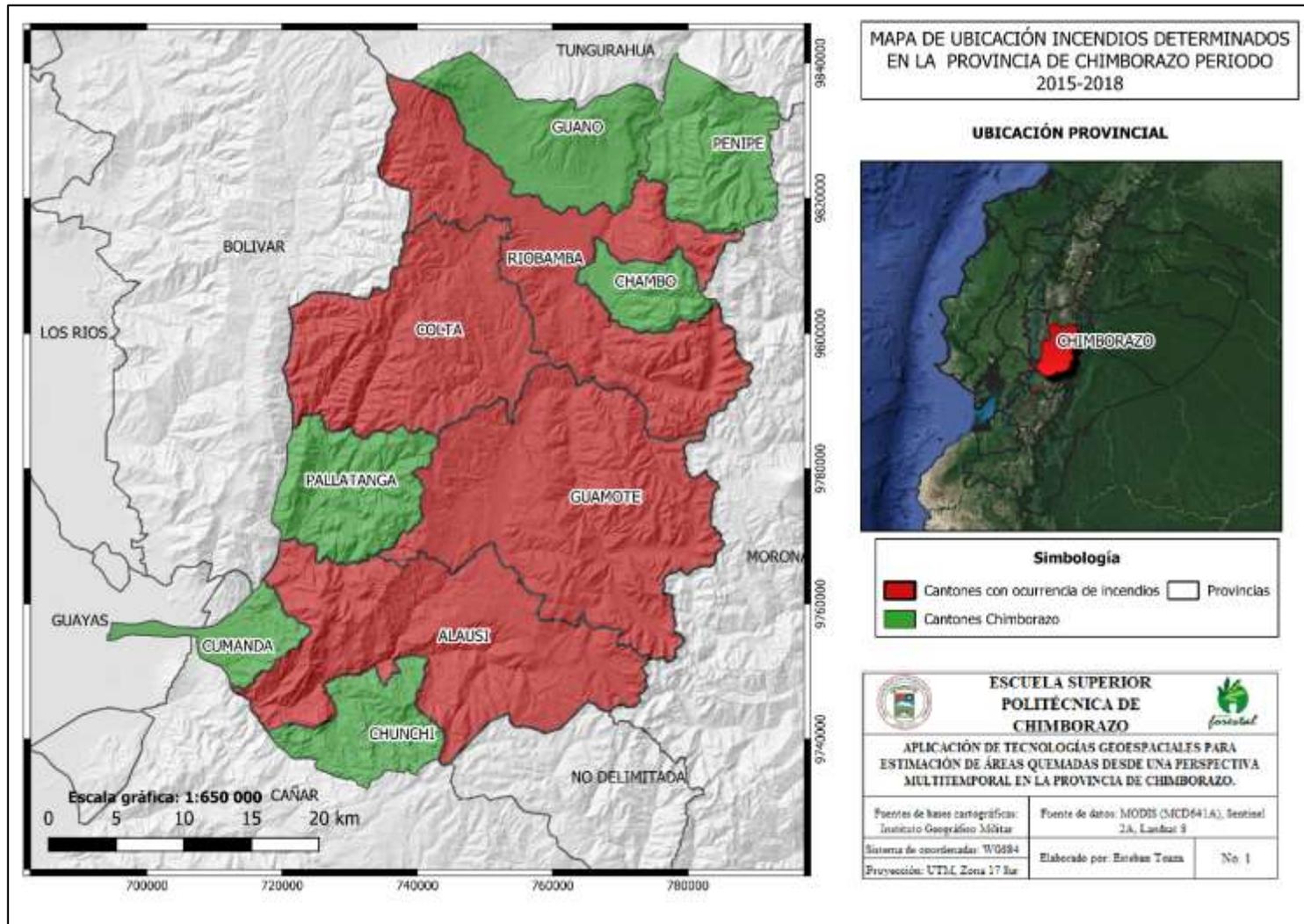
IV. MATERIALES Y MÉTODOS

A. CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR

1. Localización y Ubicación geográfica.

La presente investigación se llevó a cabo en la provincia de Chimborazo ubicada en el centro de la región interandina del Ecuador, entre la cordillera oriental y occidental. Conocida como la “Sultana de los Andes”, ya que se encuentra rodeada por grandes cumbres: el volcán Chimborazo, Carihuayrazo, El Altar, el Igualata, el Tungurahua, el Sangay, compartiendo varias de estas cumbres con otras provincias. Limita al norte con la provincia de Tungurahua, al sur con Cañar, al este con Pastaza y al oeste con Bolívar y Guayaquil. Administrativamente posee 10 cantones y 45 parroquias rurales. Para el acceso a la provincia cuenta con vías de primer orden, la Panamericana, por la región sierra, desde la ciudad de Quito y Balbanera, por la región Costa, desde la ciudad de Guayaquil. Su ubicación geográfica permite la formación de 13 ecosistemas (MAE, 2013) y de una gran diversidad de pisos climáticos que posibilitan el desarrollo de actividades productivas asentadas principalmente en el valle central de la provincia (Change *et al.*, 2017).

Mapa 1. Ubicación de la zona de estudio



Fuente: (Autor, 2019).

1. Condiciones climáticas

En la provincia predomina el clima ecuatorial de alta montaña en aproximadamente el 58,73% de la extensión territorial, en éste se encuentran las cabeceras parroquiales de Tixán, Palmira, Cebadas, Pangor, Licto, Pungalá, Chazo, Guanando, Ilapo, Santa Fe de Galán, el cantón Penipe y sus parroquias (Change *et al.*, 2017).

2. Hidrología

La oferta hídrica natural está relacionada directamente a la disponibilidad de agua que el ciclo hidrológico proporciona en un lugar y período determinado. Su estimación y variabilidad puede obtenerse por medio de múltiples observaciones in situ, o también con la ayuda de modelos hidrológicos calibrados. Los meses de mayor demanda de agua son agosto y septiembre, exigiendo 1 663,87 l/s para el regar 2 040 ha (Change *et al.*, 2017).

3. Precipitación

Las precipitaciones tienen una distribución espacial variable en la provincia, debido a su orografía y a factores ambientales que condicionan las mismas. En general, la estación lluviosa se inicia en octubre y noviembre prolongándose hasta mayo con una distribución bimodal. En general, la estación lluviosa tiene sus máximos en marzo (60-90mm) y octubre (50-70mm) con una distribución bimodal, presentando el pico máximo en el mes de marzo y el mínimo en agosto (10-20mm). Los valores de precipitación media mensual observada en las zonas de mayor precipitación superan los 200 mm (Pallatanga, Cailimbe), mientras que la región que registra una precipitación media más baja es Guano con 57 mm correspondiente al mes de marzo (Change *et al.*, 2017).

4. Temperatura

Las temperaturas medias son variadas, los valores máximos generalmente se presentan en noviembre y los valores mínimos de temperatura media en julio. Las zonas pobladas se encuentran en la franja central del territorio, ubicadas en valles. A la izquierda se encuentra la Cordillera Central y a la derecha la Oriental. La temperatura media anual disminuye desde el valle central hacia las cordilleras; los registros más bajos en áreas pobladas se ubican en:

las parroquias Pangor, Villa la Unión del cantón Colta y San Juan cantón Riobamba, Achupallas del cantón Alausí, Palmira cantón Guamote, con temperaturas medias que oscilan entre 9°-10°C, mientras que los registros más altos se ubica en la parroquia Multitud del cantón Alausí con 20°C y el cantón Cumandá con temperaturas cercanas a 24°C. La temperatura ambiental varía de acuerdo a la altura o piso climático. La variación de la temperatura es bastante grande, ya que desde los puntos más altos en los volcanes Chimborazo y Tungurahua hasta el punto más bajo, las temperaturas medias anuales varían entre -4° a 0°C para cotas superiores a los 5 000 msnm, hasta 25°C en el cantón Cumandá con una altura que va desde los 300 hasta 1 900 msnm aproximadamente (Change *et al.*, 2017).

5. Clasificación ecológica

Según la clasificación de ecosistemas del Ecuador Continental publicado por el por el MAE (2013), la provincia de Chimborazo posee 13 ecosistemas. En el presente estudio los eventos se encuentran sobre los siguientes ecosistemas.

Tabla 10. Ecosistemas presentes en áreas de afectación.

Cobertura	Símbolo	Código	Área	% Superficie Provincial
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo	AsAn01	109	22346,60	3,44
Bosque siempreverde montano alto de Cordillera Occidental de los Andes	BsAn03	111	7139,41	1,10
Bosque siempreverde montano alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes	BsAn01	112	9689,74	1,49
Herbazal del Páramo	HsSn02	119	143901,00	22,14
Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo	HsSn03	120	1343,56	0,21
Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo	HsNn03	124	21114,90	3,25
Intervención	INte	107	396195,73	60,95

Fuente: (Categorización de los Ecosistemas de la Provincia de Chimborazo, MAE 2013).

Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo

Arbustos frecuentemente dispuestos en parches de hasta 3 m de altura, mezclados con pajonales amacollados de alrededor de 1,20 m. Se lo considera un ecosistema diferente

localizado sobre la línea de bosque, sin embargo, otros autores consideraron a éste como franja del ecosistema de bosque montano alto. La composición y estructura de este ecosistema cambia hacia la parte baja de su distribución altitudinal pues la riqueza de especies y promedio de altura de los arbustos y el número de arbolitos se incrementa (MAE, 2013).

Bosque siempreverde montano alto de Cordillera Occidental de los Andes

Bosques siempreverdes, con un dosel bajo entre 15 y 20 m con follaje esclerófilo, subesclerófilo y lauroide; el sotobosque es denso con abundantes herbáceas, epífitas y briofitas que cubren el suelo, ramas y fustes. En estos bosques la diversidad de briofitas es mayor que en los bosques montanos; mientras, que la diversidad de epífitas vasculares disminuye. Una diferencia importante es que el suelo tiende a estar cubierto por una densa capa de musgo. Adicionalmente, los árboles crecen irregularmente con troncos ramificados e inclinados, esto se debe a que el metabolismo de los árboles está limitado por las temperaturas bajas y suelos menos fértiles debido a la baja tasa de descomposición de la materia orgánica. Actualmente este ecosistema está presente en forma de islas de bosque natural (fragmentos o parches) relegados a las quebradas o en suelos con pendientes pronunciadas (MAE, 2013).

Bosque siempreverde montano alto del Norte de la Cordillera Oriental de los Andes

Bosques siempreverdes bajos a medios, con un dosel de 10 a 15 m de alto. Los árboles se caracterizan por tener troncos gruesos en ocasiones torcidos y con raíces adventicias. En el sotobosque se encuentran especies de helechos herbáceos y arbóreos principalmente de los géneros *Dicksonia* y *Cyathea*, en el estrato medio se observa gran cantidad de arbustos de los géneros *Calceolaria*, *Ribes*, *Rubus*, *Berberis*, *Ilex*, *Brachyotum* y *Miconia*; en ramas y troncos crecen abundantes epifitas vasculares y briofitas. Las áreas de regeneración después de alteraciones naturales o antropogénicas suelen ser colonizadas por especies de gramíneas que crecen enmarañadas hasta los 5–8 m de alto, comúnmente conocidas como suros. Normalmente están restringidos a zonas de topografía accidentada y pendientes que van desde muy inclinadas a escarpadas (15° a 87°) (MAE, 2013).

Herbazal del Páramo

Herbazal denso dominado por gramíneas amacolladas mayores a 50 cm de altura; este ecosistema abarca la mayor extensión de los ecosistemas de montaña en el Ecuador; se extiende a lo largo de los Andes desde el Carchi hasta Loja. Es característico del piso montano alto superior y se localiza generalmente en los valles glaciares, laderas de vertientes disectadas y llanuras subglaciares sobre los 3400 msnm. Se caracteriza por tener suelos andisoles con un profundo horizonte A, rico en materia orgánica que puede alcanzar los 60 kg-carbono/m², debido a esto y a las condiciones climáticas de alta humedad contiene una gran cantidad de agua por unidad de volumen (80-90% por cm³) con una excepcional capacidad de regulación hídrica (MAE, 2013).

Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo

Herbazales abiertos, que se encuentran dominados por especies de los géneros *Stipa*, *Senecio* y *Plantago*; se encuentra en enclaves volcánicos localizados en fondos de valles glaciares las especies que resisten a las extremas condiciones climáticas. Debido a la humedad relativamente baja de estos ecosistemas la concentración de carbono orgánico en el suelo es menor que en los páramos más húmedos, esto los hace más frágiles y menos resilientes a disturbios causados por actividades humanas, además, la aridez producto de dos procesos el de abrasión y deflación en conjunto con la energía del viento que transporta determinado tamaño de partículas que al chocar con masas rocosas realizan una labor erosiva y de disgregación de la roca que dan un aspecto desértico (MAE, 2013).

Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo

Herbazal mezclado con arbustos esclerófilos semiprostrados con una altura entre 0,5 a 1,5 m, ocurre en morrenas, escarpamentos rocosos, depósitos de rocas glaciares y pendientes pronunciadas de arena o quebradas estrechas. Este ecosistema se caracteriza por tener una vegetación fragmentada, con suelo desnudo entre los parches de vegetación que se localiza en las cumbres más altas de la cordillera formando un sistema insular restringido al norte del Ecuador (MAE, 2013).

Intervención

Territorios donde existen asentamientos humanos, aquí se desarrollan actividades antrópicas donde se ha retirado la cubierta vegetal original de estos lugares para cambiarlos por construcciones civiles y mosaicos agropecuarios.

B. MATERIALES

1. Materiales informáticos

- Producto MCD64A1 MODIS. Es un producto satelital mensual con una resolución espacial de 500 m que contiene información sobre el área quemada por píxel y fecha de ocurrencia.
- Imágenes satelitales Landsat 8 y Sentinel 2. Son imágenes multiespectrales de libre acceso que se encuentran formadas por 11 y 13 bandas respectivamente y tienen una resolución espacial de 30 y 10 metros.
- QGis 3.4. Es una aplicación profesional de SIG con Software Libre y de código abierto. Guardando concordancia con Ley Orgánica de Educación Superior (LOES), mediante la cual se dispone el uso obligatorio de Software Libre en las instituciones de educación superior ecuatorianas. En los casos que las funcionalidades de estos programas sean similares al software privativo.
- Office 2013.

2. Equipos

Laptop. Es necesario contar con un computador que cumpla con mínimos requerimientos técnicos, ya que se trabaja con grandes volúmenes de datos geográficos y procesos robustos de análisis:

- Procesador. Es el que nos va a permitir ejecutar procesos de una manera más o menos rápida. Intel Core i5, es un procesador adecuado para trabajar procesos SIG y nos permite ejecutar varios procesos al mismo tiempo.

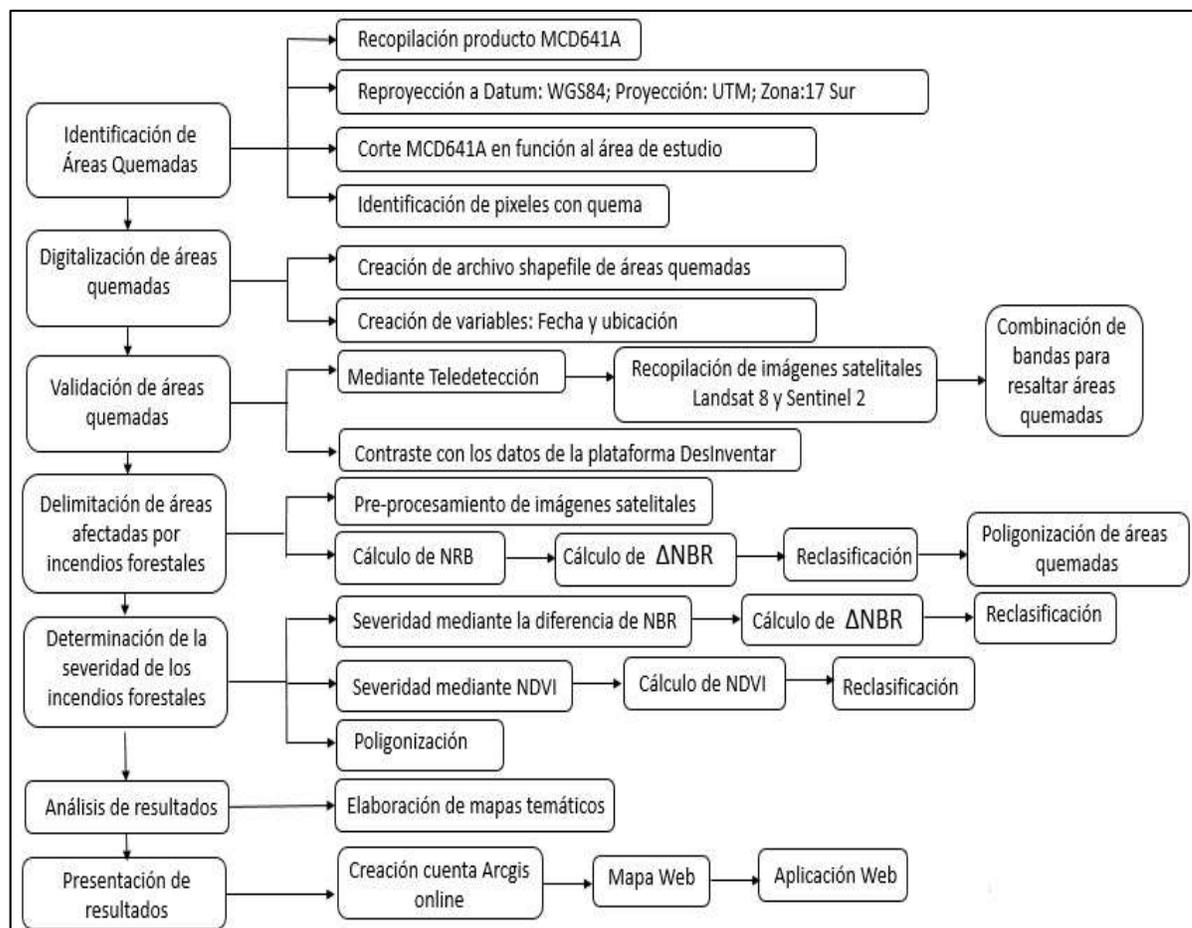
- Memoria RAM. Es la capacidad de datos en volumen que se gestionan a la vez, mientras mayor sea mejor es recomendable contar con un mínimo de 4GB.
- Tarjeta Gráfica. Una tarjeta gráfica dedicada siempre va a ser mucho mejor que la integrada, lo que hace es compartir memoria con la RAM. Se recomienda una tarjeta de un mínimo de 64MB de RAM.

C. METODOLOGÍA

1. Esquema de trabajo

En la figura 12, se muestra el esquema de trabajo y la planificación detallada de las actividades realizadas en el presente estudio para la obtención de los objetivos planteados.

Figura 12. Esquema de trabajo.



Fuente: (Autor, 2019).

2. Identificación de áreas quemadas

a. Recopilación del producto MODIS MCD64A1

Para el mapeo de incendios forestales en la provincia de Chimborazo se utilizó el producto satelital MCD64A1, el mismo fue recopilado abordando los registros del año 2015 al 2018, a través del portal de la NASA. En el anexo 1 se indica el procedimiento realizado paso a paso para la obtención del producto.

El producto completo necesario para el presente estudio contiene un total de 48 imágenes en formato HDF-EOS.

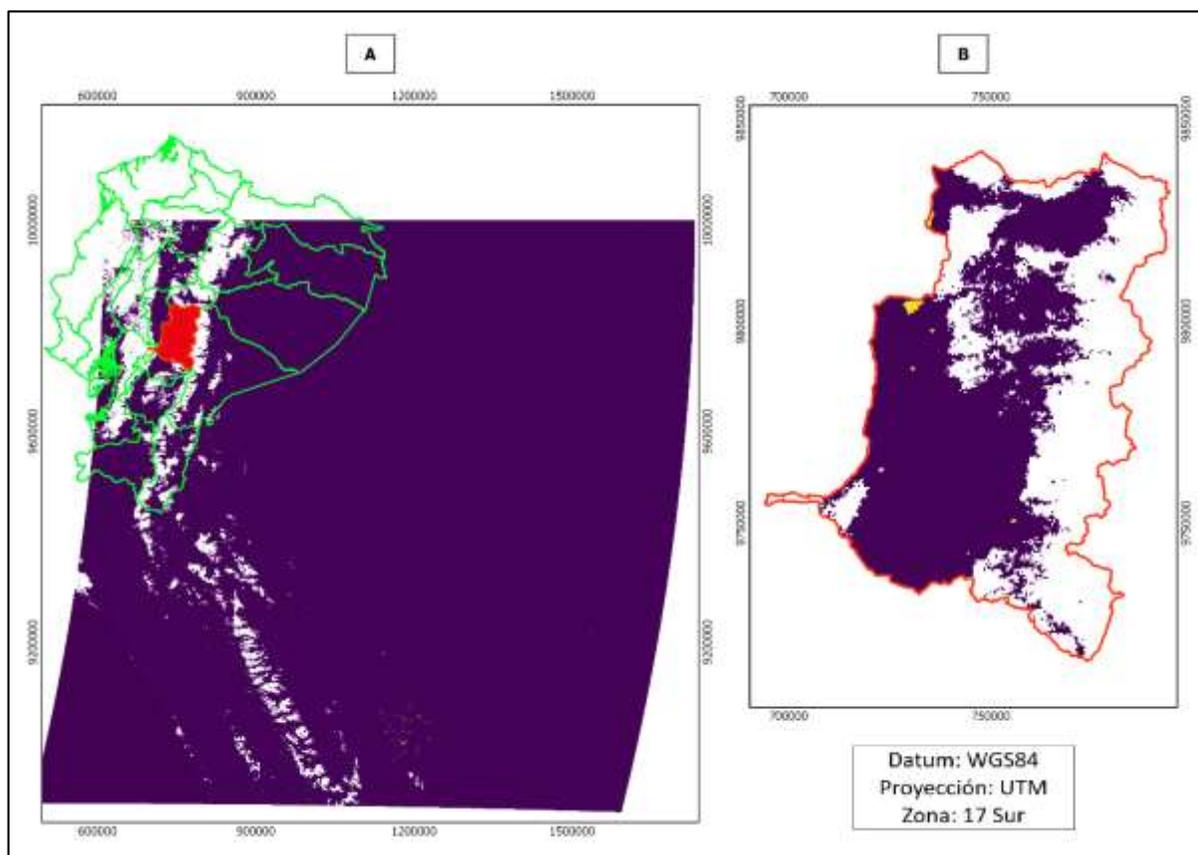
b. Reproyección del producto MODIS MCD64A1

Lo primero que se realizó después de obtener las 48 imágenes correspondientes al producto satelital MCD64A1 para el presente estudio fue realizar una reproyección a Datum WGS84 y Sistema de Coordenadas Proyectadas UTM, Zona 17 Sur.

c. Corte del producto MODIS MCD64A1

Para facilitar el procesamiento del producto satelital, se realizó un recorte del área de estudio con el perfil de la provincia de Chimborazo de la base cartográfica del Instituto Geográfico Militar (IGM). En la figura 13 en la parte izquierda se observa el área de estudio identificada en color rojo y superpuesta en la imagen correspondiente a las coordenadas (h10, v9) según el mosaico para productos MODIS y en la parte derecha observamos ya realizado el corte a la imagen del producto en función al área de estudio. Se realizó el mismo procedimiento con las 48 imágenes, que se utilizaron para la identificación de áreas quemadas mes a mes a nivel de pixel con su respectiva fecha.

Figura 13. Producto MODIS MCD64A1 para la zona de estudio.

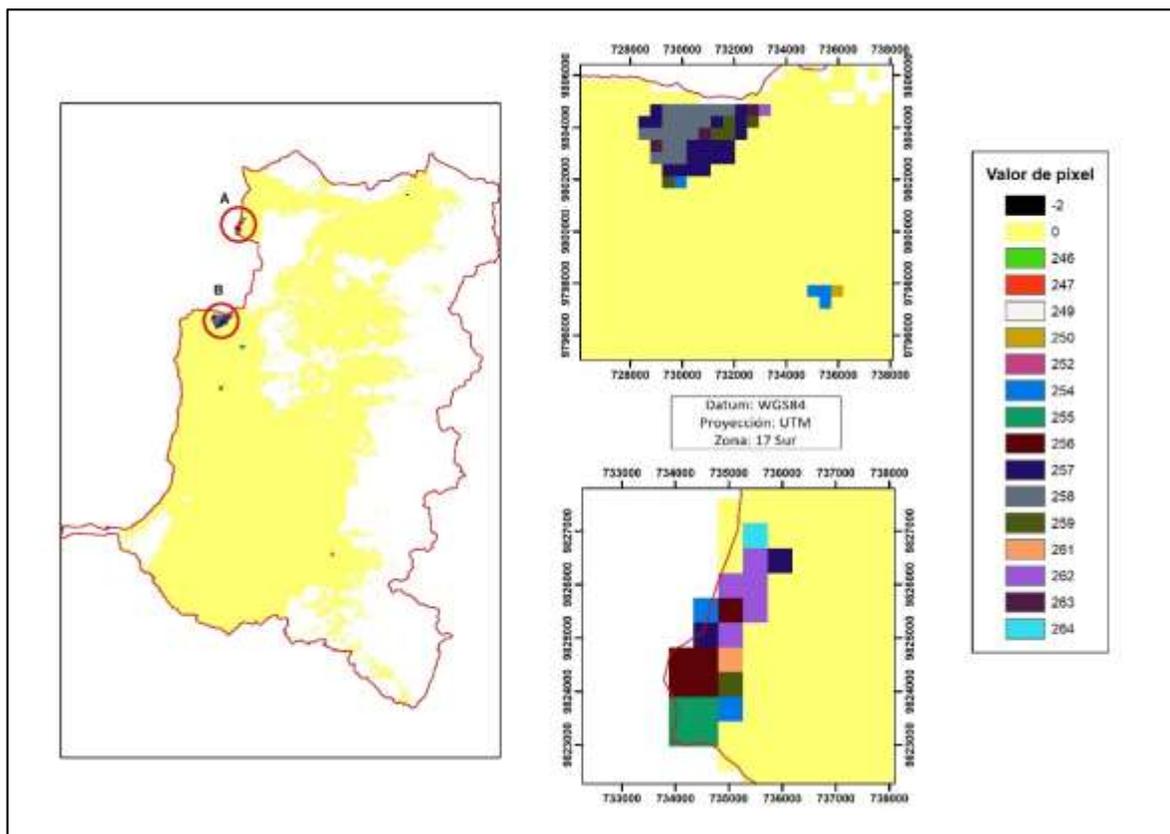


Fuente: (Autor, 2019)

d. Identificación de píxeles con quema

Una vez recortadas las imágenes raster en base a la zona de estudio, el valor del píxel del raster resultante nos muestra las fechas en las que se registró incendios forestales de un mes según el calendario juliano. En la figura 14, se muestra el mismo ejemplo correspondiente a la imagen del mes de septiembre del año 2015. Donde se muestran dos acercamientos en lugares donde se encontró varios píxeles con valores que muestran quema dentro de ese mes, cada uno con diferente fecha de ocurrencia e identificados con un único color.

Figura 14. Lugares que registraron quema imagen producto MCD64A1 para el mes de septiembre año 2015.



Fuente: (Autor, 2019)

La gran cantidad de pixeles en color amarillo, corresponden al valor 0 que representa áreas sin quemar. Mientras que la gran cantidad en blanco, representa el valor de -1 correspondiente a áreas sin asignar por datos insuficientes. Estos valores no tienen ninguna utilidad en nuestro estudio, pero vienen incorporados en el producto.

3. Digitalización de áreas quemadas

Una vez identificadas las áreas que registraron quema, se creó un archivo de tipo shapefile que contenga a las mismas. En el shapefile se generaron variables que nos permitan ubicar de manera más precisa espacial y temporalmente cada área quemada detectada por el producto MCD64A1. Primero se identificó el año, mes y día, esto se realizó cambiando la fecha en la que el producto registro cada incendio, de calendario juliano al calendario gregoriano que es el que se utiliza actualmente en concordancia con lo realizado por Ospina (2017). Las siguientes variables que se crearon fue para que nos ayuden a ubicar exactamente

la ubicación geográfica de cada uno de los eventos. Con la ayuda de la cartografía base pudimos ubicar cada evento a nivel de cantón y parroquia.

4. Validación de áreas quemadas

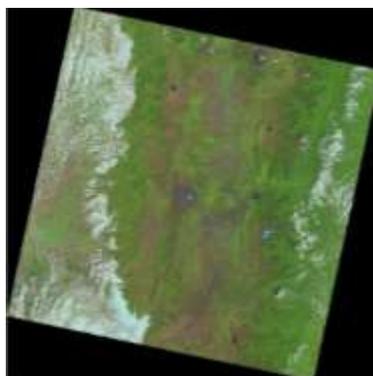
Se utilizó imágenes satelitales Landsat 8 y Sentinel 2 disponibles a la fecha más próxima a cada evento detectado por MODIS, pero la validación realizada fue únicamente de manera cualitativa, es decir solo se identificó la concordancia de las fechas y si las ubicaciones geográficas en las que el producto registró áreas quemadas es correcta y no se cuantificó la existencia de errores de sobreestimación o subestimación. La metodología se la tomó como guía y referencia de los siguientes estudios. (Boschetti *et al.*, 2015); (Chuvieco *et al.*, 2013) y (Corti, 2014). Y también se compararon los resultados obtenidos con la base de datos de ocurrencia de incendios forestales de la plataforma DesInventar.

a. Validación de áreas de quemadas mediante Teledetección.

Recopilación de imágenes satelitales Landsat 8 y Sentinel 2.

Las imágenes Landsat 8 fueron seleccionadas y descargadas a través del portal Earth Explorer. Las cuales se seleccionaron en base al porcentaje de nubosidad en los lugares donde registramos incendios forestales. La escena de toma que abarca la extensión de nuestra zona de estudio es la correspondiente al PATH = 010 y ROW = 061 del sistema WRS-2 de Landsat.

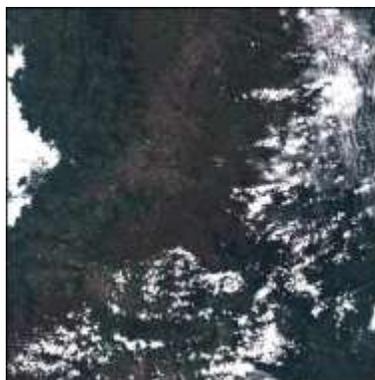
Figura 15. Imagen Landsat 8, 15 de noviembre del 2016.



Fuente: (USGS, 2019)

Las imágenes Sentinel 2 fueron seleccionadas y descargadas a través de la plataforma Copernicus Services Data Hub de la Agencia Espacial Europea (ESA). Las cuales se seleccionaron en base al porcentaje de nubosidad en los lugares donde registramos incendios forestales. Para cubrir la extensión de nuestra área de estudio se necesitó dos escenas (17 MQU y 17 MQT) de la grilla de imágenes Sentinel.

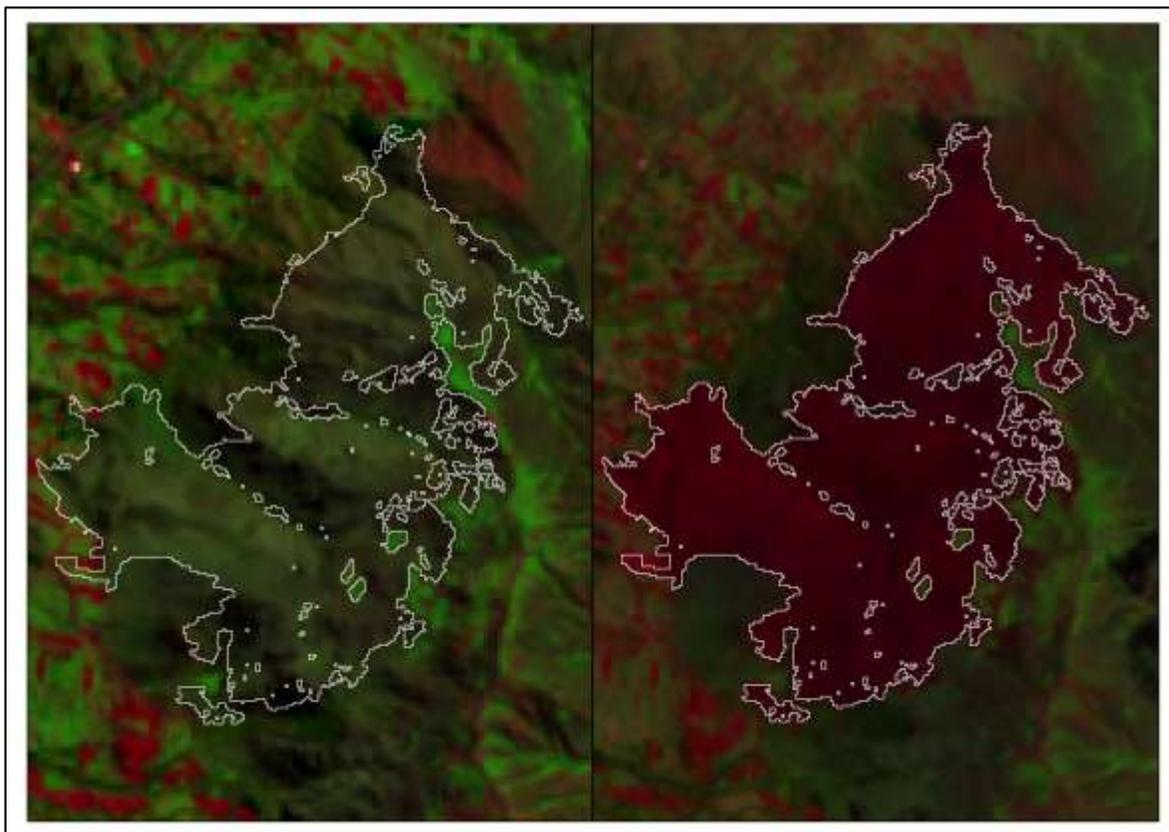
Figura 16. Imagen Sentinel 2A, 29 de septiembre del 2018



Fuente: (ESA, 2019)

La metodología se fundamenta en la combinación de bandas espectrales, como la clave para que imágenes satelitales de mejor resolución espacial ayuden a destacar áreas quemadas como consecuencia de la ocurrencia de áreas quemadas en sitios específicos. Las combinaciones de bandas utilizados fueron 7,5, 4 (para Landsat8) y 12, 8A, 4 (para Sentinel 2), en donde las áreas afectadas por incendios se muestran de color marrón oscuro, mientras que la vegetación sana se muestra de color verde brillante, la vegetación seca presenta color naranja, las praderas de color verde claro, el suelo estéril es de color rosa y el vapor de agua junto con los humedales serán en tonalidades de color azul (Butler, 2013). En la figura 17, observamos la combinación de bandas (12, 8A, 4) para resaltar áreas quemadas, a la izquierda observamos la combinación de la imagen pre y a la derecha la de la imagen post incendio para el incendio del 19 de agosto del 2018.

Figura 17. Combinación de bandas (12,8A,4) imagen Sentinel 2 para delimitación de área afectada por incendio 29 de agosto del 2018.



Fuente: (Autor, 2019)

b. Contraste de los datos con registros de incendios existentes mediante la plataforma DesInventar

DesInventar es una herramienta conceptual metodológica para adquisición y consulta de información acerca de emergencias y desastres pequeños, medianos y de gran impacto generados a partir de datos preexistentes, fuentes hemerográficas y reportes de instituciones. En la figura 18. Se presenta la interfaz de la base de datos de DesInventar para incendios forestales en la provincia de Chimborazo.

La información obtenida en el presente estudio se la comparó con los registros de incendios forestales de la base de datos de DesInventar. El contraste de la información se la realizó de forma manual, es decir se identificó cada evento por su fecha con una tolerancia de un día, luego se estableció si su ubicación es la correcta.

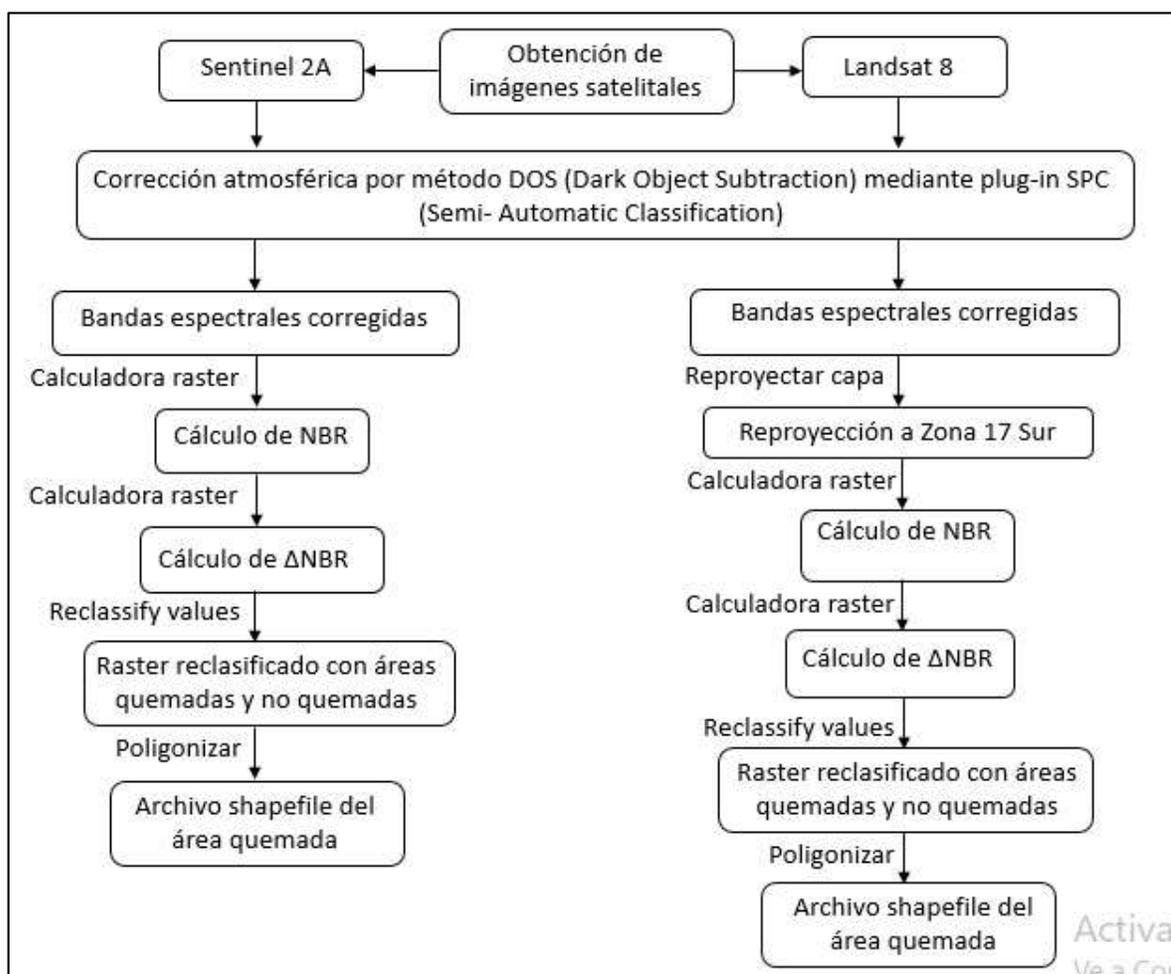
Figura 18. Interfaz de la base de datos de DesInventar para incendios forestales en Chimborazo.

Year	Date	Type of event	Location	Name	Address	Description of the event	Year	Month	Day	Hour	Minute	Second	Millisecond
2015-0012	2015-02-05	Incendio forestal	CHIMBORAZO/RIORANBA/SAN JUAN	Santa Teresita de Guabug	Jorge Ruiz - ECU 911 508 2716700	ECU 911 Rioranba comienza mediante informe que se está sucediendo un incendio forestal	0	0	0	0	0	0	0
2015-0067	2015-02-08	Incendio forestal	CHIMBORAZO/CHINCHI/LLAGOS	Angel Iyaguen	Jorge Ruiz 508-ECU 911 2716700	Ecu 911 Rioranba comienza que el sector antes indicado hay un incendio forestal que se	0	0	0	0	0	0	0
2015-0075	2015-02-20	Incendio forestal	CHIMBORAZO/CHAMBO/CHAMBO	Pascual Triayeur	Jorge Ruiz 508-ECU 911	Ecu 911 Rioranba comienza que el sector antes indicado hay un incendio forestal que se	0	0	0	0	0	0	0
2015-1019	2015-02-22	Incendio forestal	CHIMBORAZO/GUANO/GUANO	Pascual del Quinche	Bernhard José Lupera - C de Bomberos de Guano Teléfono: 022810771	Ecu 911 Rioranba comienza que el sector antes indicado se produjo un incendio forestal	0	0	0	0	0	0	0
2015-1029	2015-02-23	Incendio forestal	CHIMBORAZO/GUAPOTE/CEBADAS	Tevizante	Bombas Avanzadas - C de Bomberos de Guapote	Ecu 911 Rioranba comienza que el sector antes indicado se produjo un incendio forestal	0	0	0	0	0	0	0
2015-1241	2015-03-04	Incendio forestal	CHIMBORAZO/GUAPOTE/GUAPOTE	Chausar Catedrala	Jorge Ruiz - ECU 911 Chausar Teléfono: 033730700 Calle Juan	Ecu 911 Rioranba comienza que el sector antes indicado se produjo un incendio forestal	0	0	0	0	0	0	0
2015-2023	2015-08-06	Incendio forestal	CHIMBORAZO/GUAPOTE/VALLENA	Luis Germán Estrada e Torreses	Jorge Ruiz - ECU 911 Chausar Teléfono: 033730700 Cde. Juan	Ecu 911 Rioranba comienza que el sector antes indicado el día de ayer se produjo un	0	0	0	0	0	0	0
2015-2094	2015-08-07	Incendio forestal	CHIMBORAZO/GUAPOTE/GUAPOTE	Tierras	Bn. Angel Salas - C. de Bomberos de Guapote	Ecu 911 Rioranba comienza que el sector antes indicado se	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: (Autor, 2019)

5. Delimitación de áreas afectadas por incendios forestales

Una vez identificados los sitios donde se identificó quema, el siguiente paso es la delimitación del área afectada por cada incendio forestal. Debido al gran tamaño de pixel que nos proporciona el producto satelital MCD64A1, es necesario ayudarnos de imágenes satelitales con una mejor resolución espacial. En el presente estudio se utilizó imágenes Landsat 8 (años: 2015 y 2016) y Sentinel 2 (año 2018), obteniendo una imagen previa al incendio y una posterior al incendio (hasta un mes luego de la fecha en que se produjo el incendio). En la figura 19, podemos observar el diagrama de procesamiento para la delimitación de áreas quemadas.

Figura 19. Diagrama de procesamiento.

Fuente: (Autor, 2019)

a. Pre-procesamiento de imágenes satelitales

El procesamiento de las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2 se lo realizó con la ayuda del software QGIS 3.4, mediante el plugin Semi-Automatic Classification (SPC). En el cual se realizó la corrección atmosférica de las imágenes por el método DOS (Dark Object Subtraction), también conocido como el Método de Chávez.

b. Cálculo de NBR

Para la delimitación de las áreas afectadas por los incendios forestales determinados en el presente estudio se utilizó el índice espectral el NBR. Este índice se calculó con las bandas previamente corregidas atmosféricamente mediante la siguiente fórmula:

$$NBR = \frac{IRC - SWRI}{IRC + SWRI} \quad (1)$$

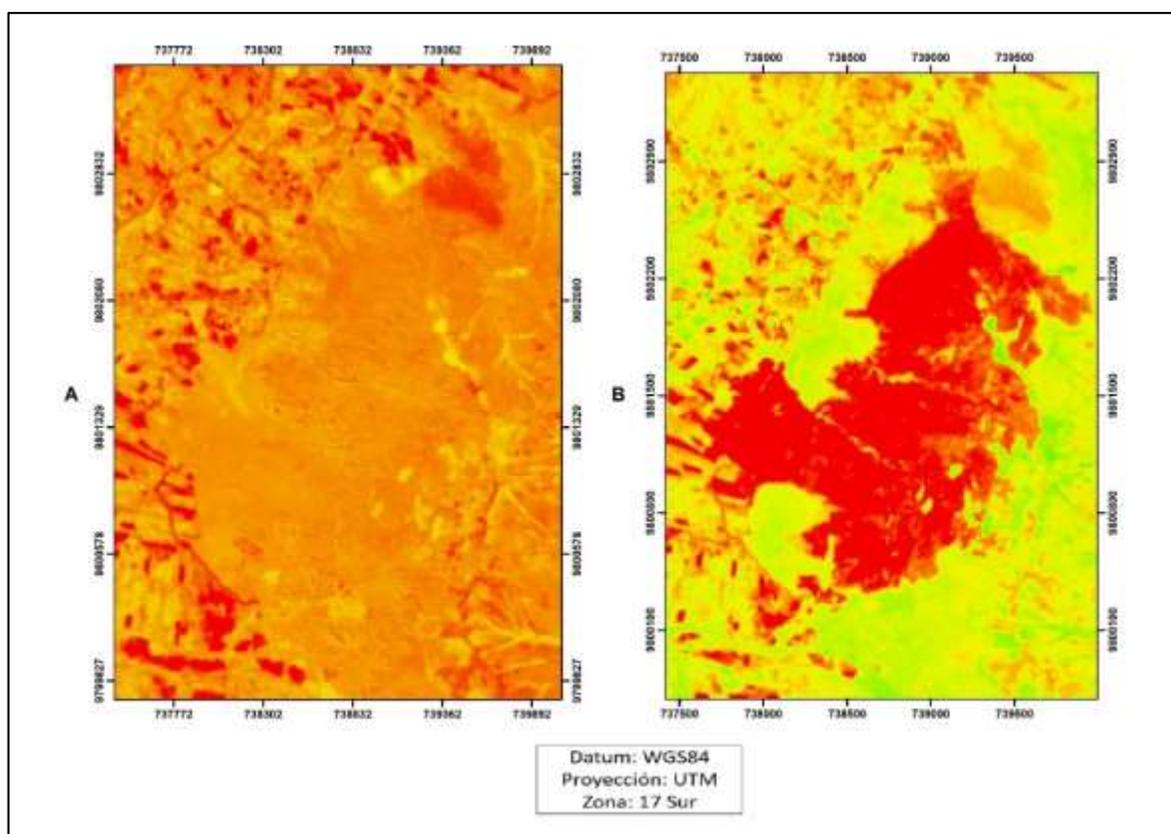
Donde:

IRC= Infrarrojo cercano (banda 5 Landsat8 y banda 8A Sentinel 2)

SWRI= Infrarrojo de onda corta (banda 7 Landsat8 y banda 12 Sentinel 2)

Una obtenidos los archivos raster de los índices fue necesario cortarlos en función a las áreas de influencia directa de cada uno de los incendios forestales. Esto con el fin de facilitar y agilizar los procesos de reclasificación posteriores. La Figura 20 corresponde al incendio del 29 de agosto del 2018, en la imagen A se observa el índice NBR pre incendio, mientras que en la imagen b tenemos el índice NBR post incendio.

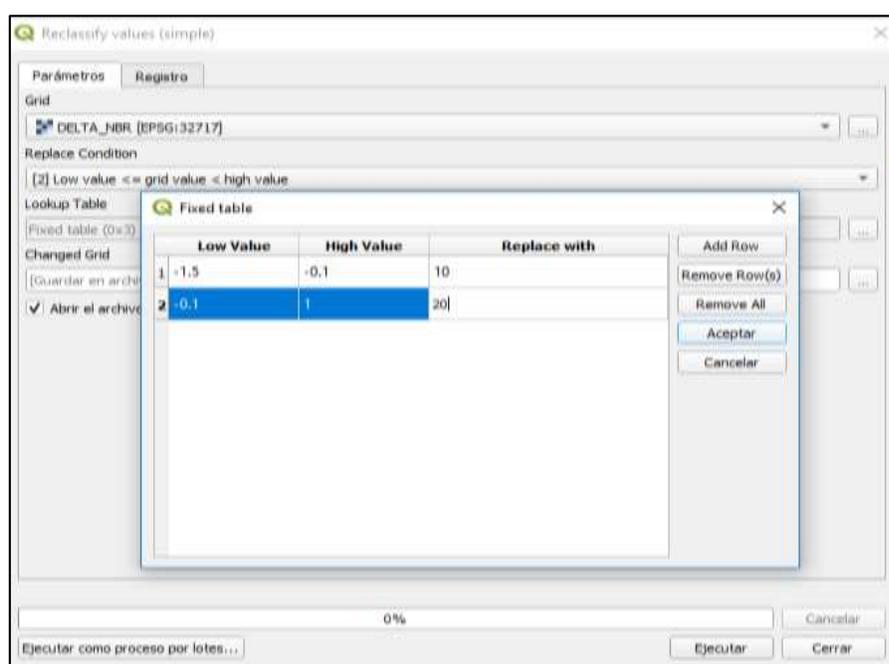
Figura 20. Índices NBR pre y post incendio ocurrido 29 de agosto del 2018.



Fuente: (Autor, 2019)

Una vez cortados los archivos raster del NBR pre y post evento. Con la a de la Herramienta de calculadora de raster, realizamos la siguiente operación: $\Delta\text{NBR} = \text{NBR post} - \text{NBR pre}$, para determinar la diferencia en los valores de la zona afectada antes y después de cada incendio. Con el raster resultante de esta operación realizamos una reclasificación de los valores obtenidos para poder discriminarlos entre pixeles quemados y no quemados. En la figura 21, se muestra el rango de valores con el que se trabajó para reclasificar la imagen raster determinando dos clases: los valores que están contenidos en la clase identificada con el numero 10 corresponden a pixeles que se quemaron y los de la clase 20 correspondes a pixeles que no se quemaron.

Figura 21. Valores utilizados para la reclasificación para delimitación de áreas quemadas.



Fuente: (Autor, 2019)

Mediante la herramienta Poligonizar convertimos las imágenes raster obtenidas luego del proceso de reclasificación a archivos shapefile, para así poder editar este archivo con mayor facilidad y poder delimitar de manera más exacta el área afectada por cada incendio forestal y calcular su superficie en hectáreas.

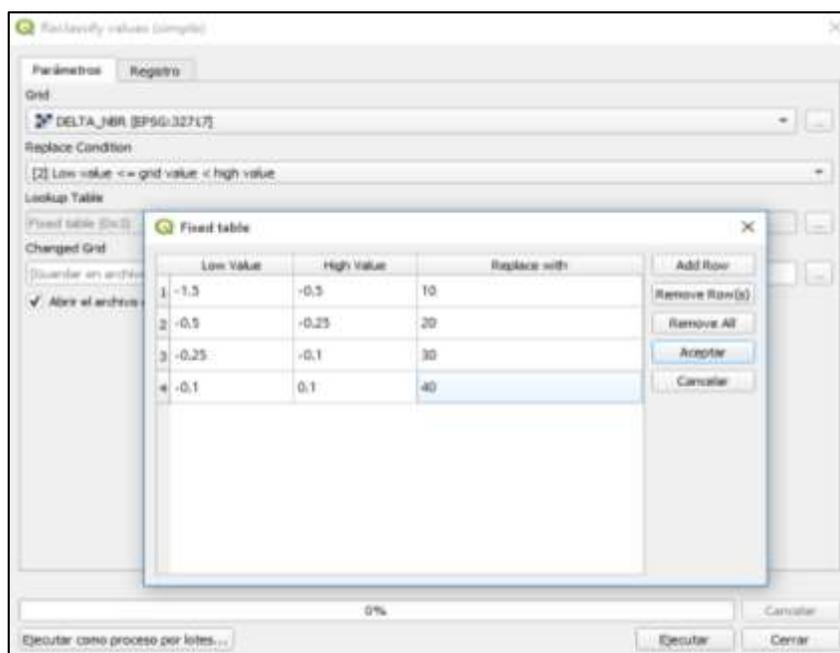
6. Determinación de la severidad de los incendios forestales

Para determinar la severidad de la afectación de los incendios forestales determinados en el presente estudio utilizamos dos Índices espectrales. El primero es el cálculo de la severidad mediante los valores del NBR en concordancia con el proyecto FIREMAN (Lutes et al., 2006), mencionado en la revisión bibliográfica del presente documento. Y la segunda consideramos la pérdida de biomasa verde (clorofila), luego del incendio lo cual provoca una reducción de la actividad fotosintética. Determinamos el índice NDVI antes y después del incendio.

a. Severidad mediante la diferencia de NBR

Para la determinación de la severidad del incendio por medio del índice NBR, utilizamos las imágenes raster de la diferencia entre el NBR post y pre incendio previamente generadas para la delimitación del área afectada. A las cuales les aplicamos una reclasificación para ubicar los valores del 10-40. En la figura 22, se observa los valores asignados para la reclasificación de acuerdo al rango de valores de severidad post-incendio del proyecto FIREMAN (Lutes et al., 2006).

Figura 22. Valores de reclasificación para determinar severidad de incendios forestales



Fuente: (Autor, 2019)

Mediante la herramienta Poligonizar disponible en la caja de herramientas del software QGIS 3.4, convertimos las imágenes raster obtenidas luego del proceso de reclasificación a archivos formatos shapefile, para así poder editar este archivo con mayor facilidad, poder generar atributos y cuantificar las áreas de afectación. En la figura 23 se encuentran los atributos generados para el incendio del 29 de agosto del 2018.

Figura 23. Tabla de atributos de archivo shapefile (NBR) severidad del incendio del 29 de agosto del 2018.

	DN	area_ha_	Intensidad
1	10	216,36000000000	Alta severidad
2	20	11,29000000010	Media severidad
3	30	0,26999999999	Baja severidad
4	40	0,11000000000	Nula severidad

Fuente: (Autor, 2019)

b. Severidad mediante NDVI

Para la determinación de la severidad del incendio por medio del índice NDVI. Primero mediante la herramienta de la Calculadora Raster, generamos el índice NDVI pre y post incendio utilizando las bandas de las imágenes previamente corregidas mediante la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad (2)$$

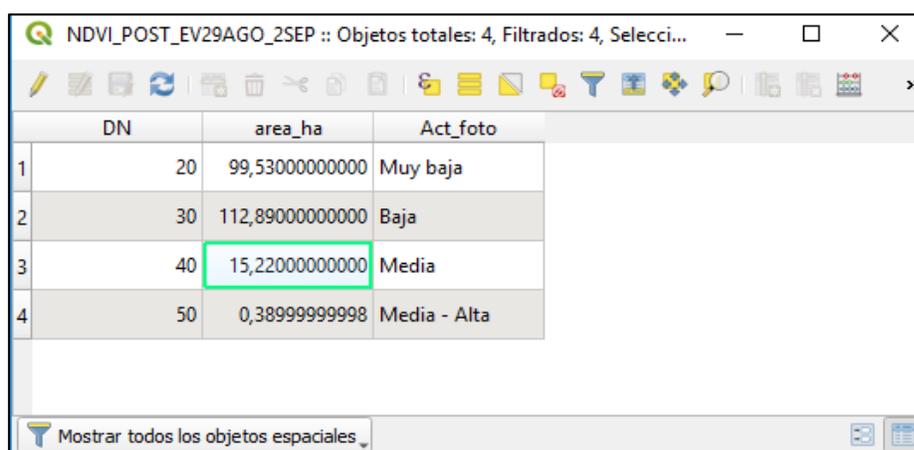
Donde:

IRC= Infrarrojo cercano (banda 5 Landsat8 y banda 8 Sentinel 2)

R= Rojo (banda 4 Landsat8 y banda 4 Sentinel 2)

Después reclasificamos las imágenes raster obtenidas de los índices NDVI pre y post para generar los rangos de valores para la actividad fotosintética asignándoles valores del 10-70. Asignando valores de actividad fotosintética a las áreas de estudio antes y después de los incendios forestales. Mediante la herramienta Poligonizar disponible en la caja de herramientas del software QGIS 3.4, convertimos las imágenes raster obtenidas luego del proceso de reclasificación a archivos formatos shapefile, para así poder editar este archivo con mayor facilidad, poder generar atributos y cuantificar la actividad fotosintética de las áreas afectadas por los incendios forestales. En la figura 24 se encuentran los atributos generados para el incendio del 29 de agosto del 2018.

Figura 24. Tabla de atributos de archivo shapefile (NDVI) severidad del incendio del 29 de agosto del 2018.



	DN	area_ha	Act_foto
1	20	99,530000000000	Muy baja
2	30	112,890000000000	Baja
3	40	15,220000000000	Media
4	50	0,389999999998	Media - Alta

Fuente: (Autor, 2019)

7. Análisis de los resultados obtenidos

Se generó mapas temáticos con el área afectada, intensidad y cobertura vegetal afectada de los incendios determinados en el presente estudio para poder mostrar de una manera más visual los resultados, también se generó una base de datos que contenga fecha, ubicación, área, intensidad y coberturas afectadas por los incendios forestales (anexo 3).

8. Presentación de Resultados

La socialización de los resultados obtenidos por medio del presente estudio se realizó a través de la plataforma Arcgis online, por medio de una aplicación web. Para que los datos y archivos cartográficos generados puedan ser utilizados como herramientas de investigación y planificación para futuros estudios relacionados con incendios forestales.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Resultados Generales

En el presente estudio el producto satelital MCD64A1 detectó un total de 52 píxeles con quema en la provincia de Chimborazo entre el año 2015 al 2018; cada uno de ellos con un área mínima igual o superior a 25 ha. De los cuales 14 se determinaron como registros erróneos ya sea por no poseer cubierta vegetal adecuada para poder ser determinados como incendios forestales (ver anexo 2) o porque cuando se validaron estas áreas con ayuda de imágenes satelitales no mostraron rastro de quemadas, y 2 no pudieron ser analizados por no existir imágenes satelitales de buena calidad que coincidan espacial y temporalmente con dichos eventos. Luego del análisis geoespacial se determinaron 10 eventos, los mismos que fueron analizados en el presente estudio para la determinación tanto de su superficie afectada como de la intensidad de los incendios.

a. **Incendios forestales por año**

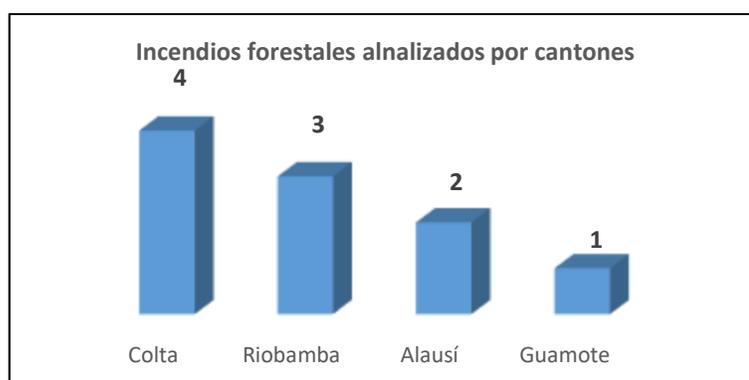
En el gráfico 1, se muestra el número de incendios forestales analizados por año; siendo el año 2015 el que más incendios registrando un total de 5 eventos. Esta información concuerda con los resultados obtenidos por Ospina, E. (2017) en su estudio de mapeo de áreas quemadas por incendios forestales a nivel nacional en el cual en sus resultados el año 2015 es el que más incendios presentó en los últimos 5 años, y también guarda relación con lo indicado por el MAE (2019), donde se identificó un patrón respecto a la frecuencia y afectación de incendios forestales en el Ecuador denota que con periodos de cada 3 años, y posterior aun año húmedo, es probable que el siguiente año tenga una alta afectación de incendios forestales. Ese patrón se evidenció para el 2012, 2015 y 2018 con superficies quemadas que ascienden a 26.350,4 ha, 31.057,1 ha y 26.647,2 ha respectivamente.

Gráfico 1. Incendios forestales analizados por año

Fuente: (Autor, 2019)

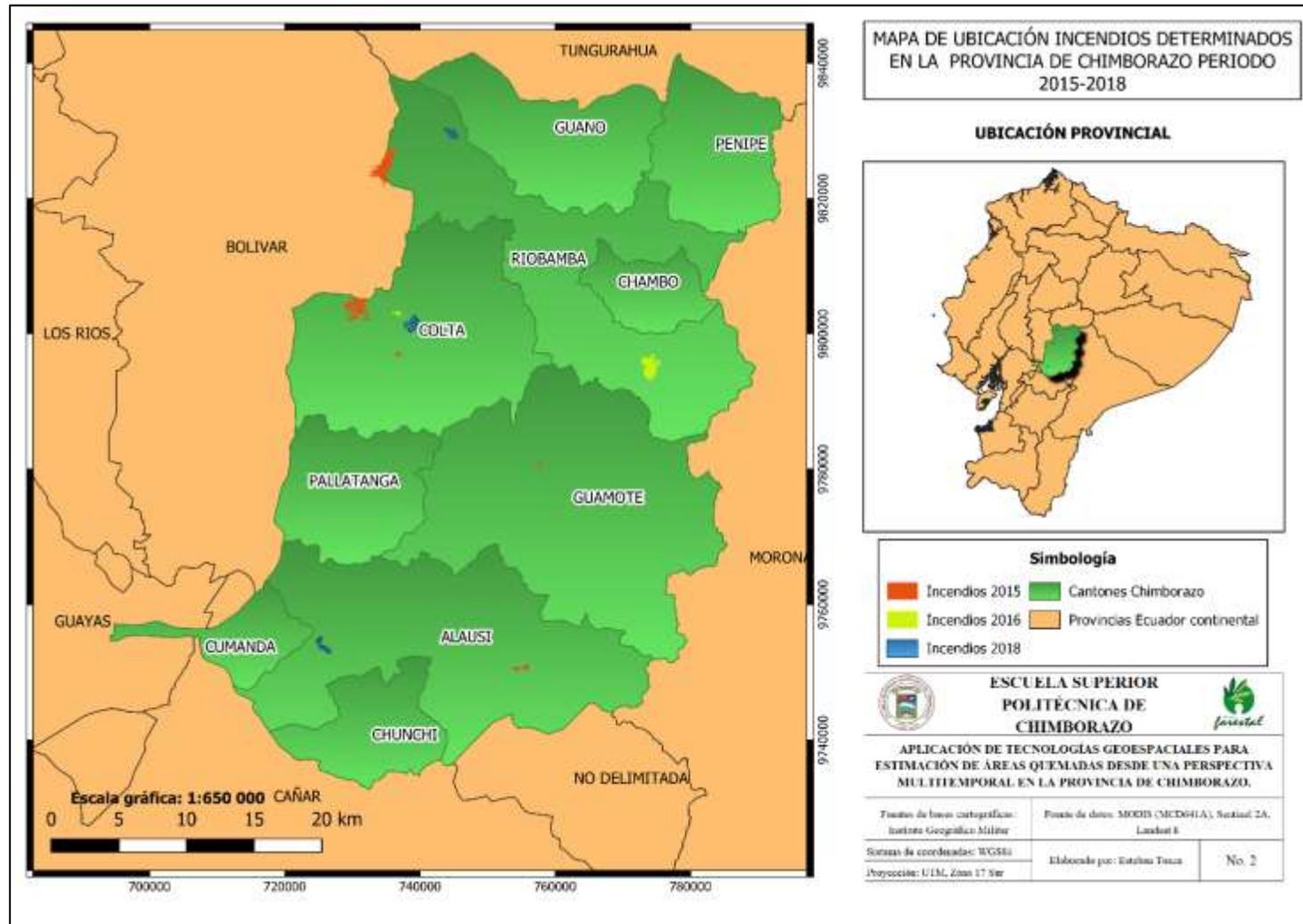
b. Incendios forestales a nivel Cantonal

En el gráfico 2, se muestra el número de incendios forestales analizados por cantón donde ocurrieron. El cantón Colta es el que más incendios presenta con un total de 4 eventos. Esta información concuerda con los resultados obtenidos por Ospina, E. (2017) en su estudio en el cual el cantón Colta se encuentra en el puesto número 14 de los cantones con más alta incidencia respecto a incendios forestales a nivel nacional, y siendo el primero a nivel de la provincia de Chimborazo.

Gráfico 2. Incendios forestales por cantones

Fuente: (Autor, 2019)

Mapa 2. Ubicación incendios determinados en la provincia de Chimborazo periodo 2015-2018



Fuente: (Autor, 2019).

2. Superficie afectada

Se determinó una superficie afectada total de 2760,59 hectáreas. La cual está dividida en 10 incendios forestales entre los años 2015 a 2018. A cada uno de ellos se les codificó asignándoles una letra para su identificación como se puede observar en la tabla 11. El incendio con mayor área de afectación, fue el J (12 a 21 de septiembre del 2015). Cabe mencionar que el mismo tuvo área de afectación en las provincias de Chimborazo y Bolívar. El segundo incendio registrado con mayor área de afectación es el I (15 a 20 de septiembre del 2015) en el cantón Colta.

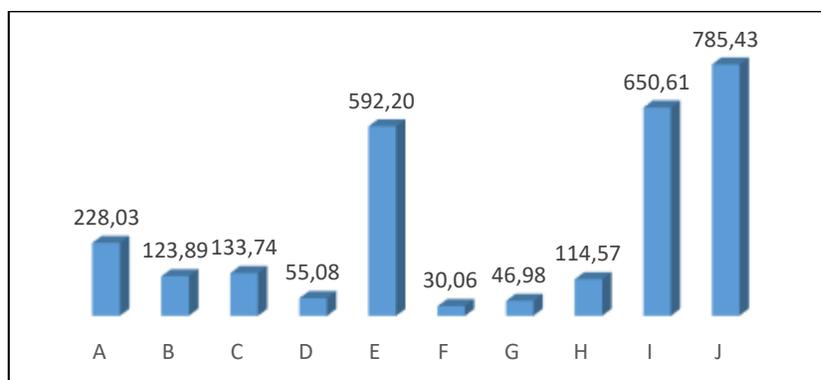
Tabla 11. Codificación de incendios forestales

Incendio forestal (código)	Fecha
A	27 de agosto del 2018
B	16 de septiembre del 2018
C	27 septiembre del 2018
D	19-25 de noviembre del 2016
E	23 de noviembre del 2016
F	24 agosto del 2015
G	27-28 agosto del 2015
H	06 de septiembre del 2015
I	15-20 septiembre del 2015
J	12-21 septiembre del 2015

Fuente: (Autor, 2019)

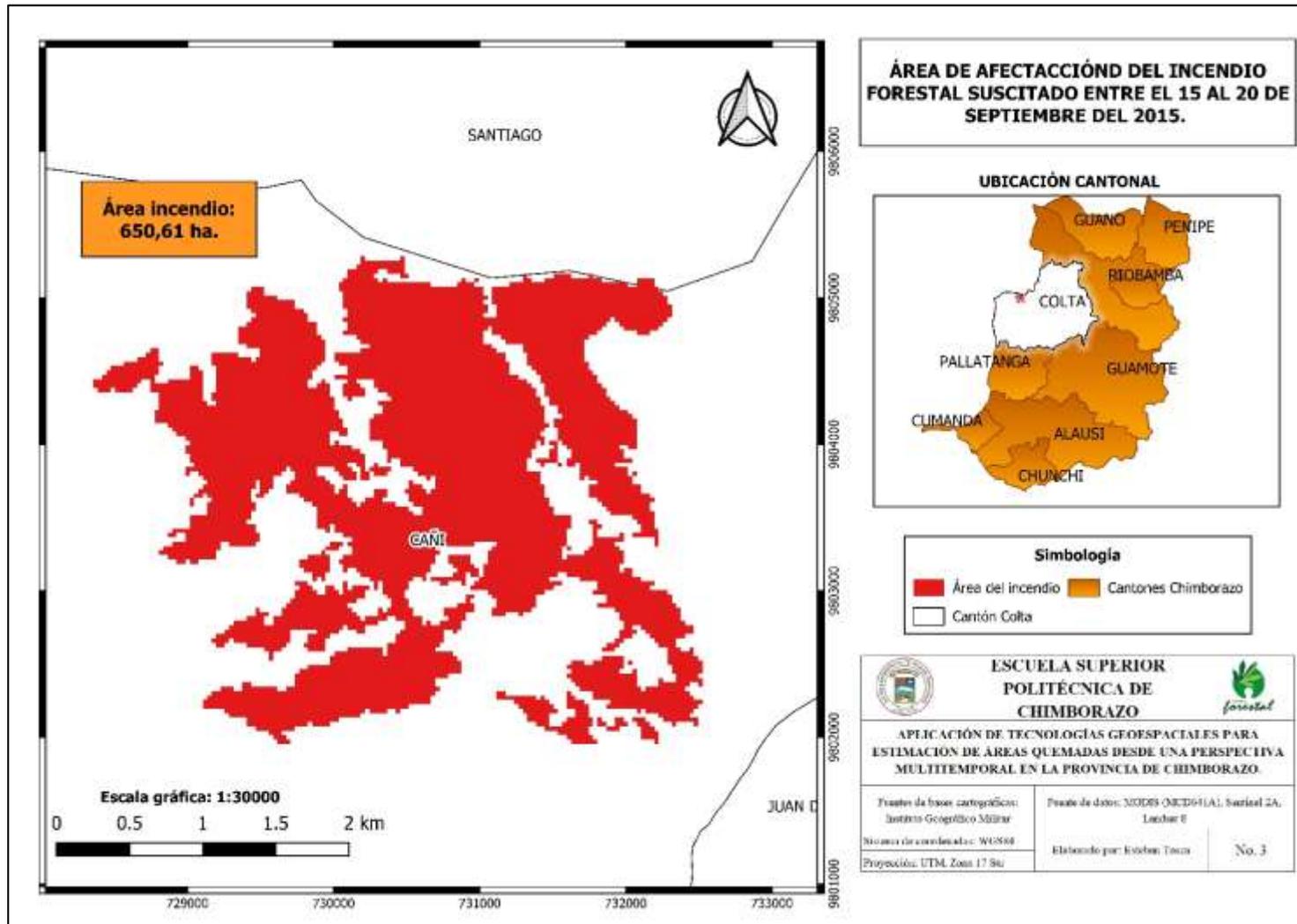
En el gráfico 3, se puede observar el área de afectación de los 10 incendios forestales objeto del presente estudio.

Gráfico 3. Área afectada por incendios forestales (ha)



Fuente: (Autor, 2019)

Mapa 3. Área de afectación incendio I (15 - 20 de septiembre del 2015)



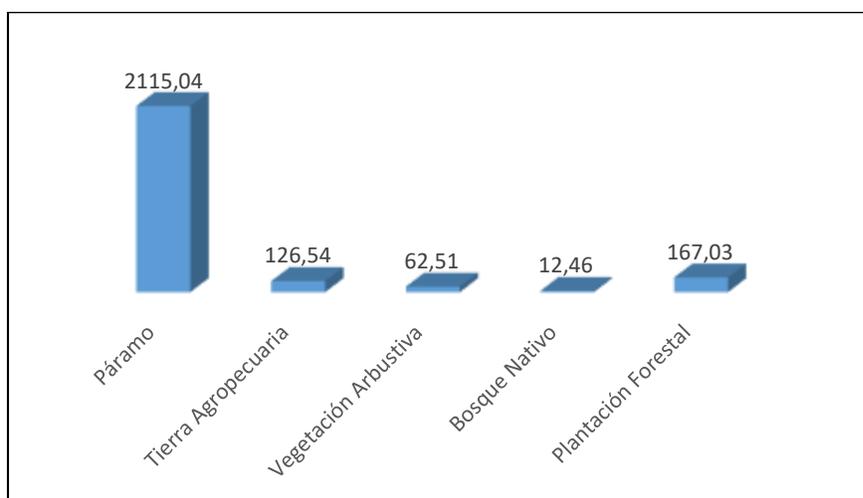
Fuente: (Autor, 2019)

a. Coberturas afectadas

Del total de la superficie afectada por incendios forestales determinada en el presente estudio, se encontró que las coberturas vegetales afectadas fueron las siguientes: bosque nativo, páramo, plantación forestal, tierra agropecuaria y vegetación arbustiva. Siendo el páramo la cobertura vegetal que más se quemó con un total de 2115,04 hectáreas, mientras que el bosque nativo fue la que menor superficie afectada presentó con un total de 12,46 hectáreas. En el gráfico 4, se observa las coberturas vegetales afectadas por los 10 incendios forestales objeto del presente estudio y su respectiva área.

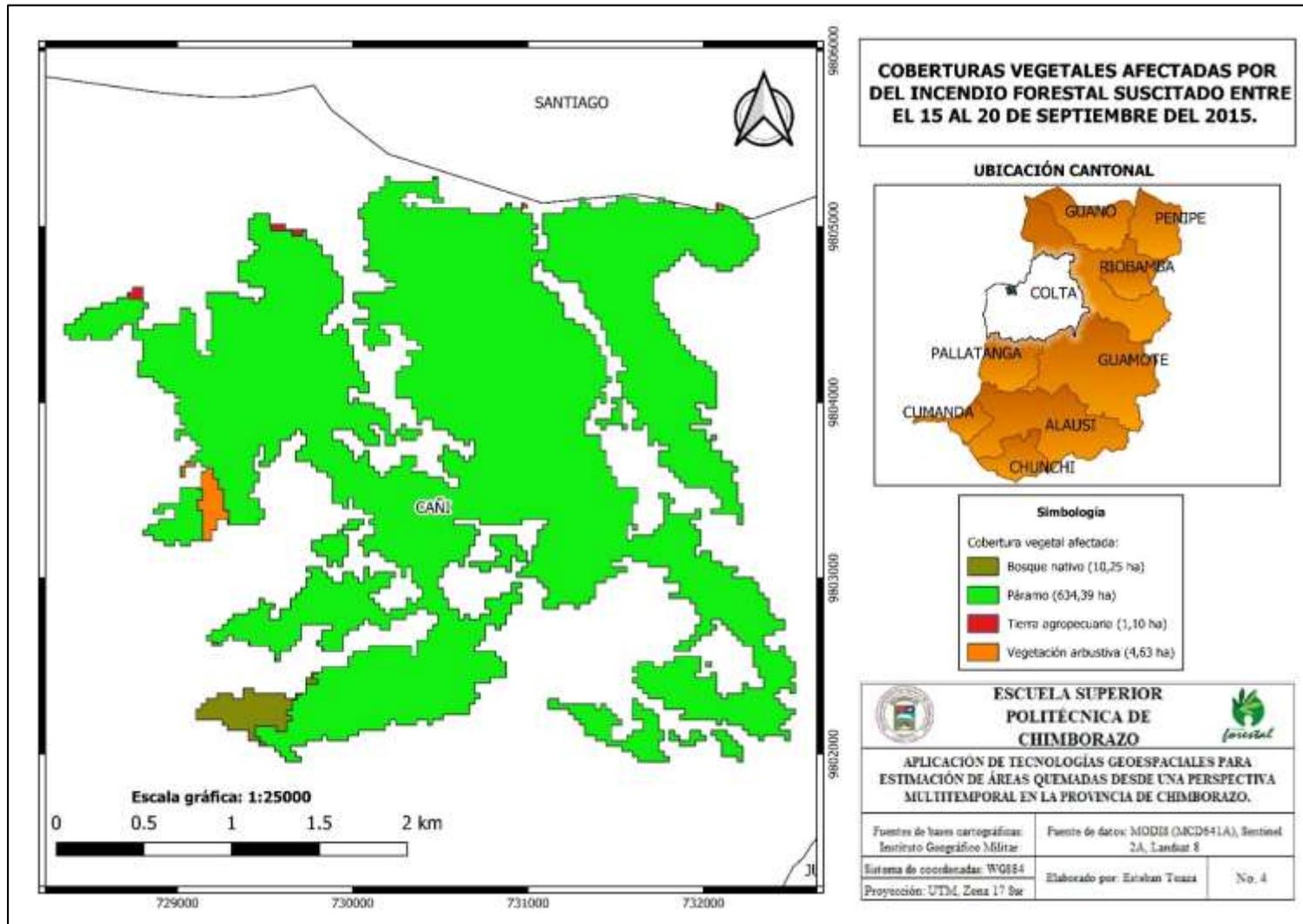
La incidencia de incendios forestales está directamente relacionada con las actividades antrópicas, siendo el páramo una de las zonas más vulnerables. En toda la extensión del páramo, existe la práctica común entre los campesinos de quemar la vegetación alta para proveer al ganado con pastos más verdes y tiernos que crecen después. En realidad, esto es solo un efecto visual.

Gráfico 4. Coberturas vegetales afectadas por incendios forestales (ha)



Fuente: (Autor, 2019)

Mapa 4. Coberturas vegetales afectadas por el incendio forestal I (15 - 20 de septiembre del 2015)



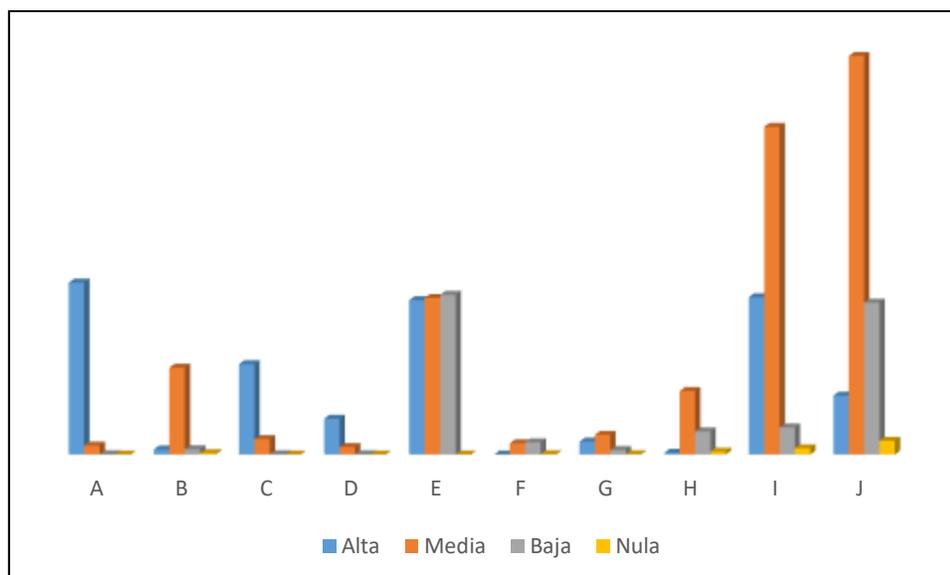
Fuente: (Autor, 2019)

3. Severidad de los incendios forestales

a. Mediante NBR

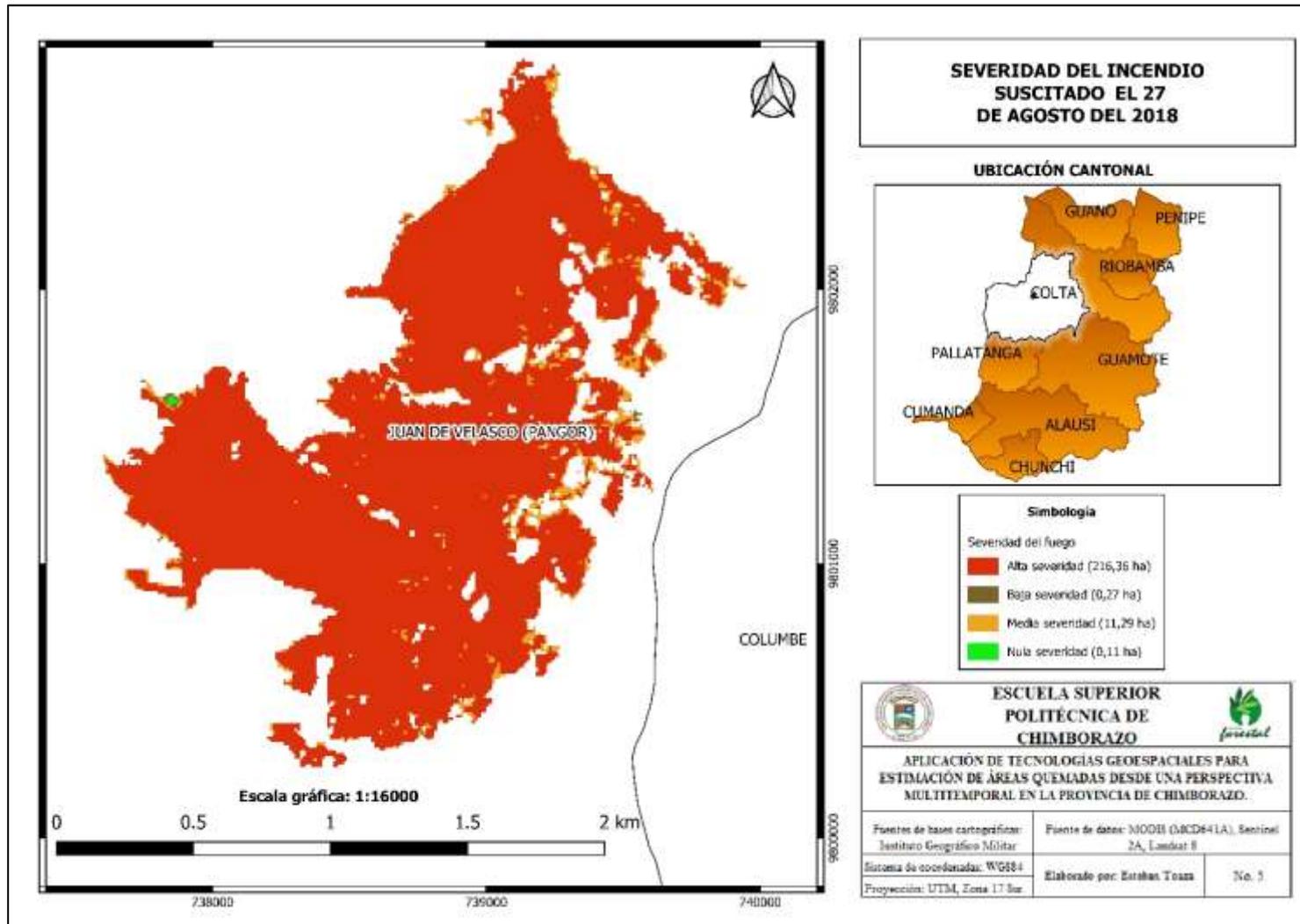
Del total de la superficie afectada por incendios forestales determinada en el presente estudio, se clasificó el grado de severidad de los incendios forestales en función a la afectación provocada a la vegetación, teniendo las siguientes clases de intensidad: alta, media, baja y nula. En el gráfico 6, se observa las clases de severidad y las áreas en hectáreas de las mismas de cada uno de los 10 incendios forestales objeto del presente estudio. En donde se observó que el incendio con mayor intensidad fue A (27 de agosto del 2018) en la parroquia Juan de Velasco, cantón Colta.

Gráfico 5. Severidad de los incendios forestales (ha)



Fuente: (Autor, 2019)

Mapa 5. Severidad del incendio A (27 de agosto del 2018)

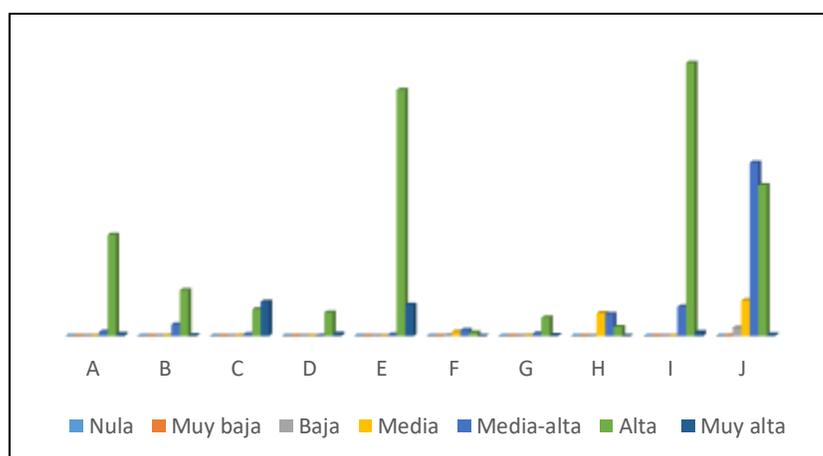


Fuente: (Autor, 2019)

b. Mediante NDVI

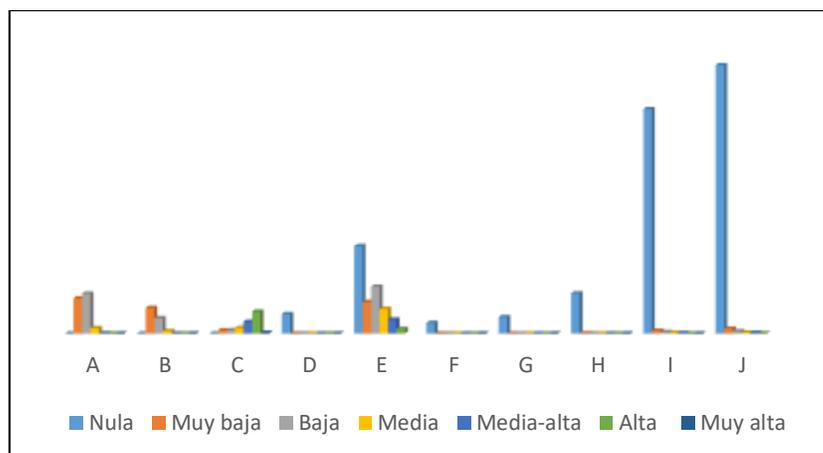
La determinación de la severidad del fuego por incendios forestales se la realiza de una forma más bien perceptiva que cuantitativa. Para esto utilizamos la comparación de la actividad fotosintética por medio de la interpretación del NDVI de la vegetación antes de que se dé el siniestro con la actividad fotosintética luego del siniestro. En el gráfico 6 podemos observar los rangos de actividad fotosintética para la vegetación existente antes de cada incendio, mientras que en gráfico 7 se encuentra representada la actividad fotosintética de la vegetación luego de producido el incendio.

Gráfico 6. Actividad fotosintética de la vegetación pre incendios



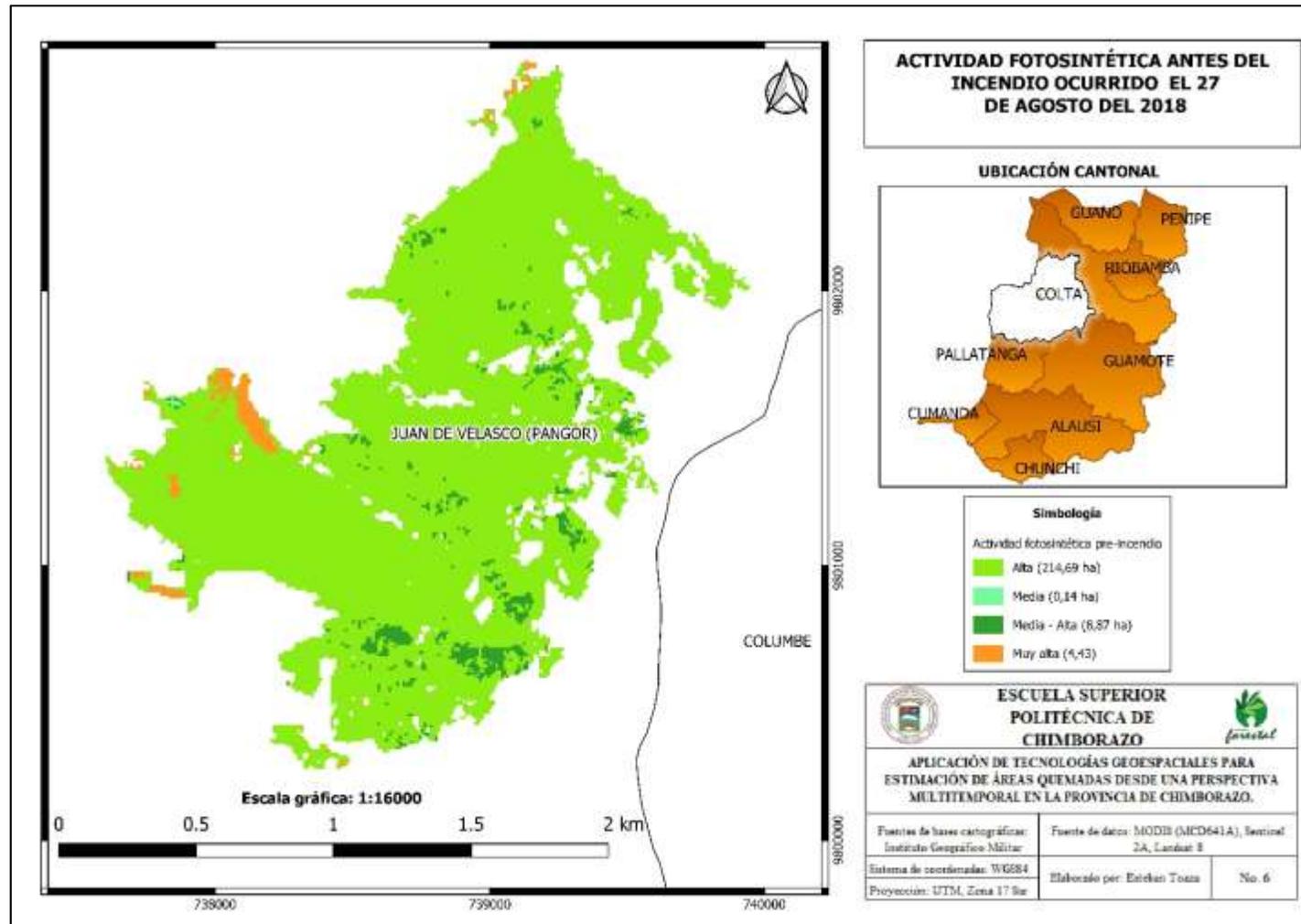
Fuente: (Autor, 2019)

Gráfico 7. Actividad fotosintética de la vegetación post incendios



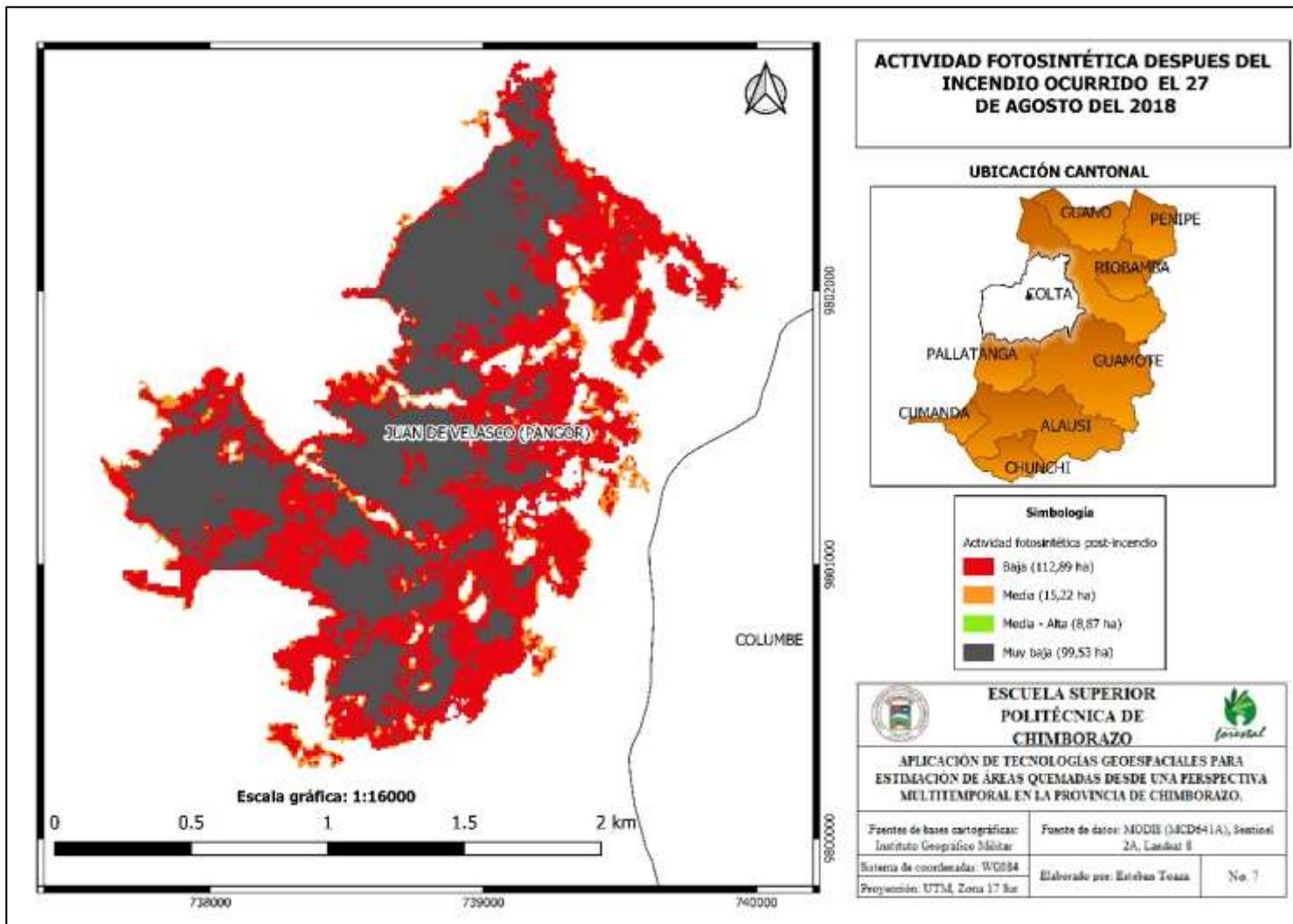
Fuente: (Autor, 2019)

Mapa 6. Actividad fotosintética antes del incendio ocurrido el 27 de agosto del 2018



Fuente: (Autor, 2019)

Mapa 7. Actividad fotosintética después del incendio ocurrido el 27 de agosto del 2018



Fuente: (Autor, 2019)

VI. CONCLUSIONES

1. La aplicación de tecnologías geoespaciales, demostró ser una alternativa práctica, relativamente precisa y sobre todo viable para el estudio sobre incendios forestales, ya que todos los insumos utilizados en la presente investigación son de descarga libre y gratuita
2. La escasez de información completa y precisa sobre delimitación de áreas afectadas, y peor aún un análisis y caracterización de los incendios forestales en nuestro país es preocupante. Lo que le da mayor valor práctico a la presente investigación y a investigaciones similares que se pueden realizar en el futuro.
3. El producto satelital MCD64A1, resultó no ser una fuente muy confiable para la determinación de incidencia de incendios forestales en zonas alto andinas, no solo por las limitaciones propias del producto satelital, sino también por las condiciones propias de esta zona como gran presencia de nubosidad lo que dificulta la toma de datos.
4. La delimitación de áreas de afectación de incendios forestales realizada mediante el índice espectral NBR realizado en el presente estudio, es una metodología que mostro ser muy buena para la discriminación de áreas afectadas sobre el fuego en los ecosistemas alto andinos donde se registró la mayoría de ocurrencia de incendios.
5. En el presente estudio se determinó que en la provincia de Chimborazo el cantón con mayor incidencia de incendios forestales es Colta, y dentro del cantón la parroquia con más ocurrencia de incendios es Juan de Velasco. Mientras que la cobertura vegetal con mayor afectación es el páramo seguido por las plantaciones forestales registrando un área de afectación de 2115,04 y 167,03 hectáreas respectivamente.
6. En lo referente al grado de afectación y severidad de los incendios forestales, al no existir estudios realizados en nuestro país sobre el tema, la metodología aquí aplicada es una herramienta aplicable el desarrollo de estudios más específicos sobre la ocurrencia de incendios forestales.

VII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar estudios similares utilizando tecnologías geoespaciales para la gestión integral de los incendios forestales como se lo realiza en otros países. Con el fin de seguir probando metodologías y así poder determinar las que mejor se ajusten a las zonas de nuestro país.
2. Se debe realizar proyectos de vinculación en los cuales se inmiscuya a las instituciones encargadas de registrar y monitorear los incendios forestales, para conjuntamente realizar estudios similares en los cuales se pueda combinar las metodologías a partir de tecnologías geoespaciales y levantamiento de campo, para así poder tener resultados más completos y precisos.
3. El instrumento MODIS es muy versátil y nos brinda muchos productos que pueden ser aplicados como herramienta para estudios en diversos ámbitos por lo que se recomienda realizar estudios utilizando estos diversos productos ya que son de descarga libre y gratuita.

VIII. RESUMEN

La investigación propuso: aplicar tecnologías geoespaciales para la estimación de áreas quemadas desde una perspectiva multitemporal en la provincia de Chimborazo; los insumos utilizados fueron el producto para áreas quemadas de MODIS denominado MCD64A1, que determina áreas quemadas mayores o iguales a 25 hectáreas y su fecha de ocurrencia. Para la delimitación del área de afectación y severidad de cada incendio se utilizaron imágenes Landsat8 y Sentinel 2. El pre y post procesamiento se lo realizó mediante el programa QGIS 3.4, que es una aplicación profesional de SIG que está construida sobre un software libre y de código abierto. Como resultado del análisis y procesamiento del producto satelital MCD64A1 se identificó un total de 52 píxeles que presentaron quema en la provincia de Chimborazo entre los años 2015 al 2018, con los cuales determinamos un total de 10 incendios forestales con un área total de afectación de 2760,59 hectáreas. El año 2015 es el que más incendios forestales registró con un total de 5 eventos determinados. El cantón Colta es el que mayor recurrencia de incendios forestales presentó con un total de 4 eventos, de los cuales 3 se registraron en la parroquia Juan de Velazco. La cobertura vegetal más afectada por incendios forestales fue el páramo con un área de afectación de 2115,04 hectáreas, seguida de las plantaciones forestales (167,03 ha.), tierra agropecuaria (126,54 ha.), vegetación arbustiva (62,51 ha.) y bosque nativo (12,46 ha.). La presente investigación demostró que la aplicación de tecnologías geoespaciales son un recurso efectivo y práctico para la gestión de superficies afectadas por incendios forestales ya que los insumos utilizados son de descarga libre y gratuita.

Palabras clave: tecnologías geoespaciales - incendios forestales - cobertura vegetal.

Por: Esteban Toaza



IX. SUMMARY

The research proposed: apply geospatial technologies for estimate burned areas from a multitemporal perspective in Chimborazo Province; the supplies used were the product for burned areas of MODIS called MCD64A1, which determines burned areas greater than or equal to 25 hectares and their date of occurrence. For the delimitation of the area of affectation and severity of each fire, Landsat8 and Sentinel2 images were used. The pre and post processing is done through the QGIS3.4 program, which is a professional GIS application that is built on free and open source software. As a result of the analysis and processing of the satellite product MCD64A1 a total of 52 pixels were identified that showed burning in the province of Chimborazo between 2015 and 2018, with which we determined a total of 10 wildfires with a total area of 2760.59 hectares. The year 2015 is the one with the most forest fires with a total of 5 events. The Colta Canton is the one with the highest recurrence of forest fires with a total of 4 events, of which 3 were registered in the Juan de Velazco Parish The most affected plant cover for forest fires was the wasteland with an area of affectation of 2115.04 hectares, followed by forest plantations (167.03 ha), agricultural land (126.54 ha), shrub vegetation (62.51 ha), and native forest (12.46 ha). The present research demonstrated that the application of geospatial technologies is an effective and practical resource for the management of areas affected by forest fires since the supplies used are free and free download.

KEYWORDS: GEOSPATIAL TECHNOLOGIES, FOREST FIRES, PLANT COVER.



X. BIBLIOGRAFÍA

Abreu, C. C. (2017). Firmas espectrales y características de coberturas fundamentales. Universidad de la República Uruguay. Montevideo, Uruguay. pp. 6-14.

Blackburn G., & Milton E. (1995). Seasonal variations in the spectral reflectance of deciduous tree canopies. *International Journal of Remote Sensing* (16), 709-720.

Bravo, N. (2017). Teledetección espacial (1ª. ed). Huánuco, Perú. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de <https://acolita.com/descargar-libro-pdf-teledeteccion-espacial/>.

Botella-Martínez, M. A., & Fernández-Manso, A. (2017). Estudio de la severidad post-incendio en la comunidad Valenciana comparando los índices dNBR, RdNBR y RBR a partir de imágenes landsat 8. *Revista de Teledeteccion*, 2017(49 Special Issue), 33–47. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7095>.

Boschetti, L., Roy, D., Hoffmann, A., & Humber, M. (2015). MODIS Collection 5.1 Burned Area Product – MCD45. Users Guide. USGS. University of Maryland. Version 3.1.0. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de http://modis-fire.umd.edu/files/MODIS_Burned_Area_Collection51_User_Guide_3.1.0.pdf

Bustamente, D. (2017). Escenario de cambio climático a nivel de subcuencas hidrográficas para el año 2050 de la provincia de Chimborazo-Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* 26(2): 15-27.

Bustos, A., Segura, D., Coronel, J., & Onofa, A. (2019). Los incendios forestales en el Ecuador. Programa Amazonía sin Fuego. Subsecretaría de Patrimonio Natural. Ministerio del Ambiente. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de <https://osbodigital.es/2019/03/25/los-incendios-forestales-en-ecuador/>

Campbell, J. R. (1995). *Las Radiaciones II. El manejo de las radiaciones nucleares*. México: Fondo de Cultura Económica. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/radia2.htm>.

Chuvieco, E. (2000). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. (3ª. ed.) Revisada. España. Ediciones RIALP.

Chuvieco E., & Congalton, R. (1988). Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data. *Geocarto International*. pp. 41-53. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106048809354180>

Corti, D. (2014). *Inter-comparación de productos globales de área quemada, generados por teledetección*. (Tesis de posgrado). Universidad de Alcalá. Madrid, España.

De Santis A., & Chuvieco E. (2007). Burn severity estimation from remotely sensed data: performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment* (108), 422-435.

Duncan J., Stow D., Franklin J., & Hope J. (1993). Assessing the relationship between spectral vegetation indices and shrub cover in the Jornada Basin, New Mexico. *International Journal of Remote Sensing* (14), 3395-3416.

Fernández, V., Iraola, P & Resnichenko, Y. (2009). Aplicación de SIG y modelos de propagación a la identificación de áreas de riesgo de incendios forestales en la zona costera. Proyecto PNUD URU 06/016. Laboratorio de técnicas aplicadas al análisis del territorio, Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias. Montevideo, Uruguay. p. 12.

Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D., Hoffman, A. A., & Humber, M. (2016). Collection 6 MODIS Burned Area product User Guide. *Nasa*, (10), 1–26.

Guyot G., Baret F., & Jacquemoud S. (1992). Imaging spectroscopy for vegetation studies. *Imaging Spectroscopy: Fundamentals and Prospective Applications*. pp. 145-165. Países Bajos. Kluwer Academic Publishers.

Haydee, K. V. (2001). Introducción a la teledetección cuantitativa. Alcalá. España. pp. 11-14, . Recuperado el 3 de agosto del 2019, de <http://files.especializacion-tig.web-node.com/200000030-4858f4952d/3.-Sistemas%20Satelitales.pdf>.

Heredia, A. (2003). Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes Landsat etm+. *Geofocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, pp.216–234. Recuperado el 3 de agosto, de http://geofocus.rediris.es/docPDF/Articulo12_2003.pdf.

Hernandez, J. (2009). Patrones de respuesta espectral. Chile: Facultad de Ciencias Forestales. pp. 7-12. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de <http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Hern%C3%A1ndez%20&%20Montaner%202009%20SAF.pdf>.

Hope A., & McDowell T. (1992). The relationship between surface temperature and spectral vegetation index of a tallgrass prairie: Effects of burning and other landscape controls. *Journal Remote Sense* (13), 2849-2863.

Hunt E., & Rock B. (1989). Detection of changes in leaf water content using near and mid-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment* (30), 43-54.

Jia Z., Yang J., Wu X., Wang F., & Liu S. (2006). The sensitive determination of nuclei acids using a fluorescence-quenching method. *Luminescence*, 4 (21), 207-212.

Key C., & Benson N. (2006). Sampling and Analysis Methods, en FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. En D. Lutes, R. Keane, y J. Caratiet (Edits.), *Integration*

of Standardized Field Data Collection Techniques and Sampling Design With Remote Sensing to Assess Fire Effects. Fort: Department of Agriculture, Forest. Recuperado el 3 de agosto, de https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr164.pdf.

Labrador, M., Évora, J., & Pérez, M. (2012). Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de http://www.gmrcanarias.com/wp-content/uploads/2016/01/20_catalogo_satelites_es.pdf.

Leonberger. (2002). Revealing the small range of radio-microwave frequencies. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/37/5/403>.

Lutes D., Keane R., Caratti J., Key C., Benson N., Sutherland S., & Gangi L. (2006). FIRE-MON: *Fire effects monitoring and inventory system*. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/24042/24042>.

Maguire, D., Kouyoumijian, V., & Smith, R. (2012). 24 beneficios de los SIG. Orbemapa. Blog. Recuperado el 3 de agosto, de <http://www.orbemapa.com/2012/08/24-beneficios-de-los-sig.html>.

Mas, J. (2011). Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. (1ª. ed). México D.F., México. ISBN:978-607-7908-55-5. pp. 11-62.

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2013). Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Quito, Ecuador: Subsecretaría de Patrimonio Natural.

Ministerio del Ambiente del Ecuador (2016). Informe sobre los reportes del módulo de incendios forestales del Sistema de Administración Forestal – SAF. Quito, Ecuador. pp. 1-3

Michalijos, M. P., & Uboldi, J. (2014). Propuesta metodológica para la evaluación de áreas afectadas por incendios mediante el uso de imágenes satelitales (Sierra de la Ventana, Argentina). *Revista de Geografía Norte Grande*, (56), 223–234.

Orozco, J. (2014). Crisis ambiental en tiempos de crisis sistémica. Recuperado el 3 de agosto, de <https://doi.org/10.2307/j.ctvpv50bh.8>.

Ospina, E. (2017). Mapeo de áreas quemadas por incendios forestales en el Ecuador utilizando información satelital de la NASA, período 2000-2016. (Tesis de grado. Ingeniero Ambiental). Escuela .Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Pérez, D. (2007). Introducción a los Sensores Remotos. Buenos Aires, Argentina: Laboratorio de Tectónica Andina. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de <https://studylib.es/doc/4862480/introducci%C3%B3n-a-los-sensores-remotos>.

Pilar, M., Larissa, K., & Noguera, R. (2010). Cartografía de incendios forestales en Paraguay mediante imágenes AQUA-MODIS. Serie Geográfica. Asunción, Paraguay. pp. 2-9. Recuperado el 3 de agosto, de http://dspace.uah.es/bitstream/handle/10017/14223/61_70_cartograf%C3%Da_Mart%C3%ADn_SG_2010_N16.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Reuter, F (2009). Principios de teledetección. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-33-Principios-teledeteccion-REUTER.pdf>.

Rodríguez, O., & Arredondo, H. (2005). Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicado en estudios de Ingeniería Civil. (Tesis de grado. Ingeniero Civil). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.

Romero, F. S. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. Madrid. España. Revista AquaTIC. 24, pp. 13-41.

Rouse J., Haas R., Schell J., & Deering D. (1973). Monitoring vegetation system in the great plains with ETRS. *En Third ERST Symposium*. pp. 309-317. NASA. Recuperado el 3 de agosto del 2019, de <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19740022614>.

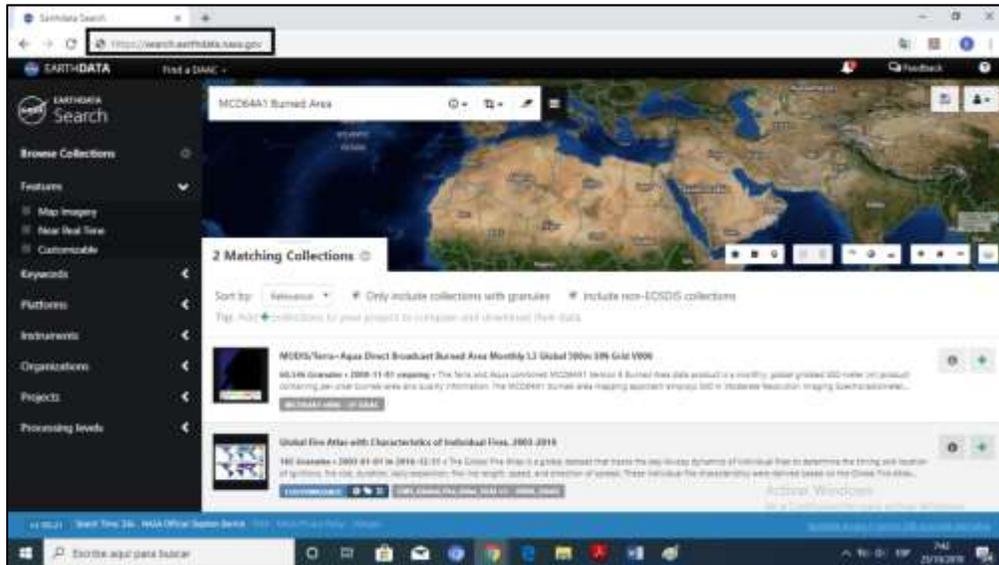
Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. (2018). Informe de situación incendios forestales a nivel nacional. Recuperado el 3 de agosto de 2019, de <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2018/10/SITREP-5-Informe-de-Situaci%C3%B3n-SGR-2018-031008.pdf>.

White, J., Ryan K., & Running, S. (1996). Remote sensing of forest fire. International Journal of Wildland Fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 3(6), 125-136.

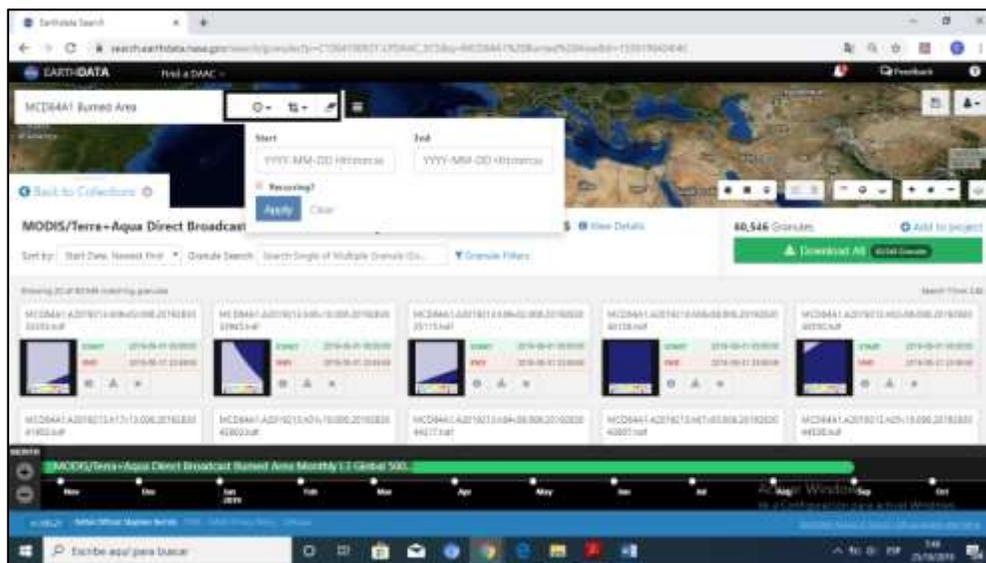
XI ANEXOS

Anexo 1. Obtención del producto satelital MCD64A1

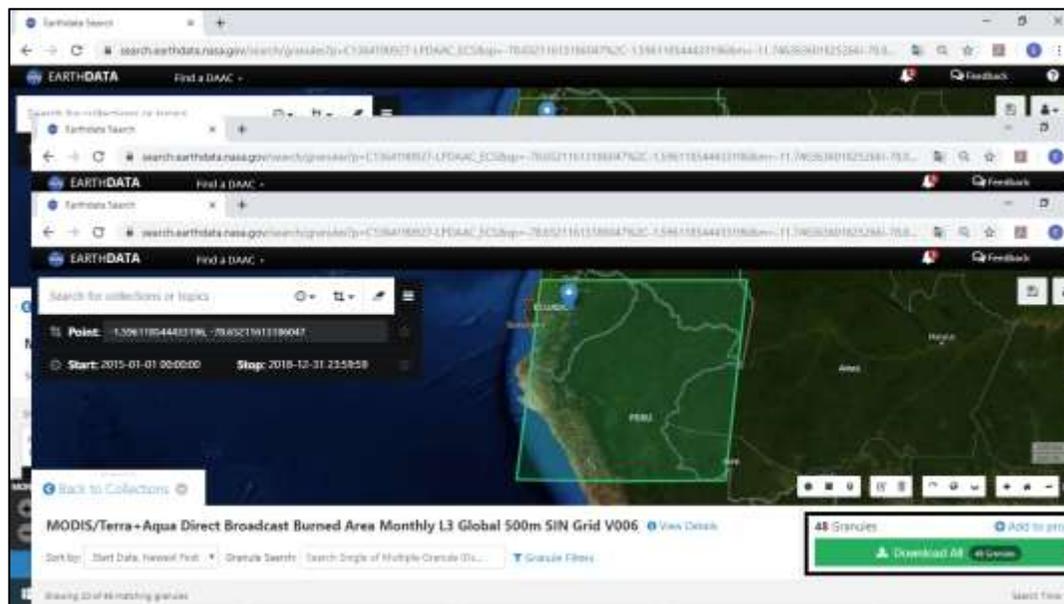
El producto satelital MCD64A1 se obtuvo por medio del portal EarthData, el cual posee las herramientas necesarias para gestionar la descarga de datos sobre la tierra procedentes de la NASA.



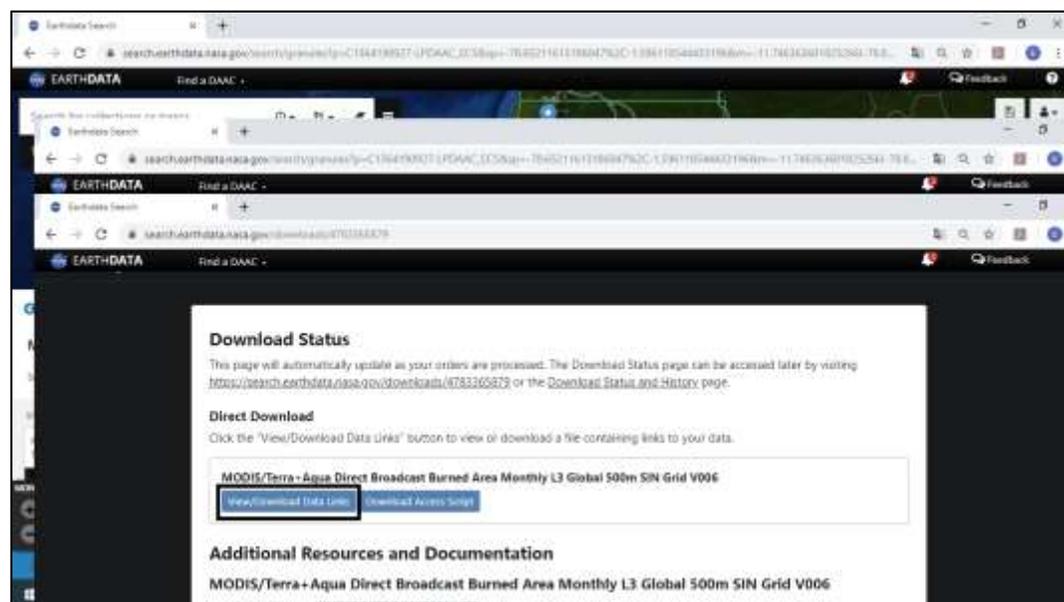
Una vez realizada la búsqueda del producto, la interfaz del portal nos permite afinar nuestra búsqueda por medio de un filtro temporal y un espacial.



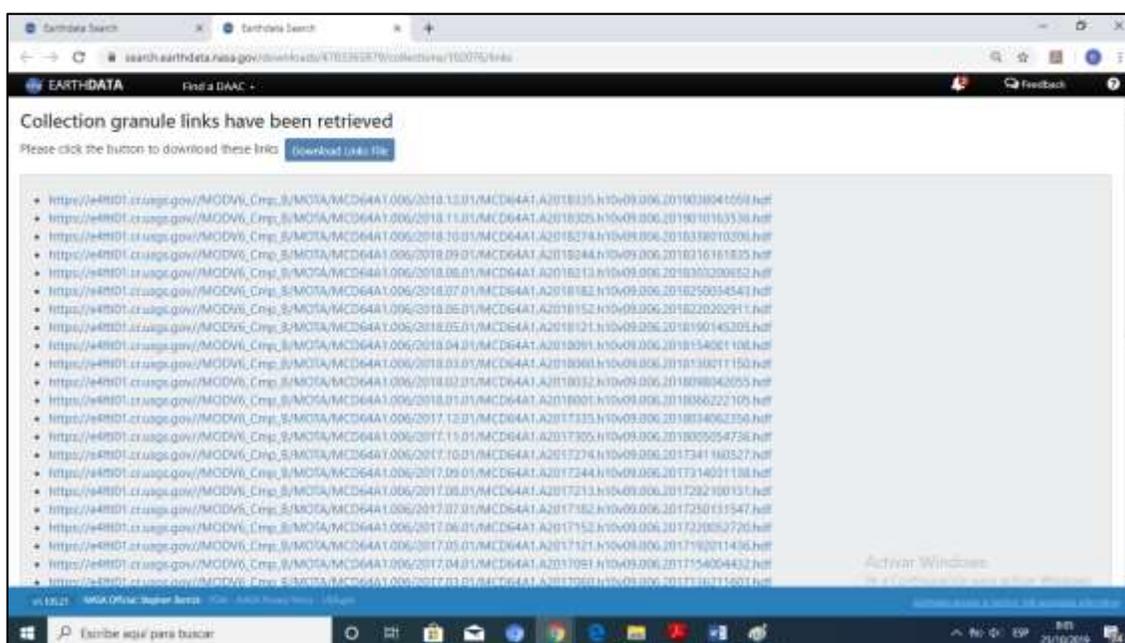
Una vez afinada la búsqueda nos muestra la imagen necesaria para cubrir nuestra área de estudio y el periodo temporal necesario en la pestaña de descarga nos muestra la cantidad de imágenes necesarias para cubrir nuestro requerimiento.



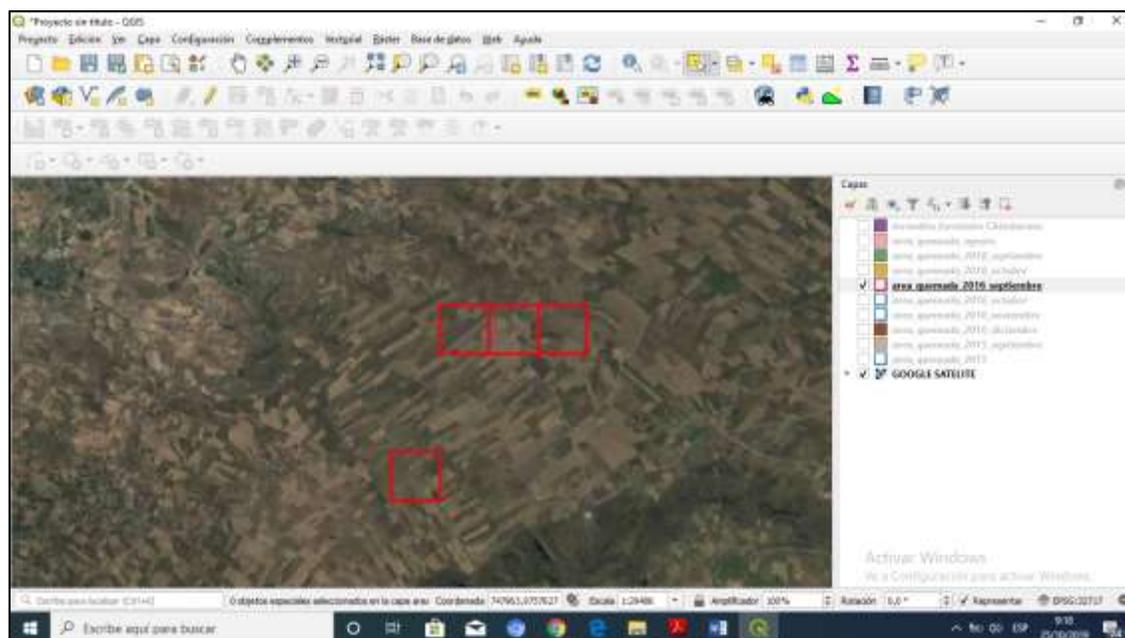
El siguiente paso es generar los links de descarga.



Una vez generados los links, procedemos a la descarga del producto MCD64A1 mes a mes hasta completar el periodo temporal requerido.



Anexo 2. Píxeles con quema que no presentan cobertura vegetal adecuada para ser determinado como incendio forestal



Anexo 3. Base de datos incendios determinados en el presente estudio.

EVENTO	FECHA	CANTON	PARROQUIA	COMUNIDAD
A	27-ago-18	Colta	Juan de Velasco	Teyepac Gatazo/Rumipamba/Juan Diego
B	16-sep-18	Riobamba	San Juan	Santa Teresita/Tambohuasha
C	27-sep-18	Alausí	Huigra	Tilangue
D	19-25-nov-16	Colta	Juan de Velasco	Teyepac Alto/Teyepac Bajo
E	23-nov-16	Riobamba	Pungalá	Peltetec
F	24-ago-15	Guamote	Guamote	Zona 2
G	27-28-ago-15	Colta	Juan de Velasco	Ajospamba
H	06-sep-15	Alausí	Achupallas	Cabecera parroquial
I	15-20-sep-15	Colta	Cañi	Cañi/Silapala/Ambrosio Lasso
J	12-21-sep-15	Riobamba	San Juan	Ganquis/San Juan

Anexo 4. Superficies afectadas por incendios forestales.

EVENTO	ÁREA	PÁRAMO	Tierra Agropecuaria	Vegetación Herbácea	Vegetación Arbustiva	Bosque Nativo	Plantación Forestal
A	228,03	204,62	23,39	0,00	0,00	0,00	0,00
B	123,89	116,38	7,51	0,00	0,00	0,00	0,00
C	133,74	0,00	60,39	38,20	32,94	2,21	0,00
D	55,08	36,55	5,73	0,00	0,00	0,00	12,80
E	592,20	579,76	12,60	0,00	0,00	0,00	0,00
F	30,06	0,00	0,77	0,00	0,00	0,00	29,29
G	46,98	24,66	2,83	0,00	0,00	0,00	19,49
H	114,57	96,40	12,22	5,95	5,94	0,00	0,00
I	650,61	634,39	1,10	0,00	4,63	10,25	0,00
J	785,43	422,25	0,00	0,00	18,99	0,00	105,46

Anexo 5. Intensidad de los incendios forestales.

EVENTO	ÁREA	Alta	Media	Baja	Nula
A	228,03	216,36	11,29	0,27	0,11
B	123,89	6,35	109,26	6,74	1,51
C	133,74	113,75	19,56	0,43	0
D	55,08	45,09	9,36	0,45	0,18
E	592,20	194,22	196,92	201,06	0
F	30,06	0	14,04	15,48	0,54
G	46,98	16,2	24,75	5,58	0,45
H	114,57	2,25	79,83	28,98	3,51
I	650,61	197,91	410,58	34,11	8,01
J	785,43	74,07	498,96	191,16	17,37

Anexo 5. Actividad fotosintética antes de los incendios forestales.

EVENTO	ÁREA	Nula	Muy baja	Baja	Media	Media-alta	Alta	Muy alta
A	228,03	0	0	0	0,14	8,87	214,69	4,33
B	123,89	0	0	0,11	0,71	24,15	97,32	1,61
C	133,74	0	0	0	0,47	3,95	56,67	72,65
D	55,08	0	0	0	0	0,54	49,86	4,68
E	592,20	0	0	0	0	3,33	522,45	66,42
F	30,06	0	0	1,26	8,82	12,51	7,47	0
G	46,98	0	0	0	0,45	5,4	38,97	2,16
H	114,57	0	0	0	48,69	46,62	19,26	0
I	650,61	0	0	0	0,27	62,55	579,69	8,1
J	785,43	0	0,54	17,64	75,69	367,92	320,49	3,15

Anexo 5. Actividad fotosintética después de los incendios forestales.

EVENTO	ÁREA	Nula	Muy baja	Baja	Media	Media-alta	Alta	Muy alta
A	228,03	0	99,53	112,89	15,22	0,39	0	0
B	123,89	0,02	72,93	43,93	6,98	0,04	0	0
C	133,74	0,26	9,33	10,14	16,24	33,52	62,16	2,09
D	55,08	55,08	0	0	0	0	0	0
E	592,20	247,68	89,46	132,93	69,66	39,42	13,05	
F	30,06	30,06	0	0	0	0	0	0
G	46,98	46,71	0,27	0	0	0	0	0
H	114,57	113,58	0,81	0,18	0	0	0	0
I	650,61	635,22	8,1	3,96	2,07	1,26	0	0
J	785,43	759,69	13,68	6,57	2,7	2,07	0,72	