



Análisis de severidad de incendios forestales como contribución a la gestión de riesgos.

Casos de estudio: Cantón Quilanga 2019, Volcán Casitagua 2020

Panimboza Deleg, Jonathan Isaías

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente

Cnrl. de C.S.M. Estrella Paredes, Carlos Manuel

20 agosto de 2021



Document Information

Analyzed document	Tesis alumno Jonathan Paninboza.docx (D111518152)
Submitted	8/20/2021 7:04:00 PM
Submitted by	Juanita del Carmen Garcia Aguilar
Submitter email	jcgarcia@espe.edu.ec
Similarity	4%
Analysis address	jcgarcia.espe@analysis.orkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/download/8934/10319 Fetched: 11/18/2019 7:58:28 AM		1
W	URL: https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/34445/1/Trabajo%20de%20titulacion.pdf Fetched: 12/28/2020 11:17:25 AM		2
W	URL: https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/23135/ArenasCabreraJonathanEduardo%26NoySu%C3%A1rezBrayamAlejandro2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 3/19/2021 6:33:34 PM		2
W	URL: https://docplayer.es/127629819-Universidad-de-ciencias-y-artes-de-chiapas.html Fetched: 2/2/2021 8:03:51 AM		2
W	URL: https://idoc.pub/documents/teledeteccionpdf-d4pqzm9z7rnp Fetched: 12/15/2020 11:11:53 PM		2
W	URL: http://dspace.espe.edu.ec/bitstream/123456789/14338/1/33T00237.pdf Fetched: 3/19/2021 4:10:50 AM		1
W	URL: https://www.researchgate.net/publication/326067811_Estimacion_del_grado_de_severidad_de_incendios_en_el_sur_de_la_provincia_de_Buenos_Aires_Argentina_usando_Sentinel-2_y_su_comparacion_con_Landsat-8 Fetched: 12/2/2019 8:25:10 AM		4
W	URL: https://core.ac.uk/download/pdf/58908575.pdf Fetched: 11/25/2020 5:54:46 PM		1
W	URL: http://www.aet.org.es/congresos/xviii/Libro_ACTAS_XVIII_AET.pdf Fetched: 3/30/2021 9:31:57 AM		1
W	URL: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-70892010000100008&ing=es&lng=es.SNGRE Fetched: 8/20/2021 7:05:00 PM		1
W	URL: http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/16619/1%29%20An%C3%A1lisis%20de%20la%20din%C3%A1mica%20temporal%20NDVI%20en%20la%20RECC%201986%2C%202001%20y%202017.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 1/16/2021 11:27:43 PM		1

Original

W URL: <https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/community/sentinel-2-s2cloudless>  **8**
Fetched: 8/20/2021 7:05:00 PM

URL: https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/7.%20Sentinel_2_Metodolog%C3%ADa_Mapas_Bosque_Nativo_2016_Proyecto_REDD%2B_UY%20%281%29.pdf  **1**
Fetched: 7/9/2020 1:15:54 PM


CARLOS M. ESTRELLA P.
CUL. CSU - REDD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE
CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación “Análisis de severidad de incendios forestales como contribución a la gestión de riesgos. Casos de estudio: Cantón Quilanga 2019, Volcán Casitagua 2020” fue realizado por el Sr. Panimboza Deleg, Jonathan Isaías, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de agosto de 2021

CARLOS
MANUEL
ESTRELLA
PAREDES

Firmado
digitalmente por
CARLOS MANUEL
ESTRELLA PAREDES
Fecha: 2021.09.15
23:42:44 -05'00'

Crnl. De C.S.M. Estrella Paredes, Carlos Manuel

C.C: 1708272479



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, Sr. Panimboza Deleg, Jonathan Isaías, con cédula de ciudadanía N° 172543556-2 declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Análisis de severidad de incendios forestales como contribución a la gestión de riesgos. Casos de estudio: Cantón Quilanga 2019, Volcán Casitagua 2020”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 20 de agosto de 2021

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Jonathan Panimboza', is positioned above the printed name.

Panimboza Deleg, Jonathan Isaías

C.C: 172543556-2



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, Sr. Panimboza Deleg, Jonathan Isaías, con cédula de ciudadanía N° 172543556-2, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Análisis de severidad de incendios forestales como contribución a la gestión de riesgos. Casos de estudio: Cantón Quilanga 2019, Volcán Casitagua 2020”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 20 de agosto de 2020

Panimboza Deleg, Jonathan Isaías

C.C: 172543556-2

Dedicatoria

*A aquellos que aportan cada día con su esfuerzo para construir una mejor sociedad,
porque no hay causas perdidas, sino abandonadas.*

*A mi núcleo familiar: Elizabeth , Juan y David, con quienes aprendí a vivir,
son los pilares y la inspiración de mi día a día.*

*A quienes participaron activamente en mi proceso educativo: profesores y compañeros,
el conocimiento que se transmite, se multiplica, inspira y mejora.*

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, que en sus 99 años de vida institucional, ha cumplido con el objetivo de formar profesionales de calidad y ha permitido mi formación profesional

Al Crnl. De C.S.M. Carlos M. Estrella P., Ingeniero Geógrafo, por ser el guía del presente proyecto, por su profesionalismo, por su amistad y su calidad humana.

Al Ing. Oswaldo Padilla Ph.D., por haber confiado en mí y por haber motivado la investigación en el ámbito de los sensores remotos.

Al Ing. Alfonso Tierra Ph.D., por haber sido el ejemplo profesional y personal de varias generaciones de ingenieros geógrafos.

Índice de contenidos

Dedicatoria.....	7
Agradecimientos.....	8
Índice de contenidos.....	9
Índice de tablas.....	13
Índice de figuras.....	14
Resumen.....	15
Abstract.....	16
Capítulo I Aspectos generales.....	17
Planteamiento del problema.....	17
Antecedentes.....	18
Justificación e importancia.....	20
Zona de estudio.....	21
Cantón Quilanga.....	21
Volcán Casitagua.....	22
Objetivos.....	22
Objetivo General.....	22
Objetivos Específicos.....	23
Metas.....	23
Hipótesis.....	23
Matriz de operacionalización de variables.....	24
Capítulo II Marco Teórico.....	26
Geografía.....	26
Clasificación Internacional Normalizada de la Educación.....	27

	10
Ciencias naturales, matemáticas y estadística.....	28
Tecnologías de la información y comunicación.....	29
Teledetección.....	30
Satélites artificiales.....	31
Órbitas satelitales.....	32
Segmento espacial/Lanzamiento.....	33
Segmento terrestre/Usuario.....	34
Radiación electromagnética.....	34
Imagen digital.....	36
Resolución de un sistema sensor.....	37
Índices.....	38
Índice de separabilidad.....	41
Clasificación digital.....	41
Misión Sentinel-2.....	43
Gestión de riesgos de desastres.....	45
Clasificación de las amenazas.....	46
Ciclo de la gestión de riesgos.....	50
Incendios, naturaleza y sociedad.....	51
Severidad.....	53
Ciencias de la computación.....	53
Computación en serie.....	54
Computación en paralelo.....	54
Computación en la nube.....	54
Proyecto Google Earth Engine.....	55

Marco Legal.....	55
Constitución de la República del Ecuador.....	55
Código orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación.....	57
Ley de Seguridad Pública y del Estado.....	58
Código Orgánico de Ordenamiento Territorial, Autonomía y Descentralización.....	58
Capítulo III Metodología.....	60
Enfoque.....	61
Alcance.....	61
Diseño de investigación.....	61
Obtención de imágenes satelitales.....	61
Enmascaramiento de nubes.....	62
Aplicación web.....	62
Software libre: QGIS.....	64
Estimación de la severidad.....	66
Clasificación.....	66
Separabilidad.....	67
Capítulo IV Análisis de Resultados.....	68
Aplicación web.....	68
Área de afectación.....	70
Análisis de Severidad.....	74
Balance de efectividad.....	76
Capítulo V Discusión.....	79
Enmascaramiento de nubes y mosaico.....	79
Índices espectrales.....	80

Severidad.....	80
Sistemas de procesamiento.....	81
Capítulo VI Conclusiones y Recomendaciones.....	82
Conclusiones.....	82
Recomendaciones.....	83
Referencias Bibliográficas.....	85
Anexos.....	90

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Matriz de operacionalización de variables</i>	24
Tabla 2 <i>Propuesta de declaración del espectro electromagnético para el Ecuador</i>	36
Tabla 3 <i>Resolución espacial y espectral de las bandas de la misión Sentinel-2</i>	44
Tabla 4 <i>Convención de denominación</i>	45
Tabla 5 <i>Clases de severidad</i>	53
Tabla 6 <i>Imágenes utilizadas para el estudio</i>	62
Tabla 7 <i>Resumen estadístico - Quilanga, 2019</i>	70
Tabla 8 <i>Resumen estadístico - Casitagua, 2020</i>	72
Tabla 9 <i>Clasificación de severidad - Quilanga</i>	74
Tabla 10 <i>Clasificación de severidad - Casitagua</i>	75
Tabla 11 <i>Matriz de balance de efectividad</i>	77

Índice de figuras

Figura 1	<i>Árbol de problemas</i>	18
Figura 2	<i>Ubicación del cantón Quilanga</i>	21
Figura 3	<i>Área de intervención y recuperación Casitagua</i>	22
Figura 4	<i>Proceso de la teledetección</i>	31
Figura 5	<i>Diagrama de una onda electromagnética</i>	34
Figura 6	<i>Regiones del espectro electromagnético</i>	35
Figura 7	<i>Elementos de la imagen digital</i>	37
Figura 8	<i>Algoritmo k-means</i>	43
Figura 9	<i>Clasificación de amenazas</i>	49
Figura 10	<i>Ciclo de la gestión de riesgos</i>	51
Figura 11	<i>Resumen metodológico</i>	60
Figura 12	<i>Algoritmo para enmascaramiento de nubes-GEE</i>	63
Figura 13	<i>Algoritmo para enmascaramiento de nubes - Aplicación</i>	64
Figura 14	<i>Algoritmo para enmascaramiento de nubes - QGIS</i>	65
Figura 15	<i>Enmascaramiento de nubes - QGIS</i>	66
Figura 16	<i>Interfaz gráfica de la aplicación</i>	68
Figura 17	<i>Diagrama de funcionamiento de la aplicación</i>	69
Figura 18	<i>Área e IS - Quilanga (Aplicación)</i>	71
Figura 19	<i>Área e IS - Quilanga (QGIS)</i>	71
Figura 20	<i>Área e IS - Casitagua (Aplicación)</i>	73
Figura 21	<i>Área e IS - Casitagua (Aplicación)</i>	73
Figura 22	<i>Mapa de severidad - Quilanga</i>	75
Figura 23	<i>Mapa de severidad - Casitagua</i>	76

Resumen

En la presente investigación, se aborda la problemática de los incendios forestales en el Ecuador desde la perspectiva de la gestión de riesgos de desastres y haciendo uso de las tecnologías geoespaciales como son la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica. Se tomaron en cuenta dos áreas de estudio: el cantón Quilanga, donde, en septiembre de 2019, ocurrió el incendio más grande registrado en los últimos 3 años y el volcán Casitagua, donde ocurrió un incendio en enero de 2020 que se utilizó para validar la metodología empleada. El objetivo general de esta investigación es el de analizar la severidad de los incendios forestales en las zonas de estudio mencionadas, utilizando software libre y una aplicación web de computación en la nube desarrollada en Google Earth Engine. Para lograr este propósito se analizaron 9 imágenes Sentinel-2: 7 para el caso de estudio del cantón Quilanga y 2 para el caso de estudio del volcán Casitagua, calculando los índices BAIS2 , IAQ, NBR, NDVI y NDWI para estimar la severidad de los incendios forestales, obteniendo un área afectada de 6243,334 hectáreas para el caso del cantón Quilanga, de las cuales el 49% corresponden a una severidad alta, mientras que para el caso del volcán Casitagua, el área de afectación fue de 302,113 hectáreas con un 74% de severidad alta. El software libre QGIS y la aplicación desarrollada para la estimación de severidad fueron comparadas con el propósito de determinar sus ventajas y desventajas en lo que respecta a la efectividad, obteniendo que, si bien la aplicación tiene un límite de peso para los archivos descargables de 20Mb y requiere conexión a internet permanente, es más efectiva que el software GIS convencional, tomando en cuenta los parámetros: tiempo de adquisición y procesamiento, requerimientos de hardware, software y conectividad y obtención de resultados.

Palabras clave:

- **INCENDIOS FORESTALES**
- **GESTIÓN DE RIESGOS**
- **COMPUTACIÓN EN LA NUBE**

Abstract

This study analyze the problematic of wildfires in Ecuador taking the risk management approach and using geospatial technologies such as remote sensing and Geographic Information Systems. The study analyze two areas of interest: Quilanga Canton in the province of Loja - Ecuador where there was the greatest wildfire in three years on September, 2019 and the Casitagua Volcano in Quito - Pichincha - Ecuador where there was a wildfire on January, 2020 which was used to validate the methodology. This study aims to analyze both areas of interest using free software and a cloud based application developed on Google Earth Engine. The analysis of five spectral indices: BAIS2, IAQ, NBR, NDVI and NDWI derived from 9 Sentinel-2 images (7 for Quilanga's area of interest and 2 for Casitagua's area of interest) showed an affectation area of 6243,334 hectares with 49% of high severity for the Quilanga's wildfire and an affectation area of 302,113 hectares with 74% of high severity for the Casitagua's wildfire. The comparison of free software QGIS and the cloud based application for severity estimation showed that the last one is more effective than QGIS taking into account the following parameters: acquisition time, processing time, hardware, software and conectivity requirements and results. Nevertheless the app developed has a limit of 20Mb for downloading results and needs a permanent internet conection.

Keywords:

- **WILDFIRES**
- **RISK MANAGEMENT**
- **CLOUD COMPUTING**

Capítulo I

Aspectos generales

En este capítulo se presenta una descripción de los incendios forestales como una problemática a nivel mundial que también afecta al Ecuador y cuya afectación ha ido en aumento año tras año. Las tecnologías geoespaciales resultan útiles para analizar la afectación causada por incendios forestales a través del uso de índices obtenidos a partir de imágenes satelitales de la misión Sentinel-2. En este estudio se plantea el análisis de dos incendios forestales sucedidos en el país para cuantificar el nivel de cambio ecológico causado y el área de afectación.

Planteamiento del problema

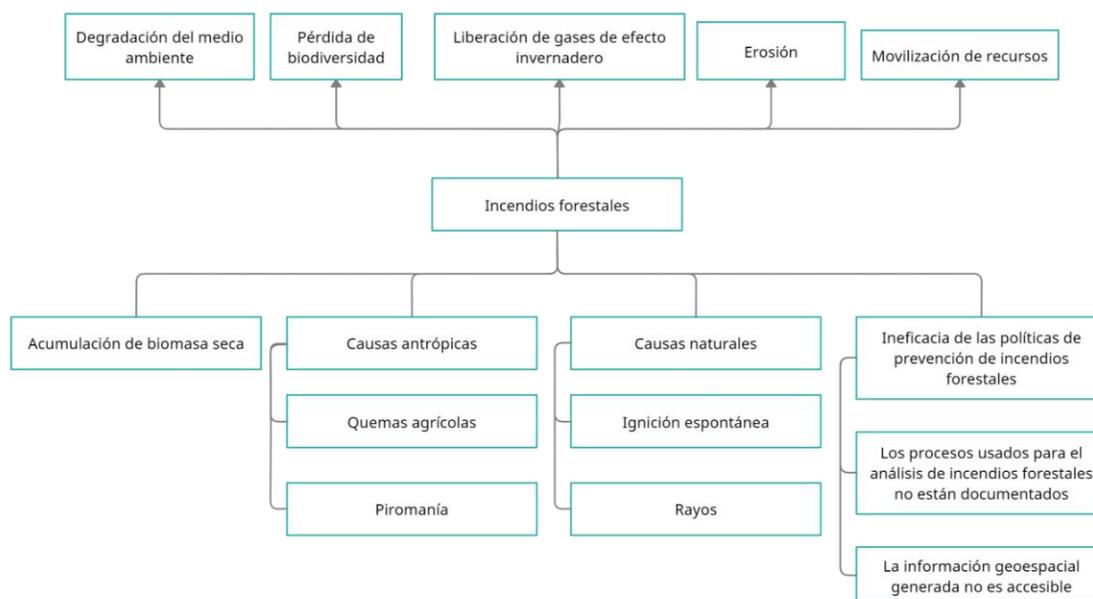
En el año 2019 se habían evidenciado cifras récord respecto a emisiones y severidad de incendios forestales, cada año los incendios afectan entre el 3 y el 4% de la superficie terrestre (Hernández, Barreira, Grillo, Asunción, Colomina, Domínguez y Peiteado, 2020). Para el año 2020 se reportó un incremento del 13% en el número de alertas de incendios a nivel mundial respecto a las cifras del 2019 y se estimó que el 75% de los estos eventos tienen origen antrópico (World Wildlife Found, 2020).

En el ámbito nacional los incendios forestales son eventos recurrentes, de acuerdo al informe No.: 031 del Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (2021), en 2020 existieron 2336 eventos que consumieron 27 904.91 hectáreas de cobertura vegetal, siendo Loja, Pichincha, Azuay y Chimborazo las provincias más afectadas. De estos 2336 eventos, el 85.5% (1997 aprox.) afectaron 10 hectáreas o más mientras que el 2.57% (60) afectaron 100 hectáreas o más, estos 60 eventos afectaron en total 13.638,21 hectáreas. En particular, el incendio forestal en el cantón Quilanga, provincia de Loja, suscitado el 5 de septiembre de 2019, consumió 4411 hectáreas de vegetación (SNGRE, 2019) mientras que el incendio suscitado el 14 de enero de 2020 en el volcán Casitagua en el Distrito Metropolitano de Quito consumió 290 hectáreas de vegetación (SNGRE, 2021).

De acuerdo al análisis de la problemática realizado para el estudio (ver figura 1) los incendios forestales son causados por la acumulación de biomasa seca la cual actúa como material combustible, la ignición puede tener causas naturales o antrópicas pero, tal y como se ha mencionado previamente, una gran parte de los eventos son provocados por el ser humano. Esta problemática se ve agravada por la ineficacia de las políticas de prevención debido que los procesos y la información geoespacial generada no son accesibles. Estos eventos provocan degradación del medio ambiente, pérdida de la biodiversidad, liberación de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera, erosión del suelo y la movilización de recursos por parte de las autoridades competentes como Gobiernos Autónomos Descentralizados, departamentos de bomberos, entre otros para controlarlo y extinguirlo.

Figura 1

Árbol de problemas



Nota. Relaciones de causa-efecto asociadas a los incendios forestales.

Antecedentes

Los datos proporcionados por satélites de observación de la tierra han sido ampliamente usados para observar los cambios en la superficie del planeta, una de sus aplicaciones es la de estimar la

severidad y el área de afectación de un incendio forestal a través del uso de índices de vegetación, ya sea para las épocas pre-evento y pos-evento o únicamente para la época pos-evento (Chuvieco, 2002; Key y Benson, 2006 y Tran, Tanase, Benett y Aponte, 2018). La severidad de un incendio forestal se define como la magnitud del cambio ecológico causado por el fuego y se relaciona con bajas tasas de recuperación de la vegetación y altas tasas de erosión del suelo (Montorio et al., 2014). Diferentes estudios han evaluado varios índices de vegetación para la estimación de la severidad de un incendio forestal (Martín y Chuvieco, 1998; Chuvieco, 2002; Tran et al, 2018 y Fonacca, Ren y Xiao, 2018) entre ellos se destacan: NBR, NDVI, NDWI, IAQ, BAIS2, GEMI y SAVI.

En 1998, Martín y Chuvieco desarrollaron el Índice de Área Quemada (IAQ o BAI por sus siglas en inglés), el cual utiliza la distancia euclidiana entre los valores del rojo e infrarrojo cercano y los valores de convergencia 0.1 y 0.06 respectivamente. En 1991 López y Caselles desarrollaron el *Normalized Burn Ratio* (NBR) de manera similar al Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en Inglés) usando las bandas correspondientes al infrarrojo cercano y al infrarrojo de onda corta debido a su sensibilidad alta y opuesta a las superficies quemadas. Recientemente Filipponi (2018) desarrolló el *Burned Area Index for Sentinel-2* (BAIS2) el cual aprovecha la resolución espectral del sensor MSI de los satélites Sentinel 2a y 2b.

En estudios de severidad de los incendios forestales se han llegado a conclusiones diversas respecto a la idoneidad en el uso de los diferentes índices de vegetación. Fonacca et al. (2018) compararon once índices con diferencias de tiempo de uno y dos o más años concluyendo que el índice MIRBI y el índice de verdor *Tasseled-Cap Greenness* tuvieron mejores resultados después de un año del evento, para períodos de 2 años o más el índice de humedad *Tasseled-Cap Wetness* obtuvo mejores resultados para determinar la severidad residual a largo plazo mientras los índices NBR y NDMI obtuvieron mejores resultados en el monitoreo de la recuperación de la vegetación. Tran et al. (2018) evaluaron diez índices en diferentes tipos de vegetación concluyendo que no existe un índice ideal para

todos los tipos de vegetación sin embargo los índices NBR y NDWI mostraron mejores resultados mientras que los índices MIRBI y BAI (IAQ) mostraron peores resultados en todos los tipos de vegetación analizados. En el ámbito nacional Columba, Alezandra, Quisilema, Padilla y Toulkeridis (2016) evaluaron los índices NDVI, NBR e IAQ y sus respectivas diferencias multitemporales en el Distrito Metropolitano de Quito concluyendo que el índice IAQ y su diferencia mostraron mejores resultados para discriminar áreas afectadas por incendios forestales usando una clasificación no supervisada.

Justificación e importancia

Los incendios forestales son una problemática que afecta a todo el mundo debido a que existe un proceso de retroalimentación entre estos y el cambio climático (Hernández et al., 2020), el aumento en el número y la extensión de los incendios forestales implica un aumento en la cantidad de gases de efecto invernadero liberados hacia la atmósfera, esto a su vez contribuye a elevar la temperatura promedio anual del planeta. Como ya se describió previamente, en el Ecuador esta tendencia se mantiene, aumentando año con año la cantidad y la extensión afectada por incendios forestales.

Dada la desactualización y escasez de la información geoespacial proporcionada por el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias y el Ministerio del Ambiente y Agua, es necesario cuantificar el cambio ecológico y la extensión del mismo en las áreas afectadas por los incendios forestales en el cantón Quilanga (2019) y en el volcán Casitagua (2020) a través del análisis de imágenes satelitales de las cuales podemos derivar la severidad de los eventos y su extensión. En particular, el uso de las imágenes adquiridas por el sensor MSI de los satélites Sentinel-2 (a y b) supone diversas ventajas como su adquisición sin costo, resolución espacial entre 10 y 60 metros y una resolución temporal de entre 2 y 5 días.

De este estudio se desprende la implementación de un servicio de análisis de imágenes satelitales a través de una aplicación web de código abierto en la plataforma de computación en la nube Google Earth Engine que pueda ser usada por el público en general en la cual los usuarios puedan

desarrollar la estimación de severidad de incendios en una región de su interés y descargar los datos generados para investigaciones posteriores. De esta forma se combinan las ventajas del uso de sensores remotos en conjunto con las nuevas tecnologías para el análisis de información geoespacial con el fin de mejorar la adquisición de información y respaldarla con procesos documentados.

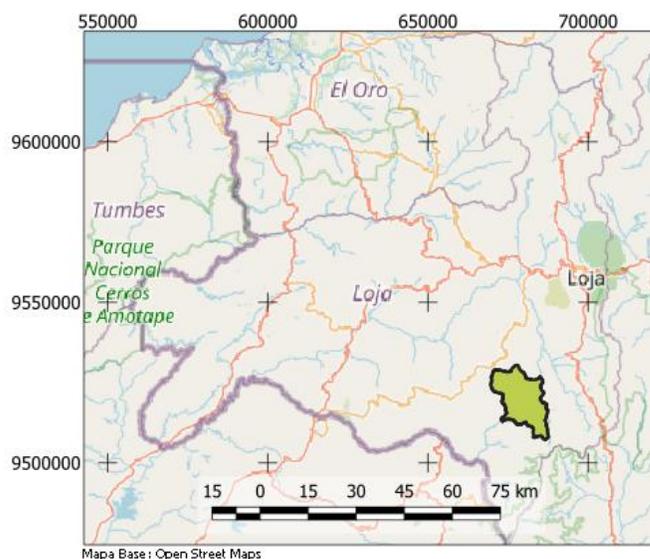
Zona de estudio

Cantón Quilanga

El cantón Quilanga se encuentra en la provincia de Loja al sur del Ecuador (Figura 2), se compone por 3 parroquias: Quilanga, San Antonio de las Aradas y Fundochamba. En este cantón habitan 4232 habitantes y tiene una extensión territorial de 236.68 km². Tiene un clima templado y subtropical con un promedio de 19.8°C. Posee diversos ecosistemas, los cuales son (GAD Quilanga, 2014): Bosque siempre verde montano, bosque semideciduo montano bajo, bosque semideciduo piemontano, arbustal semideciduo, bosque siempreverde montano alto, herbazal de páramo. De acuerdo a los informes oficiales (SNGRE, 2019), el incendio de 2019 fue el más grande registrado ese año.

Figura 2

Ubicación del cantón Quilanga



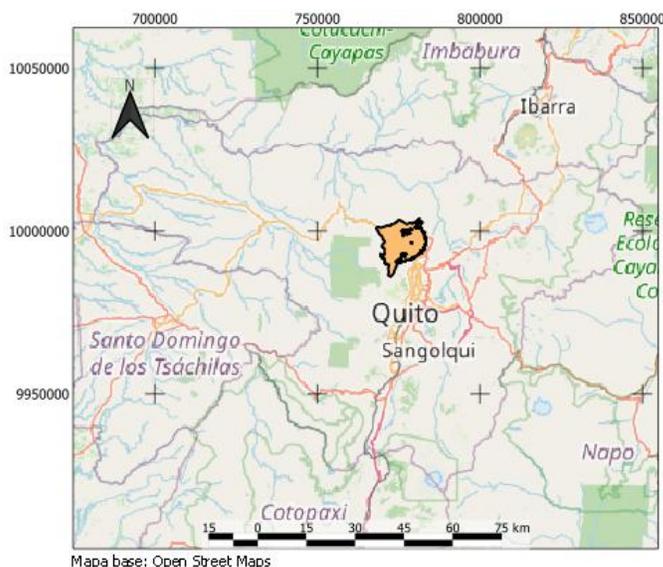
Nota. Elaborado por a partir de datos obtenidos del Sistema Nacional de Información

Volcán Casitagua

Es un volcán extinto que tiene una altitud de 3515m.s.n.m. forma parte de la Cordillera Occidental de los Andes y es una área de intervención y recuperación del Distrito Metropolitano de Quito (Alcaldía Metropolitana de Quito, 2015), provincia de Pichincha (Figura 3). Posee laderas erosionadas y una caldera central abierta (Winckell et al, 1997). Los ecosistemas del lugar corresponden a los bosques siempreverdes montano bajo, montano y montano alto de la Cordillera Occidental de los Andes (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013). El incendio de enero de 2020 se tomó como validación de la metodología empleada para el análisis del incendio del cantón Quilanga.

Figura 3

Área de intervención y recuperación Casitagua



Nota. Elaborado a partir datos de la Secretaría General de Planificación del DMQ

Objetivos

Objetivo General

Analizar la severidad de los incendios forestales del cantón Quilanga, 2019 y en el volcán Casitagua 2020 utilizando software libre y una aplicación web alojada en la nube como apoyo para la gestión de riesgos asociados a incendios forestales.

Objetivos Específicos

- OE1: Determinar la severidad de los incendios forestales del cantón Quilanga, 2019 y en el volcán Casitagua 2020 usando índices de vegetación para cuantificar el cambio ecológico causado por dichos eventos.
- OE2: Calcular el área de afectación de los incendios forestales del cantón Quilanga, 2019 y en el volcán Casitagua 2020 a través de una clasificación no supervisada para evidenciar su extensión.
- OE3: Comparar la efectividad en el proceso de determinación de severidad de incendios forestales entre una aplicación web de código abierto y un software libre de GIS y procesamiento digital de imágenes para identificar ventajas y desventajas.

Metas

- 4 escenas satelitales con los índices de vegetación calculados correspondientes a las épocas pre-evento (2) y pos-evento (2). (cumplido)
- Matriz de balance de efectividad. (cumplido)
- Código fuente de la aplicación. (cumplido)
- 2 informes técnicos de los resultados obtenidos para los casos de estudio. (cumplido)

Hipótesis

H1: Existe degradación en el estado de la vegetación a causa de los incendios forestales del cantón Quilanga en 2019 y del volcán Casitagua en 2020.

H2: Combinar las ventajas del sensoramiento remoto con las nuevas tecnologías de análisis de información geoespacial como la computación en la nube es efectivo para el análisis de severidad de incendios forestales

Matriz de operacionalización de variables

Tabla 1

Matriz de operacionalización de variables

Objetivo específico	Hipótesis	Dimensión	Variable	Instrumento
Analizar la severidad de los incendios forestales del cantón Quilanga, 2019 y en el volcán Casitagua 2020 para cuantificar el cambio ecológico causado por dichos eventos.	H1: Existe degradación en el estado de la vegetación a causa de los incendios forestales del cantón Quilanga en 2019 y del volcán Casitagua en 2020	Severidad Nivel de discriminación entre áreas quemadas y no quemadas	Severidad Índice de separabilidad	Informes técnicos de los incendios forestales: Cantón Quilanga Volcán Casitagua
Calcular el área de afectación de los incendios forestales del cantón Quilanga, 2019 y en el volcán Casitagua 2020 a través de una clasificación no supervisada para evidenciar su extensión.	H1: Existe degradación en el estado de la vegetación a causa de los incendios forestales del cantón Quilanga en 2019 y del volcán Casitagua en 2020	Área	Área de afectación	Informes técnicos de los incendios forestales: Cantón Quilanga Volcán Casitagua
Comparar la efectividad en el proceso de determinación de severidad de incendios forestales entre una aplicación web de código abierto y un software libre de GIS y procesamiento digital de imágenes para evaluar su efectividad.	H2: Combinar las ventajas del sensoramiento remoto con las nuevas tecnologías de análisis de información geoespacial es efectivo para el análisis de severidad de incendios forestales	Tiempo de adquisición de imágenes. Tiempo de procesamiento Software requerido Hardware requerido Requisitos de conectividad	Efectividad	Matriz de balance de efectividad

Una vez se ha descrito la problemática que motiva la investigación y sus antecedentes y se han propuesto los objetivos y metas de la investigación, se vuelve necesario describir el sustento teórico de la metodología planteada, de los enfoques desde los cuales se aborda el problema planteado y las técnicas utilizadas para la consecución de los objetivos.

Capítulo II

Marco Teórico

En este capítulo se describen los principios teóricos en los que se basa el presente proyecto. El problema de los incendios forestales se abordada desde la perspectiva de la gestión de riesgos de desastres, el estudio se alinea con la fase de evaluación del riesgo puesto que genera información de los incendios en el cantón Quilanga en 2019 y el volcán Casitagua en 2020. La información se generó a partir del análisis de los índices espectrales obtenidos de imágenes satelitales de la misión Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea.

Geografía

De acuerdo a Jhonston (2020), la geografía es la ciencia que estudia los diferentes elementos sobre la superficie de la Tierra y sus interacciones. El conocimiento dentro del campo de la geografía comenzó con el mismo ser humano y fue parte del desarrollo de las primeras sociedades desde las civilizaciones Mesopotámicas hasta el Imperio Romano (Cuadra, 2014).

La primera obra denominada Geografía se le atribuye a Eratóstenes quien es considerado el padre de la geografía por calcular la circunferencia terrestre con gran precisión y por haber establecido un sistema de cuadrículas que es el origen de los sistemas de coordenadas actuales (Siso, 2010).

No es sino hasta el siglo XVIII que los aportes de Humboldt, Ritter, Richthofen y Reatzel consolidan a la geografía como una ciencia (Cuadra, 2014). A partir de ello se desarrollaron diferentes corrientes dentro de la geografía que evolucionan y cambian de acuerdo a los nuevos aportes científicos y nuevas perspectivas adoptadas. En este sentido, Cuadra (2014), explica que los diferentes enfoques de la geografía se nutren de diversos contextos filosóficos como: positivismo, neopositivismo, posibilismo, determinismo, naturalismo, entre otros. Estos enfoques son:

- Geografía general - sistemática
- Geografía regional

- Cuantitativo
- Sistemático
- Geografía ambiental
- Geografía automatizada
- Geografía de la percepción y el comportamiento
- Geografía radical
- Geografía humanista
- Geografía cultural
- Geografía cultural posmoderna

De acuerdo a los aspectos generales descritos previamente, el presente estudio toma los enfoques cuantitativo, geografía automatizada y geografía ambiental. También se toma en cuenta la Clasificación Internacional Normalizada de la Educación para establecer los lineamientos teóricos fundamentales para el presente estudio.

Clasificación Internacional Normalizada de la Educación

La CINE representa una clasificación referencial desarrollada por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura, UNESCO, para ordenar los programas educativos y sus planificaciones (Instituto de Estadística de la UNESCO, 2013). La CINE toma en cuenta 11 campos amplios, 29 campos específicos y alrededor de 80 campos detallados de conocimiento (Instituto de Estadística de la UNESCO, 2014). Esta clasificación tiene el fin de obtener datos que puedan ser comparados a nivel internacional y a su vez, establecer un marco de aplicabilidad en los diferentes sistemas educativos (Instituto de Estadística de la UNESCO, 2014). Los campos amplios del conocimiento son:

- Programas y certificaciones genéricos
- Educación
- Artes y humanidades
- Ciencias sociales periodismo e información
- Administración de empresas y derecho
- Ciencias naturales, matemática y estadística
- Tecnologías de la información y comunicación
- Ingeniería, industria y construcción
- Agricultura, silvicultura, pesca y veterinaria
- Salud y bienestar
- Servicios

De acuerdo a la clasificación presentada por la CINE, el estudio se desarrolla en los campos amplios de las ciencias naturales, matemática y estadística, en lo referente al análisis de eventos en el espacio geográfico y tecnologías de la información y comunicación, en lo referente al procesamiento de datos.

Ciencias naturales, matemáticas y estadística

Este campo amplio del conocimiento se compone de 4 diferentes campos específicos que son: ciencias biológicas y afines, medio ambiente, ciencias físicas, matemáticas y estadística (Instituto de Estadística de la UNESCO, 2014).

Ciencias biológicas. Este campo específico abarca la biología, que es el estudio de la estructura, función, reproducción, crecimiento, evolución y comportamiento de los seres vivos y la bioquímica, que estudia la química de los organismos vivos (Instituto de Estadística de la UNESCO, 2015).

Medio ambiente. Este campo específico abarca los campos detallados de ciencias ambientales que estudia a los individuos en función del medio ambiente, y entornos naturales y vida silvestre que se

refiere a las interacciones entre organismos vivos en un medio natural con el fin de proteger la naturaleza y la vida silvestre (Instituto de Estadística de la UNESCO, 2015).

Ciencias físicas. Sus campos detallados de conocimiento son las ciencias químicas, las cuales se encargan del estudio de las sustancias y sus elementos así como de las reacciones producidas cuando se combinan, ciencias de la tierra, las cuales estudian la composición y estructura de la Tierra incluyendo la atmósfera y la hidrósfera y la física, que estudia las propiedades e interacciones de la materia y la energía (Instituto de Estadística de la UNESCO, 2015).

Matemáticas y estadística. Se compone de los campos detallados de la matemática que estudia los sistemas deductivos abstractos y de la estadística que estudia la recolección, descripción, organización y análisis de datos numéricos, incluyendo la teoría probabilística (Instituto de Estadística de la UNESCO, 2015).

Tecnologías de la información y comunicación

Tecnologías de la información y comunicación. Abarca tres campos específicos del conocimiento, el uso de computadoras se refiere al uso de computadoras y software y aplicaciones para diferentes propósitos, la administración y diseño de bases de datos y redes, se refiere al diseño, mantenimiento e integración de aplicaciones de software y el desarrollo y análisis de software y aplicaciones es el estudio del diseño y el desarrollo de sistemas y entornos de comunicación (Instituto de Estadística de la UNESCO, 2015).

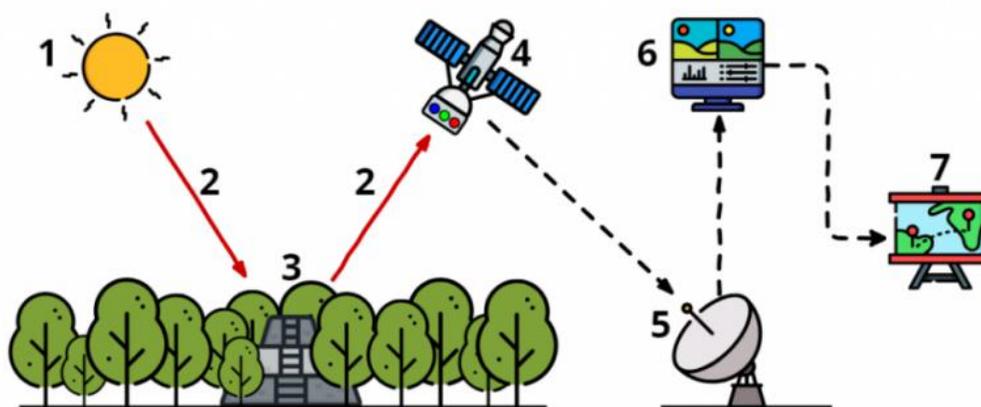
De acuerdo a la CINE, el presente proyecto se relaciona con el campo amplio de las ciencias naturales matemáticas y estadística, el campo específico de las ciencias físicas y los campos detallados de la física y las ciencias de la Tierra. Así también se relaciona con el campo amplio de las tecnologías de la información y comunicación, el campo específico del mismo nombre y dentro de este, el campo detallado de análisis de software y aplicaciones.

Teledetección

La teledetección tiene por objetivo obtener información a través de la interpretación de los niveles digitales de una imagen, puede ser la clasificación de los niveles digitales en diferentes categorías o el establecimiento de una relación cuantitativa entre los valores digitales y una medida física (Chuvieco, 1995). Según Moore (1979), la teledetección es el uso de la energía reflejada o emitida para medir las propiedades físicas de una superficie. La teledetección puede ser entendida como una fuente de información ya que los niveles digitales de cada celda almacenan la energía electromagnética recibida por el sensor, es una herramienta para resolver problemas ambientales y es una ciencia pues comprende etapas de adquisición de datos, procesamiento interpretación y obtención de conclusiones (Moore, 1979). Para Chuvieco (1995) los elementos de la teledetección son:

- Fuente de energía
- Cubierta terrestre
- Sistema sensor
- Sistema de recepción-comercialización
- Intérprete
- Usuario final

El proceso de la teledetección (ver figura 4) comienza con una fuente de energía emitiendo un haz que se propaga e interactúa con la atmósfera, esta energía llega a una superficie la cual refleja parte de la energía del haz, esta energía es captada por un sensor montado en una plataforma satelital que lo transforma en bits y los envía a una estación de recepción y comercialización para ser procesada y el usuario final transforma estos datos en información que puede ser usada para estudiar los diferentes procesos que ocurren en la superficie del planeta (Chuvieco, 1995 y Xiong y Butler, 2018).

Figura 4*Proceso de la teledetección*

Nota. 1) Se emite un haz de luz, 2) el haz se propaga e interactúa con la atmósfera, 3) la superficie refleja parte de la energía, 4) el sensor captura los datos, 5) una estación recibe los datos transmitidos por el satélite, 6) los datos se analizan e interpretan, 7) los datos se transforman en información geoespacial. Adaptado de Patiti Research (s. f.).

Satélites artificiales

Un satélite artificial es un objeto fabricado por el ser humano que es lanzado al espacio y orbita en torno a un objeto (NASA, 2014). De acuerdo a su propósito, los satélites artificiales se clasifican en satélites de observación de la Tierra, satélites de navegación, satélites climáticos, satélites astronómicos, estaciones espaciales y satélites de comunicación (Eurisy, s.f. y Science Learning Hub, 2020).

Satélites de observación de la Tierra. Tienen por objetivo recopilar información acerca de los sistemas químicos, físicos y biológicos de la Tierra, son usados para monitorear y evaluar el estado y los cambios en los sistemas naturales y el paisaje humano (Eurisy, s.f.).

Satélites de navegación. Su objetivo es proveer la localización de un dispositivo receptor respecto a un sistema de referencia.

Satélites climáticos. Su propósito es obtener imágenes de las nubes y medir temperatura y precipitación con el objetivo de ayudar a la predicción climática (Science Learning Hub, 2020).

Satélites astronómicos. Se utilizan para observar y monitorear el espacio como el telescopio espacial Hubble (Science Learning Hub, 2020).

Estaciones espaciales. Son laboratorios espaciales habitables, la Estación Espacial Internacional está a una altura de 400 km y orbita alrededor de la Tierra a 28 000 km/h dando una vuelta completa cada 92 minutos (Science Learning Hub, 2020)..

Satélites de comunicación. Tienen el propósito de distribuir señales electromagnéticas, proveen servicios de telecomunicaciones como internet o televisión y transmisión de datos (Eurisy, s.f.).

Estos diferentes tipos de satélites artificiales transitan en una trayectoria denominada órbita.

Órbitas satelitales

Los satélites o naves espaciales se colocan en diferentes órbitas, según la Agencia Espacial Europea (2020), un satélite puede ser ubicado en una posición u órbita determinada dependiendo de su propósito particular.

Órbita geoestacionaria (GEO). Está situada a 35 786 km de altura en el plano ecuatorial, los satélites localizados en esta órbita poseen la misma velocidad de rotación de la Tierra por lo que, aparentemente, permanecen en una posición determinada. Esta órbita es usada por satélites de comunicaciones o de monitoreo climático (ESA, 2020).

Órbita terrestre baja (LEO). Se sitúa entre 160 km y 1000km de altura y puede posicionarse en cualquier plano orbital, haciendo que existan más rutas para los satélites. Debido a su altitud, esta órbita es usada por los satélites de observación de la tierra, ya que permite capturar imágenes de mejor resolución (ESA, 2020).

Órbita terrestre media (MEO). Se refiere a cualquier órbita entre la órbita GEO y MEO, al igual que la órbita LEO, no hay limitaciones para la trayectoria de los satélites. Esta órbita es usada por los satélites de navegación como la constelación Galileo (ESA, 2020).

Órbita polar y heliosincrónica. La órbita polar es un tipo de órbita LEO cuyo plano orbital está desviado menos de 30° respecto al eje de rotación de la Tierra. La órbita heliosincrónica es un tipo de órbita polar en la que su posición relativa respecto al Sol es siempre la misma, haciendo que un satélite observe a un mismo punto a una determinada hora del día. Generalmente, estas órbitas son usadas por satélites de observación de la tierra (ESA, 2020).

Órbita de transferencia y órbita de transferencia geoestacionaria. Son órbitas usadas para alcanzar otra órbita, se usan con el propósito de alcanzar órbitas superiores con un gasto de energía menor al de alcanzar la órbita objetivo directamente. La órbita de transferencia geoestacionaria se refiere a la trayectoria elíptica que toma una nave espacial o un satélite para alcanzar la órbita geoestacionaria (ESA, 2020).

Puntos de Lagrange. Son regiones puntuales en el espacio más allá de la órbita GEO en las que los campos gravitatorios de la Tierra y el Sol se combinan de tal forma que una nave espacial puede orbitarlas de forma estable. Estos puntos son usados por telescopios espaciales (ESA, 2020).

Para el despliegue en órbita y el funcionamiento de los satélites, se articulan una serie de elementos y procedimientos se pueden resumir en dos segmentos: espacial y terrestre (Laur y Liebig, 2014 y Elbert, 2008).

Segmento espacial/Lanzamiento

En este segmento se considera el satélite en sí mismo el cual está compuesto por la plataforma satelital o *bus* y la carga útil. La plataforma es la estructura que provee las condiciones necesarias para el funcionamiento de la carga útil, incluyendo las funciones de control de altitud y posición, así como también el sistema de propulsión (Laur y Liebig, 2014).

Para el caso de constelaciones de satélites, el segmento espacial también incluye satélites de retransmisión de datos que, generalmente, se ubican en la órbita geostacionaria. Estos satélites de retransmisión son útiles cuando el satélite está fuera del campo visible de las estaciones de control en tierra (Laur y Liebig, 2014).

Segmento terrestre/Usuario

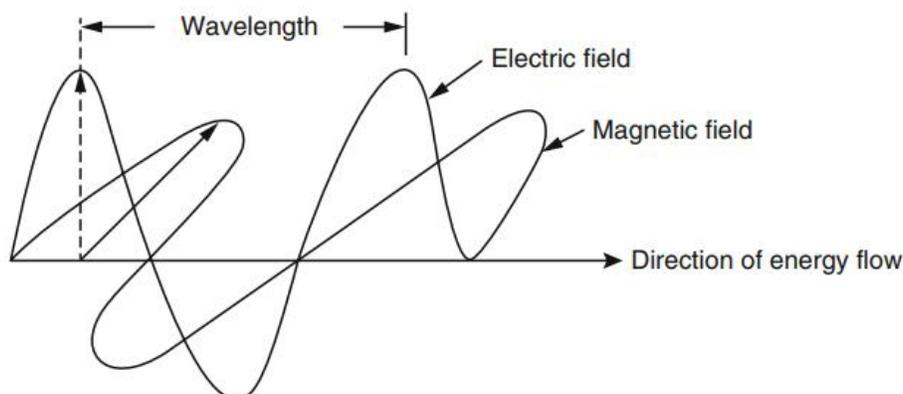
Este segmento provee los medios y recursos para gestionar y controlar el satélite, recibir y procesar los datos provenientes de la carga útil y para almacenar y publicar los productos generados (Laur y Liebig, 2014).

Radiación electromagnética

La radiación electromagnética es la emisión o transferencia de energía a través de ondas electromagnéticas y fotones (Zwinkels, 2015), este tipo de energía es emitida por todos los cuerpos en la naturaleza. Estas ondas electromagnéticas son una oscilación interdependiente de campos eléctricos y magnéticos que viajan por el espacio (ver figura 5), poseen tres propiedades interrelacionadas: frecuencia, velocidad y longitud de onda. (Zwinkels, 2015). La representación gráfica de estas ondas electromagnéticas se conoce como el espectro electromagnético (Zwinkels, 2015).

Figura 5

Diagrama de una onda electromagnética



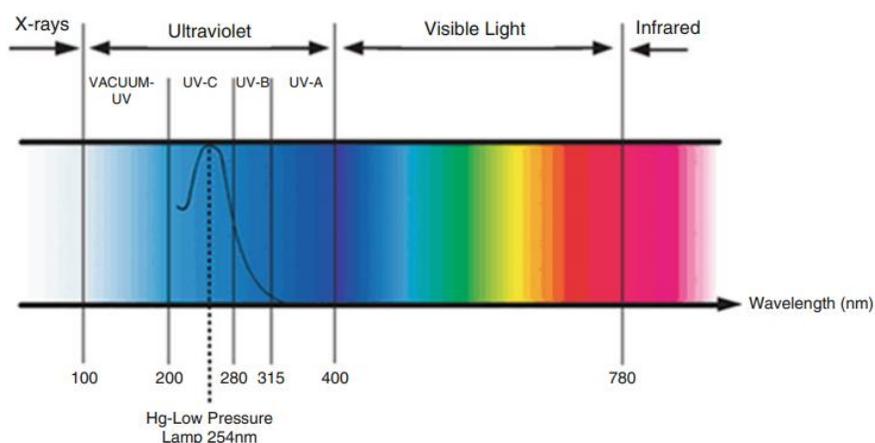
Nota. (Zwinkels, 2015)

Espectro electromagnético. Es una división arbitraria de las ondas electromagnéticas en función de la longitud de onda y la frecuencia es así que el espectro electromagnético es una representación gráfica de las ondas electromagnéticas de acuerdo a su longitud de onda o su frecuencia.

Tradicionalmente, este espectro se divide en cuatro grupos: rayos x, ultravioleta, visible e infrarrojo (ver figura 6).

Figura 6

Regiones del espectro electromagnético



Nota. (Zwinkels, 2015)

Dado que las divisiones del espectro electromagnético son arbitrarias, numerosos autores e instituciones tienen diferentes clasificaciones, dependiendo de sus propósitos. En el ámbito nacional Herrera, Porras y Estrella (2018) analizaron las diferentes clasificaciones y propusieron una clasificación del espectro electromagnético basada en la norma ISO 20473, norma ISO 21348 y el Plan Nacional de telecomunicaciones (ver Tabla 2).

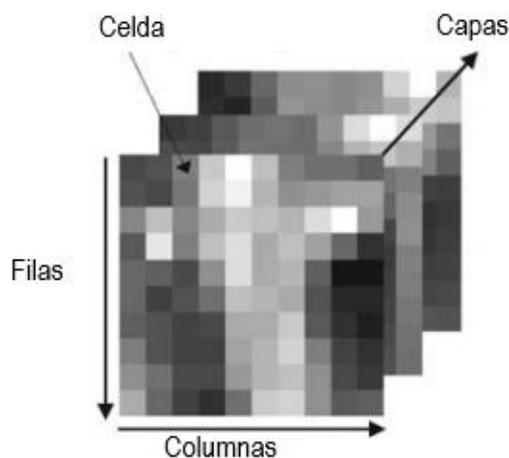
Tabla 2*Propuesta de declaración del espectro electromagnético para el Ecuador*

Grupo	Designación		Rango de longitud de onda (nm)
	Extreme UV		10-100
Radiación ultravioleta	Vacuum UV	UV-A	100-190
	Deep UV		190-280
	Mid UV	UV-B	280-315
	Near UV	UV-C	315-380
Espectro visible	Púrpura		360-450
	Azul		450-500
	Verde		500-570
	Amarillo		570-591
	Naranja		591-610
	Rojo		610-780
Infrarrojo	Infrarrojo cercano (NIR)	IR-A	780-1400
		IR-B	1400-3000
	Infrarrojo medio (SWIR)		3000-50000
	Infrarrojo lejano (TIR)	IR-C	50000-1000000

Nota. Adaptado de Herrera, Porras y Estrella, 2018

Imagen digital

Una imagen digital (ver Figura 7) es un arreglo discreto y bidimensional números dispuestos en filas y columnas cuyo elemento fundamental es la celda y su valor se le conoce como nivel digital (ND) (Liu y Mason, 2013). Este arreglo bidimensional se transforma en un arreglo multidimensional a medida que se le añaden capas de información, estas capas se conocen como bandas. Se entiende como banda espectral al conjunto de información que se encuentra dentro de un rango de la energía electromagnética en función de la longitud de onda y la frecuencia (Liu y Mason, 2013).

Figura 7*Elementos de la imagen digital*

Nota. Traducido de: Liu y Mason, 2013

Resolución de un sistema sensor

Se refiere a las capacidades del sistema sensor para registrar y discriminar la energía electromagnética capturada de acuerdo a diversas variables. Las resoluciones son las características básicas que definen a un sensor, Chuvieco (1995) describe las siguientes resoluciones:

Resolución espacial. Se refiere al tamaño del objeto más pequeño distinguible por el sensor o el tamaño de la celda de la imagen proyectada a la superficie, indica el nivel de detalle de la imagen digital obtenida por el sensor.

Resolución espectral. Se refiere al número de bandas y al rango espectral de las mismas. Su importancia radica en aumentar la cantidad de información percibida por el sensor.

Resolución radiométrica. Se refiere a la sensibilidad del sensor a la energía capturada, de forma práctica, la resolución radiométrica indica el número máximo de tonos que el sensor es capaz de captar.

Resolución temporal. Se refiere al período de revisita o retorno de la plataforma satelital, dado un punto A, la resolución temporal es el tiempo transcurrido entre una captura de datos y la siguiente.

Índices

En un sentido más amplio un índice espectral tiene por objetivo mejorar la sensibilidad de un sensor a las características de cualquier superficie, logrando así diferenciar de mejor manera la observación de esta. De forma particular los índices de vegetación son expresiones matemáticas que relacionan la respuesta de la vegetación en las diferentes bandas espectrales con el objetivo de mejorar la sensibilidad del sensor a las diferentes características de la vegetación o minimizar fuentes de errores como los efectos atmosféricos (Jackson y Huete, 1991 y Fang y Liang, 2014). Los índices considerados para el presente estudio son:

Índice normalizado de área quemada (NBR). El Índice normalizado de Área Quemada (NBR por sus siglas en inglés) fue desarrollado López y Caselles en 1991 tomando en cuenta las bandas 7 y 4 del sensor TM del satélite Landsat 5 correspondientes al infrarrojo medio y al infrarrojo cercano las cuales poseen una mayor sensibilidad a las superficies quemadas. El NBR se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$\text{NBR} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \quad (1)$$

Donde:

NIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

SWIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo medio

Con el objetivo de aislar el área afectada y obtener una medida cuantitativa del cambio ocasionado por un incendio Key y Benson (2006) proponen restar los valores de NBR correspondientes a la época pos-evento de los valores de la época pre-evento. Esta diferencia se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$\text{dNBR} = \text{NBR}_{\text{pre}} - \text{NBR}_{\text{pos}} \quad (2)$$

Donde:

NBR_{pre} es el valor del índice calculado para la época pre-evento

NBR_{pos} es el valor del índice calculado para la época pos-evento

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) es uno de los índices de vegetación más usados, fue propuesto por Rouse, Haas, Schell y Deering en 1974 para monitorear la vegetación usando imágenes tomadas por el satélite Landsat-1. Su fórmula es:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

Donde:

NIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

RED es la reflectancia en la banda del rojo

Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI). El Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés) fue propuesto de forma similar al Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en 1996 en dos estudios independientes.

Gao (1996) define al índice NDWI como la diferencia normalizada entre dos bandas del infrarrojo, una de ellas centrada en los $0,86 \mu m$ (NIR) y otra centrada en los $1,24 \mu m$ (SWIR). Su fórmula es:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (4)$$

Donde:

NIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

SWIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo medio

Por otro lado McFeeters (1996) lo define de la siguiente manera:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (5)$$

Donde:

GREEN es la reflectancia en la banda del verde.

NIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

Índice de Área Quemada (IAQ). El Índice de Área Quemada fue diseñado por Martín y Chuvieco (1998) específicamente para discriminación de áreas quemadas. Su formulación se basa en la distancia euclidiana entre la reflectancia de las bandas rojo e infrarrojo cercano y sus correspondientes valores de convergencia (0,1 para el rojo y 0,6 para el infrarrojo cercano). Con el fin de que este índice siga la misma lógica de índices como el NDVI, la formulación del índice se define como el inverso de la distancia euclidiana descrita quedando su formulación como:

$$IAQ = \frac{1}{(RED - 0,1)^2 + (NIR - 0,06)^2} \quad (6)$$

Donde:

RED es la reflectancia en la banda del rojo

NIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

Índice de área quemada para Sentinel-2 (BAIS2). El Índice de Área Quemada para Sentinel-2 (BAIS2 por sus siglas en inglés) fue desarrollado por Filipponi (2018) con el objetivo de aprovechar las características espectrales de las imágenes proporcionadas por los Satélites Sentinel-2, sobre todo en el espectro del rojo límite el cual es idóneo para describir el contenido de clorofila. Su fórmula es:

$$BAIS2 = \left(1 - \sqrt{\frac{RE1 * RE2 * NIR2}{RED}} \right) * \left(\frac{SWIR2 - NIR2}{\sqrt{SWIR2 + NIR2}} + 1 \right) \quad (7)$$

Donde:

RE1 es la reflectancia en la banda del rojo límite 1 (B06)

RE2 es la reflectancia en la banda del rojo límite 2 (B07)

NIR2 es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano 2 (B8A)

RED es la reflectancia en la banda del rojo

SWIR2 es la reflectancia en la banda del infrarrojo medio

Índice de separabilidad

En 1994 Kaufman y Remer definieron el índice de separabilidad con el fin de determinar la idoneidad de diferentes mediciones provenientes de imágenes satelitales para discriminar la clase bosque de la clase no bosque. En el estudio de Filipponi (2018) esta medida se usa para determinar la idoneidad del índice BAIS2 para discriminar áreas quemadas de áreas no quemadas. Este índice de separabilidad se define de la siguiente manera:

$$IS = \frac{|\mu_A - \mu_B|}{\sigma_A + \sigma_B} \quad (8)$$

Donde:

μ_A es la media de los valores para la clase A

μ_B es la media de los valores para la clase B

σ_A es la desviación estándar de los valores para la clase A

σ_B es la desviación estándar de los valores para la clase B

Clasificación digital

La clasificación de imágenes provenientes de sensores remotos tiene por objetivo agrupar celdas en función de sus niveles digitales, de esta forma se obtiene una nueva imagen cuyos niveles digitales son los identificadores de cada clase. La clasificación tiene 3 fases: definición de las clases, asignación de los celdas a cada clase y finalmente la verificación y comprobación de resultados. Los métodos de clasificación, de acuerdo a la forma cómo se obtienen las estadísticas de entrenamiento, se pueden clasificar en métodos supervisados y no supervisados (Chuvieco, 1995).

El método supervisado requiere ingresar información preliminar en una fase de entrenamiento por parte del usuario. Mientras que el método no supervisado el software es el encargado de agrupar los celdas. En ambos casos los niveles digitales se clasifican de acuerdo a los procedimientos definidos en cada algoritmo (Chuvienco, 1995 y Al-doski et al. 2013).

Algoritmo K-means. Este algoritmo de clasificación no supervisada ha sido ampliamente estudiado y aplicado desde 1957 y en diferentes áreas de conocimiento (Wu, 2012). Tiene como objetivo crear k conjuntos diferentes no solapados y cada conjunto es representado por su centroide que es la media de los puntos en cada conjunto, donde k es definido por el usuario.

Según Wu (2012) el algoritmo k-means es simple, robusto y altamente eficiente pero también implica desventajas como la convergencia a puntos mínimos locales, puntos de silla y la necesidad de numerosas iteraciones y cálculos de distancia para llegar a un resultado final (Wu, 2012 y Witten, Frank y Hall, 2011). Sea un conjunto de datos $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ que será agrupado con el algoritmo k-means, la función objetivo es dependiente de la distancia entre los datos y el centroide como se describe en la ecuación 10 (Wu, 2012).

$$\min_{m_k, 1 \leq k \leq K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1, x_i \in C_k}^{i=n_k} \text{dist}(x_i, m_k) \quad (9)$$

Donde:

K es el número total de grupos

m_k es el centroide del grupo k

n_k es el número de datos asignados al grupo k

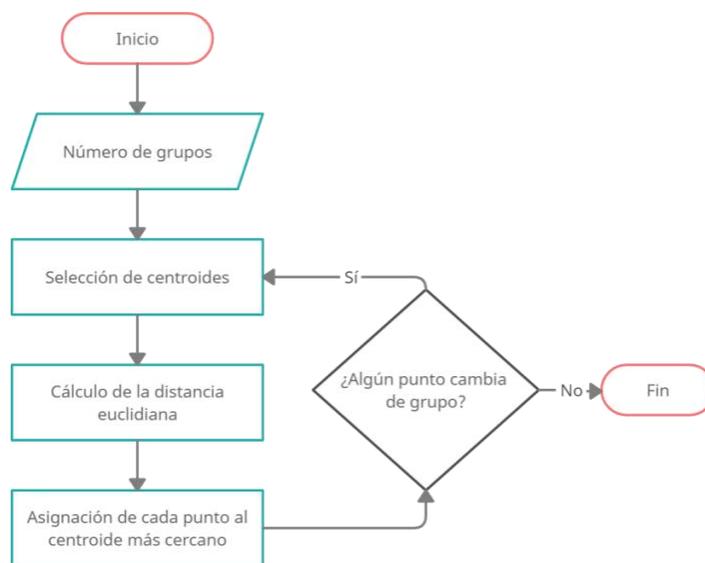
dist es la función de distancia

Como se muestra en la figura 8, el algoritmo comienza con la definición del número de grupos (k), luego se seleccionan aleatoriamente k puntos que serán los centroides para cada grupo, después se calcula la distancia entre cada punto y los centroides para que cada punto sea asignado al centroide más

cercano, una vez que se han creado los conjuntos se calcula un nuevo centroide, este proceso se repite hasta que ningún punto cambie de grupo (Wu, 2012).

Figura 8

Algoritmo k-means



Nota. Diagrama de flujo del algoritmo k-means. Basado en Wu (2012)

Misión Sentinel-2

Es una misión desarrollada por la Agencia Espacial Europea en el marco del programa Copernicus para la observación de la Tierra, está conformada por dos satélites gemelos que transitan en una órbita heliosincrónica con un desfase angular de 180° entre ellos (European Spatial Agency, 2015). Tiene un período de revisita de 2 o 3 días en latitudes medias y 5 días en el ecuador y cubre el planeta desde los 56° sur hasta los 83° norte (European Spatial Agency, 2015).

El sensor integrado en los satélites Sentinel-2 es el MSI (*MultiSpectral Instrument*), un sensor pasivo de barrido (*push broom*). El sensor MSI captura imágenes con un ancho de franja de 290km en 13 bandas espectrales (ver Tabla 3) desde el espectro visible hasta el infrarrojo de onda corta en tres diferentes resoluciones: 10, 20 y 60 metros (ESA, s.f.a).

Tabla 3*Resolución espacial y espectral de las bandas de la misión Sentinel-2*

Resolución espacial (m)	Número de Banda	Sentinel-2A		Sentinel-2B	
		Longitud de onda central (nm)	Ancho de la banda (nm)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de la banda (nm)
10	2	492.4	66	492.1	66
	3	559.8	36	559.0	36
	4	664.6	31	664.9	31
	8	832.8	106	832.9	106
	5	704.1	15	703.8	16
20	6	740.5	15	739.1	15
	7	782.8	20	779.7	20
	8a	864.7	21	864.0	22
	11	1613.7	91	1610.4	94
	12	2202.4	175	2185.7	185
60	1	442.7	21	442.2	21
	9	945.1	20	943.2	21
	10	1373.5	31	1376.9	30

Nota. Esta tabla muestra la resolución espacial en metros, la longitud de onda central y el ancho de banda en nanómetros para cada banda de las imágenes de la misión Sentinel-2, adaptado de ESA (s.f.a).

Productos. Durante la adquisición y procesamiento de los datos, se generan productos en 5 diferentes niveles: L0, L1A, L1B, L1C, L2A, de los cuales solo los productos L1C y L2A están disponibles para su descarga (ESA, s.f.b). Los productos de nivel L1C tienen reflectancias ortorectificadas a nivel superior de la atmósfera (TOA por sus siglas en inglés) e incluyen máscaras para nubes, agua y tierra (ESA, s.f.b). Los productos de nivel L2A poseen escenas ortorectificadas corregidas atmosféricamente e incluyen una escena clasificada (banda SCL) a 60m de resolución espacial con clases para nubes, sombras de nubes, celdas oscuras, suelo desnudo, vegetación, agua y nieve/hielo (ESA, s.f.b).

Convención de denominación. Los productos Sentinel-2 se identifican de acuerdo a un formato específico, determinado por la Agencia Espacial Europea. Este formato indica características como el

satélite, el nivel de procesamiento, la fecha y hora de toma de datos, entre otros, detallado en la tabla 4.

El nombre de un producto Sentinel-2 sigue la siguiente estructura:

MMM_MSIXXX_YYYYMMDDHHMMSS_Nxxyy_ROOO_Txxxxx_YYYYMMDDHHMMSS.SAFE

Tabla 4

Convención de denominación

Sección	Significado
MMM	Identificador del satélite (S2A, S2B)
MSIXXX	Sensor (MSI) y nivel de procesamiento (L1C, L2A)
YYYYMMDDHHMMSS	Fecha y hora de la toma de datos
Nxxyy	Número de línea de procesamiento
ROOO	Número de órbita
Txxxxx	Identificador de la tesela
YYYYMMDDHHMMSS	Fecha y hora de la finalización de toma de datos
.SAFE	Extensión de archivo

Nota. Adaptado de ESA, s.f.c

La teledetección resulta útil en el desarrollo del estudio desde la adquisición de imágenes satelitales, el cálculo de índices espectrales para la estimación de la severidad de los incendios, la clasificación de las imágenes para determinar el área de afectación y el índice de separabilidad. La misión Sentinel-2 presenta ventajas operativas respecto a resolución espacial, temporal y espectral.

Gestión de riesgos de desastres

Según el diccionario de términos de la Oficina de la Organización de las Naciones Unidas para la Reducción de Riesgos de Desastres (2017), el riesgo de desastre es la potencial pérdida de vida, lesiones, destrucción o daño de activos que pueden ocurrir en un sistema, sociedad o comunidad en un tiempo determinado, dicho riesgo está asociado a factores como exposición, amenaza, vulnerabilidad y capacidad. La gestión de riesgos de desastres consiste en la aplicación de políticas y estrategias

concernientes a (Plataforma de las Naciones Unidas de información obtenida desde el espacio para la gestión de desastres y la respuesta de emergencia, s.f.):

- Reducir riesgos de desastres existentes
- Prevenir riesgos de nuevos desastres
- Manejar riesgos residuales
- Fortalecer la resiliencia
- Reducir pérdidas

El riesgo asociado a un evento, sea de origen natural, antrópico o producto de una interacción entre ellos, se manifiesta como una probabilidad en la que intervienen los factores como la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad (UNDRR, s.f.).

- **Amenaza:** Un evento natural o antrópico que puede causar pérdidas humanas, heridas u otros impactos a la salud, daños a la propiedad, conmoción social o económica o degradación del medio ambiente.
- **Exposición:** El estado de las personas y sus activos, como la infraestructura, en áreas propensas a amenazas.
- **Vulnerabilidad:** Se refiere a las características económicas, sociales, físicas, ambientales, entre otras de un individuo, una comunidad o un sistema que lo vuelven más susceptible a los efectos de una amenaza

Es así que el riesgo se define como:

$$\text{Riesgo} = f(\text{Amenaza}, \text{Exposición}, \text{Vulnerabilidad}) \quad (10)$$

Clasificación de las amenazas

La UNDRR (2020) realizó una clasificación de los eventos que pueden ser considerados como una amenaza, tomando en cuenta los glosarios de amenazas existentes (ver Figura 9). Las fuentes consultadas fueron: Las Naciones Unidas y su oficina para la reducción de riesgos, UNDRR y a fuentes

científicas y técnicas autorizadas como DesInventar, EM-DAT, INFORM, universidades, científicos, revistas científicas, entre otros (UNDRR, 2020). Las amenazas recopiladas se clasificaron en ocho grandes grupos.

Amenazas meteorológicas e hidrológicas. Son aquellas que resultan del estado y comportamiento de la atmósfera, su interacción con la tierra y el océano, el tiempo y el clima y la distribución del agua en la superficie de la Tierra (UNDRR, 2020). En esta categoría se agrupan eventos como ciclones, huracanes, tornados, inundaciones, sequías, olas de calor, entre otros.

Amenazas extraterrestres. Son aquellas que se originan en el espacio exterior, en esta categoría se agrupan eventos como impacto de asteroides o meteoritos o llamaradas solares (UNDRR, 2020).

Amenazas geológicas. Tienen origen geológico, se subdivide en tres grupos: volcánicos, sísmicos (que tienen origen en las interacciones geofísicas internas) y superficiales (UNDRR, 2020). En este grupo se destacan las erupciones volcánicas, sismos, erosión o movimientos de masa.

Amenazas ambientales. Se refieren a la degradación de los sistemas naturales y los servicios ambientales que abarcan el agua, el aire, el suelo, biodiversidad y los procesos de la Tierra (UNDRR, 2020). Incluye la pérdida de biodiversidad, degradación del permafrost, derretimiento de los casquetes polares, entre otros.

Amenazas químicas. Trata acerca de los efectos adversos que tiene la exposición a sustancias químicas, sean orgánicas o inorgánicas. Incluye amenazas químicas de efecto inmediato, y aquellas que provocan daños crónicos tras la exposición continua (UNDRR, 2020).

Amenazas biológicas. Son aquellas provocadas por microorganismos, toxinas o sustancias bioactivas de origen natural o que han sido liberadas por el ser humano de forma intencional o no intencional (UNDRR, 2020). Los virus, bacterias, animales venenosos, parásitos o vectores infecciosos se consideran como una amenaza biológica.

Amenazas tecnológicas. Son aquellas derivadas del fallo o mal funcionamiento de los sistemas tecnológicos, pueden provocar daños dentro del propio sistema o fuera del mismo, afectando la seguridad de la población, economía, salud o funciones humanas básicas (UNDRR, 2020).

Amenazas sociales. Mayoritariamente, tienen su origen en las actividades o decisiones humanas con el potencial de afectar a comunidades expuestas. Se derivan de las actividades económicas o socioeconómicas, actividades culturales o movilidad social, el uso de tecnología o por el comportamiento social (UNDRR, 2020).

Figura 9

Clasificación de amenazas

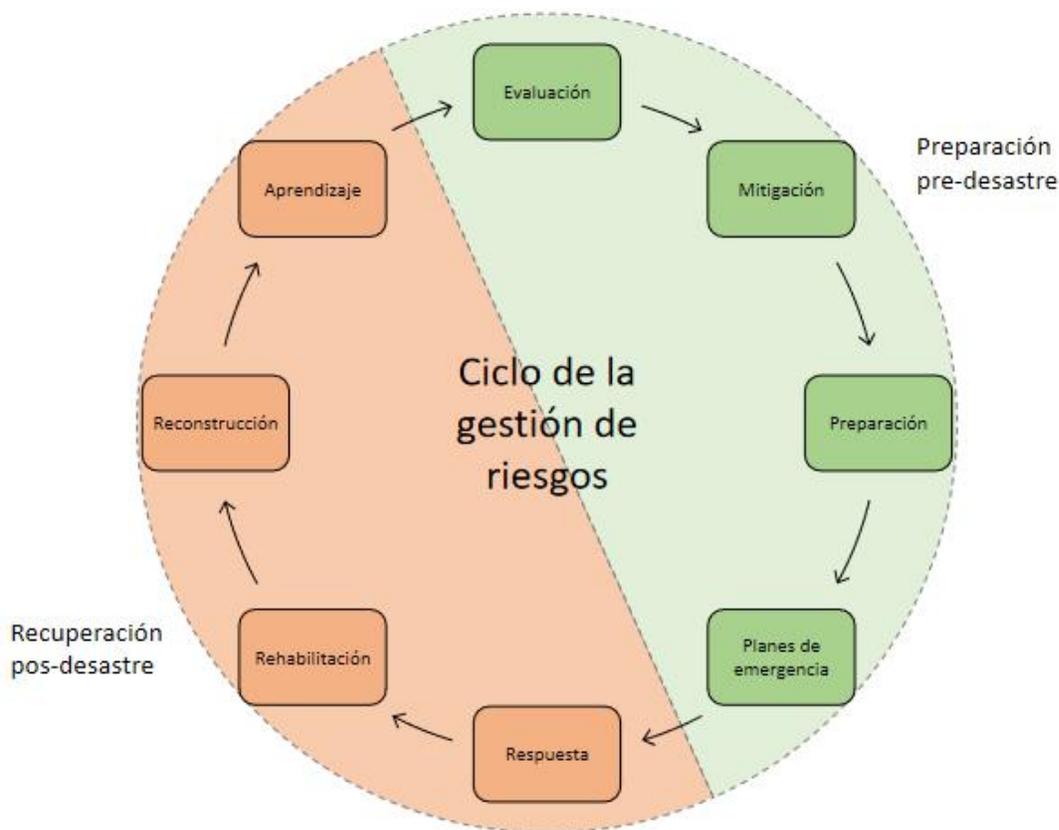


Nota. Basado en UNDRR, 2020.

Ciclo de la gestión de riesgos

Las acciones que conforman la gestión de riesgo pueden ser representadas en forma cíclica, este proceso se trata de un conjunto continuo de acciones interconectadas y no de una serie de acciones que tienen un principio y un final (Carter, 1991). Las actividades dentro del ciclo de la gestión de riesgos (ver Figura 10) pueden agruparse en preparación pre-desastre y recuperación pos-desastre, estas actividades son: (Smith y Petley, 2016).

- Evaluación del riesgo: implica la identificación de la amenaza, la obtención de información y la estimación de las pérdidas.
- Medidas de mitigación: implica tomar medidas con anticipación para reducir o eliminar las pérdidas.
- Preparación: se refiere al estado de alerta por parte de la comunidad ante una amenaza, abarca la planificación de emergencias a corto plazo, advertencias de peligro, procedimientos de evacuación y acopio de suministros.
- Respuesta: corresponde a las primeras horas después del desastre, incluye el rescate inicial de supervivientes, la distribución de suministros básicos y evitar más muertes.
- Rehabilitación: se refiere a las medidas tomadas en las primeras semanas después del desastre, tienen por objetivo preparar a la comunidad para retomar actividades.
- Reconstrucción: se refiere a las medidas que se toman a largo plazo, implica la reconstrucción de infraestructura y el mejoramiento de los planes de gestión de riesgos.
- Aprendizaje: implica la retroalimentación de información y la mejora de los instrumentos de planificación.

Figura 10*Ciclo de la gestión de riesgos*

Nota. Actividades involucradas en la gestión de riesgos. Adaptado de Smith y Petley, 2016

De acuerdo al anexo 6 del reporte técnico de la Oficina de la ONU para la Reducción de Riesgos de Desastres (2020), los incendios forestales son eventos de tipo ambiental dentro del grupo referente a la degradación ambiental. Este estudio aborda la problemática de los incendios forestales dentro de la fase de evaluación del ciclo de la gestión de riesgos ya que comprende la adquisición de datos y la caracterización de los eventos.

Incendios, naturaleza y sociedad

Un incendio forestal es el fuego que se extiende de forma descontrolada que afecta a la cobertura vegetal y la fauna silvestre (SNGRE, s.f.). Los incendios forestales han sido parte de la dinámica

de los ecosistemas durante millones de años y ha influido en gran medida a la vida en la Tierra (Jurvélius, 2004 y Hardesty, et al., 2005). De acuerdo al rol que desempeña el fuego como fuerza de cambio, los ecosistemas se pueden clasificar en diferentes categorías cuyos extremos son (Shlisky et al., 2006):

- Dependientes: Ecosistemas en los cuales las especies han evolucionado en presencia del fuego y donde el fuego es esencial para la conservación de especies, como las sabanas y los bosques templados de coníferas.
- Independientes: Ecosistemas con déficit de material combustible o fuentes de ignición por lo cual el fuego no actúa como una fuerza de cambio, como los desiertos y las tundras.

Estos eventos pueden ser perjudiciales, beneficiosos o benignos dependiendo de dónde y cómo ocurren. Estos pueden ser beneficiosos si ocurren en consonancia con el régimen de incendios del ecosistema, su función radica en limpiar la vegetación degradada, devolver nutrientes al suelo, dispersar semillas de especies arbóreas y reducir la cantidad de material combustible evitando grandes incendios a futuro (WWF, 2020).

Los efectos perjudiciales como la pérdida de biodiversidad y la liberación excesiva de gases de efecto invernadero son causados por incendios forestales fuera del régimen de incendios del ecosistema o en ecosistemas independientes (Hardesty et al., 2005 y Myers, 2006). Mientras que los incendios benignos son aquellos que no suponen un peligro para los ecosistemas o la sociedad como los incendios controlados en campos agrícolas (Hardesty et al., 2005).

La aplicación exitosa de políticas para evitar y suprimir incendios forestales en Estados Unidos y otros países llevó a la acumulación de materiales combustibles y a incendios de mayor intensidad antes del año 2000, es así que las estrategias de manejo del fuego deben considerar el régimen de incendios del ecosistema (Myers, 2006).

Severidad

De acuerdo a Montorio, et al (2014) y Key y Benson (2006), la severidad de un incendio es la magnitud del cambio ecológico ocasionado por el fuego. En consecuencia, a mayor severidad, la cantidad de biomasa y la tasa erosión es mayor, mientras que la tasa de recuperación de la vegetación es menor (Montorio, et al, 2014). De acuerdo al Sistema de Información Europeo para Incendios Forestales (EFFIS) (citado en Llorens, et al, 2021), existen 5 clases de severidad derivadas de la diferencia multitemporal del índice NBR (ver Tabla 5): No quemado/muy baja, baja, moderada, alta, muy alta.

Tabla 5

Clases de severidad

Límites	Severidad
$dNBR < 0,1$	No quemado/muy baja
$0,1 \leq dNBR < 0,256$	Baja
$0,256 \leq dNBR < 0,420$	Moderada
$0,420 \leq dNBR < 0,660$	Alta
$dNBR > 0,660$	Muy Alta

Nota. Adaptado de Llorens, et al, 2021

Si bien los incendios forestales son eventos clasificados como amenazas, son fenómenos complejos debido a sus causas y efectos sobre los ecosistemas y la sociedad. En el ámbito nacional implican pérdida de cobertura vegetal y fauna silvestre, movilización de recursos e incluso pérdida de vidas humanas.

Ciencias de la computación

Es el estudio de las computadoras y la computación, incluyendo sus fundamentos teóricos, hardware y software, abarca también el estudio de algoritmos, estructuras de datos, diseño de redes y computadoras, modelamiento de datos y procesos de información e inteligencia artificial (Belford y Tucker, 2020). Los usuarios interactúan con las computadoras enviando instrucciones a través de

lenguajes de programación (Hemmendinger, 2021). Existen dos formas en que las computadoras realizan instrucciones: computación serial y computación paralela

Computación en serie

En esta forma de procesamiento, cada tarea se realiza en forma secuencial, es así que un problema se divide en un arreglo discreto de operaciones que son ejecutadas sucesivamente y en un único procesador (Rastogi y Zaheer, 2016).

Computación en paralelo

Es un tipo de cómputo en el cual problemas extensos se dividen en problemas más pequeños que son resueltos de manera simultánea en varios sistemas de computación. Estos sistemas permiten resolver problemas que requieren más recursos que los disponibles en un solo sistema logrando así una disminución en el tiempo necesario para solucionar el problema (Marinescu, 2013).

Computación en la nube

Es el método de ejecutar software y almacenar datos en sistemas de computación centralizados otorgando el acceso a los usuarios como un servicio (Carr, 2021). El conjunto de computadoras, recursos y servicios basados en la web se conocen como soluciones basadas en la nube, su naturaleza virtual permite la escalabilidad en procesamiento y almacenamiento (Jamsa. 2012). De acuerdo con la interacción con el usuario, los sistemas en la nube se clasifican en (Jamsa. 2012):

- Software como servicio: Una aplicación de software con interfaz de usuario.
- Plataforma como servicio: Una plataforma en la cual los usuarios pueden desarrollar y publicar sus propias aplicaciones.
- Infraestructura como servicio: Un servicio que provee al usuario de procesadores, almacenamiento y recursos de red en los cuales puede instalar su propio sistema operativo, aplicaciones y recursos de soporte.

Proyecto Google Earth Engine

El proyecto Google Earth Engine (GEE) es un servicio de procesamiento geoespacial (Google Earth Engine, s.f.a), combina catálogos de imágenes satelitales y conjuntos de datos geoespaciales con capacidades de análisis de escala planetaria (GEE, s.f.b). Usa un sistema de procesamiento en paralelo para realizar procesos en múltiples servidores (GEE, s.f.c). este proyecto dispone de la funcionalidad de crear aplicaciones con interfaz gráfica con el objetivo de que sean usadas por usuarios expertos y no expertos sin necesidad de una cuenta de GEE (GEE, s.f.d).

En el presente proyecto se realizó la estimación de severidad de los incendios forestales bajo dos modalidades de procesamiento: uno a través de software GIS y otro a través de una aplicación en GEE, desarrollada para la presente investigación. Estos procesos serán comparados con el objetivo de identificar ventajas y desventajas.

Marco Legal

En esta sección se enumeran los artículos de la legislación vigente respecto al cual se fundamenta el presente estudio, tomando como punto de partida la Constitución de la República del Ecuador, el Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, la Ley de Seguridad Pública y del Estado y el Código Orgánico de Ordenamiento Territorial, Autonomía y Descentralización.

Constitución de la República del Ecuador

“El territorio del Ecuador constituye una unidad geográfica e histórica de dimensiones naturales, sociales y culturales (...)” (Constitución de la República del Ecuador, 2008, Artículo 4)

“El sistema nacional de inclusión y equidad social es el conjunto articulado y coordinado de sistemas, instituciones, políticas, normas, programas y servicios que aseguran el ejercicio, garantía y

exigibilidad de los derechos reconocidos en la Constitución (...), se compone de los ámbitos de la educación, salud, seguridad social, gestión de riesgos, cultura física y deporte, hábitat y vivienda, cultura comunicación e información, disfrute del tiempo libre, ciencia y tecnología, población, seguridad humana y transporte.” (Constitución de la República del Ecuador, 2008, Artículo 340)

“El Estado generará las condiciones para la protección integral de sus habitantes a lo largo de sus vidas que aseguren los derechos y principios reconocidos en la Constitución (...)”. (Constitución de la República del Ecuador, 2008, Artículo 341)

“El Estado protegerá a las personas, las colectividades y la naturaleza frente a los efectos negativos de los desastres de origen natural o antrópico mediante la prevención ante el riesgo, la mitigación de desastres, la recuperación y mejoramiento de las condiciones sociales, económicas y ambientales, con el objetivo de minimizar la condición de vulnerabilidad.

El sistema nacional descentralizado de gestión de riesgo está compuesto por las unidades de gestión de riesgo de todas las instituciones públicas y privadas en los ámbitos local, regional y nacional. El Estado ejercerá la rectoría a través del organismo técnico establecido en la Ley. Tendrá como funciones principales, entre otras:

1. Identificar los riesgos existentes y potenciales, internos y externos que afecten al territorio ecuatoriano.
2. Generar, democratizar el acceso y difundir información suficiente y oportuna para gestionar adecuadamente el riesgo
3. Asegurar que todas las instituciones públicas y privadas incorporen obligatoriamente, y en forma transversal, la gestión de riesgo en su planificación y gestión.
4. Fortalecer en la ciudadanía y en las entidades públicas y privadas capacidades para identificar los riesgos inherentes a sus respectivos ámbitos de acción, informar sobre ellos e incorporar acciones tendientes a reducirlos.

5. Articular las instituciones para que coordinen las acciones a fin de prevenir y mitigar los riesgos, así como para enfrentarlos, recuperar y mejorar las condiciones anteriores a la ocurrencia de una emergencia o desastre.
6. Realizar y coordinar las acciones necesarias para reducir vulnerabilidades y prevenir, mitigar, atender y recuperar eventuales efectos negativos derivados de desastres o emergencias en el territorio nacional.
7. Garantizar financiamiento suficiente y oportuno para el funcionamiento del Sistema, y coordinar la cooperación internacional dirigida a la gestión de riesgo.” (Constitución de la República del Ecuador, 2008, Artículo 389)

“Los riesgos se gestionarán bajo el principio de descentralización subsidiaria que implicará la responsabilidad directa de las instituciones dentro de su ámbito geográfico. (...)” (Constitución de la República del Ecuador, 2008, Artículo 390)

“El patrimonio natural del Ecuador único e invaluable comprende, entre otras, las formaciones físicas, biológicas y geológicas cuyo valor desde el punto de vista ambiental, científico, cultural o paisajístico exige su protección, conservación, recuperación y promoción. (...)” (Constitución de la República del Ecuador, 2008, Artículo 404)

Código orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación

“Los institutos públicos de investigación son entidades con autonomía administrativa y financiera los cuales tienen por objeto planificar, promover, coordinar, ejecutar e impulsar procesos de investigación científica, la generación de innovación, validación, difusión y transferencia de tecnologías.

Se garantiza el funcionamiento permanente de los institutos públicos de investigación relacionados a: salud pública, biodiversidad, investigación agropecuaria, pesca, geología, minería y metalurgia, eficiencia energética y energía renovable, oceanografía, estudio del espacio,

estudio polar antártico, cartográfico y geografía, meteorología e hidrología, estadísticas y censos, patrimonio cultural y los demás que el Presidente de la República considere necesarios. (...)”

(Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, 2016, Artículo 24)

Ley de Seguridad Pública y del Estado

“(...) tiene por objeto regular la seguridad integral del Estado democrático de derechos y justicia y todos los habitantes del Ecuador (...), asegurando la defensa nacional, previniendo los riesgos y amenazas de todo orden, a través del Sistema de Seguridad Pública y del Estado” (Ley de Seguridad Pública y del Estado, 2009, Artículo 1)

“Se protegerá el patrimonio cultural, la diversidad biológica, los recursos genéticos, los recursos naturales, la calidad de vida ciudadana, la soberanía alimentara” (Ley de Seguridad Pública y del Estado, 2009, Artículo 2)

“Los órganos ejecutores del Sistema de Seguridad Pública y del Estado estarán a cargo de las acciones de defensa, orden público, prevención y gestión de riesgos (...).

d) De la gestión de riesgos.- La prevención y las medidas para contrarrestar, reducir y mitigar los riesgos de origen natural y antrópico o para reducir la vulnerabilidad, corresponden a las entidades públicas y privadas, nacionales, regionales y locales. La rectoría la ejercerá el Estado a través de la Secretaría Nacional de gestión de Riesgos.” (Ley de Seguridad Pública y del Estado, 2009, Artículo 11)

Código Orgánico de Ordenamiento Territorial, Autonomía y Descentralización.

“La gestión de riesgos que incluye las acciones de prevención, reacción, mitigación, reconstrucción y transferencia, para enfrentar todas las amenazas de origen natural o antrópico que afecten al territorio se gestionarán de manera concurrente y de forma articulada por todos

los niveles de gobierno de acuerdo con las políticas y los planes emitidos por el organismo nacional responsable, de acuerdo con la Constitución y la Ley.

Los gobiernos autónomos descentralizados municipales adoptarán obligatoriamente normas técnicas para la prevención y gestión de riesgos en sus territorios con el propósito de proteger las personas, colectividades y la naturaleza, en sus procesos de ordenamiento territorial

La gestión de los servicios de prevención, protección, socorro y extinción de incendios, que de acuerdo con la Constitución corresponde a los gobiernos autónomos descentralizados municipales, se ejercerá con sujeción a la ley que regule la materia. Para tal efecto, los cuerpos de bomberos del país serán considerados como entidades adscritas a los gobiernos autónomos descentralizados municipales, quienes funcionarán con autonomía administrativa y financiera; presupuestaria y operativa, observando la ley especial y normativas vigentes a las que estarán sujetos.” (Código Orgánico de Ordenamiento Territorial, Autonomía y Descentralización, 2016)

Una vez descritos los lineamientos teóricos y legales que respaldan la investigación, se plantea la metodología y los procedimientos usados para el cumplimiento de los objetivos de investigación, los cuales tienen un carácter práctico y en los cuales se desarrollan los principios de repetibilidad y replicabilidad.

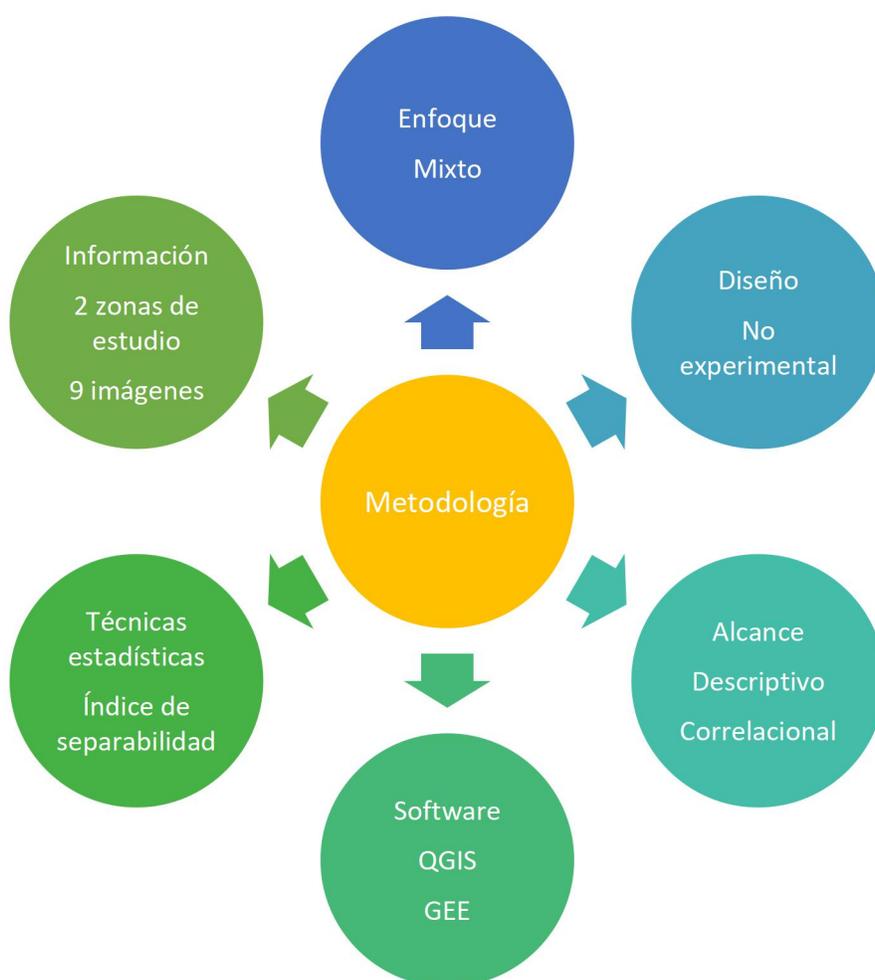
Capítulo III

Metodología

En este capítulo se describe el planteamiento del enfoque, alcance y diseño de la investigación, así como también la información de entrada y los procesos utilizados para alcanzar los objetivos propuestos. Los aspectos fundamentales de la metodología empleada se resaltan en la Figura 11.

Figura 11

Resumen metodológico



Nota. Resumen metodológico gráfico.

Enfoque

La presente investigación maneja un enfoque mixto, cuantitativo-cualitativo (CUAN-cual) dado que se plantea una predominancia del enfoque cuantitativo. En lo que respecta a la determinación de la severidad se utiliza un enfoque cuantitativo, al igual que en la determinación del área afectada por los incendios, se utiliza un enfoque cuantitativo-cualitativo al determinar la idoneidad de un índice espectral basado en el índice de separabilidad. Sin embargo, comparar la efectividad de los procesos de cálculo de severidad corresponde a un enfoque cualitativo puesto que se refiere a la interpretación de los resultados.

Alcance

El presente estudio comprende dos alcances: descriptivo y correlacional. Se adopta un alcance descriptivo en lo que corresponde a la descripción de los incendios utilizando variables como severidad, área de afectación y la separabilidad de las clases “quemado” y “no quemado”. El alcance correlacional se usa en la comparación de efectividad entre la estimación de la severidad a través de la aplicación y la estimación mediante el uso de software libre.

Diseño de investigación

La presente investigación corresponde a un diseño no experimental de tipo longitudinal puesto que su propósito se centra en evaluar el cambio en la cobertura vegetal a causa de un incendio forestal, entendido como la severidad del incendio y por lo cual se han considerado dos épocas para el análisis de datos: pre-evento y pos-evento.

Obtención de imágenes satelitales

Para la obtención de imágenes dentro de la aplicación web, se creó una función de búsqueda, utilizando un área de interés y un intervalo con fechas de inicio y fin de búsqueda. Para procesar imágenes en QGIS es necesario descargarlas a través de la página <https://scihub.copernicus.eu>. Se analizaron un total de 9 imágenes (ver Tabla 6).

Tabla 6*Imágenes utilizadas para el estudio*

Imagen	Área de interés	Época
S2B_MSIL2A_20190731T153629_N0213_R068_T17MPR_20190731T212459	Quilanga	Pre
S2B_MSIL2A_20190711T153629_N0213_R068_T17MPR_20190711T210516	Quilanga	Pre
S2A_MSIL2A_20190825T153621_N0213_R068_T17MPR_20190825T212229	Quilanga	Pre
S2B_MSIL2A_20190929T153619_N0213_R068_T17MPR_20190929T204724	Quilanga	Pos
S2B_MSIL2A_20190909T153619_N0213_R068_T17MPR_20190909T212127	Quilanga	Pos
S2B_MSIL2A_20190919T153619_N0213_R068_T17MPR_20190919T204201	Quilanga	Pos
S2A_MSIL2A_20191014T153621_N0213_R068_T17MPR_20191014T194639	Quilanga	Pos
S2B_MSIL2A_20191218T153619_N0213_R068_T17MQV_20191218T193314	Casitagua	Pre
S2A_MSIL2A_20200211T153611_N0214_R068_T17MQV_20200211T194219	Casitagua	Pos

Nota. Identificador de imagen, su correspondiente área de interés y época

Enmascaramiento de nubes

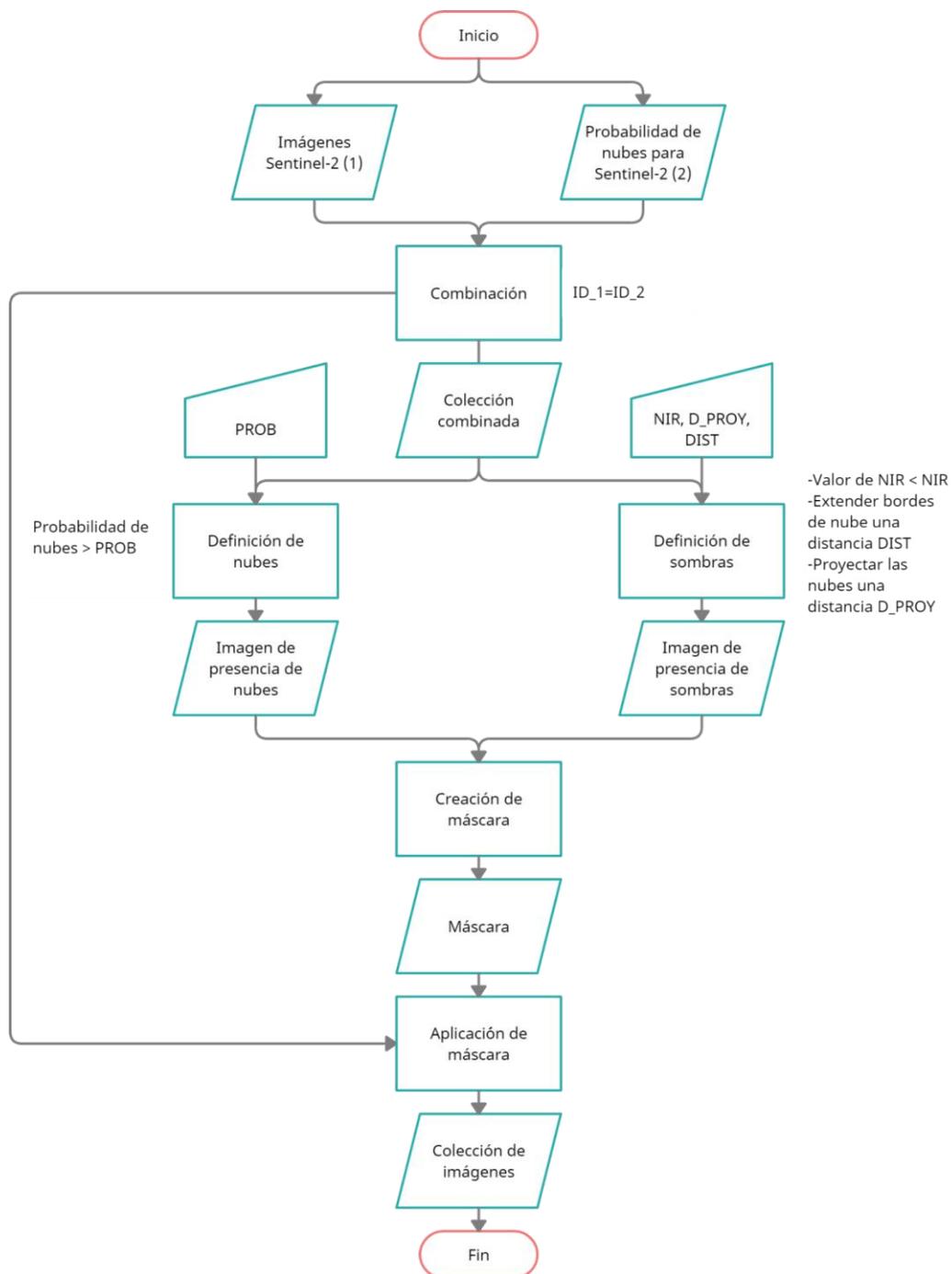
Este proceso consiste en eliminar las nubes y las sombras de nubes en las imágenes satelitales para combinarlas y obtener una escena con bajo porcentaje de nubosidad y sombras.

Aplicación web

El algoritmo desarrollado por Braaten (2021) para la interfaz de programación de Google Earth Engine en Python fue adaptado a Javascript. Este algoritmo (ver Figura 12) elabora una máscara a partir de una imagen de probabilidad de nubes para Sentinel-2, la proyecta sobre el terreno y la interseca con celdas con valores de bajos en la banda del NIR que se interpretan como sombras de nubes, el resultado es una colección de imágenes con baja nubosidad (ver Figura 13).

Figura 12

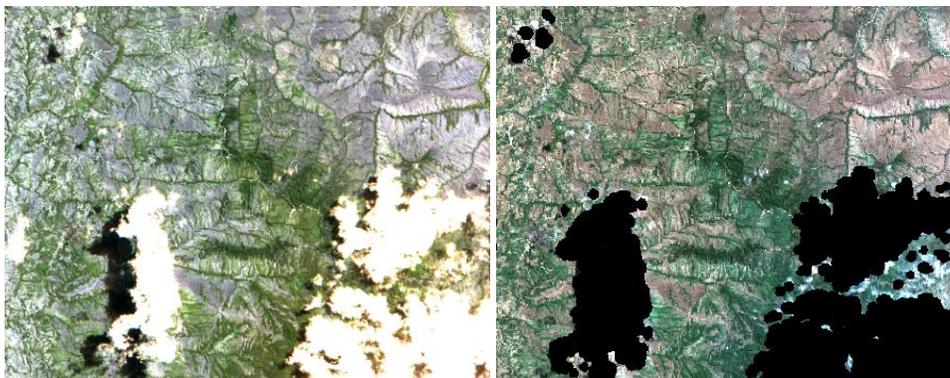
Algoritmo para enmascaramiento de nubes-GEE



Nota. Basado en Braaten (2021)

Figura 13

Algoritmo para enmascaramiento de nubes - Aplicación



Nota. Antes y después de la aplicación del enmascaramiento de nubes sobre una sección de la imagen

S2A_MSIL2A_20190825T153621_N0213_R068_T17MPR_20190825T212229.

Software libre: QGIS

Dado que en QGIS no existe una herramienta con la misma funcionalidad que el algoritmo descrito anteriormente, fue necesario realizar un proceso análogo (ver Figura 14) usando la banda SCL de las imágenes que contiene clases para nubes y sombras de nubes. Para obtener una máscara de nubes se reclasifican los valores de las celdas (1 para nubes, 0 para otras), este ráster se convierte en un polígono y se aplica un buffer de 120m. Para obtener la máscara de sombras se reclasifica la imagen (1 para sombras, 0 para otras). La figura 15 muestra el resultado de la aplicación del algoritmo.

Figura 14

Algoritmo para enmascaramiento de nubes - QGIS

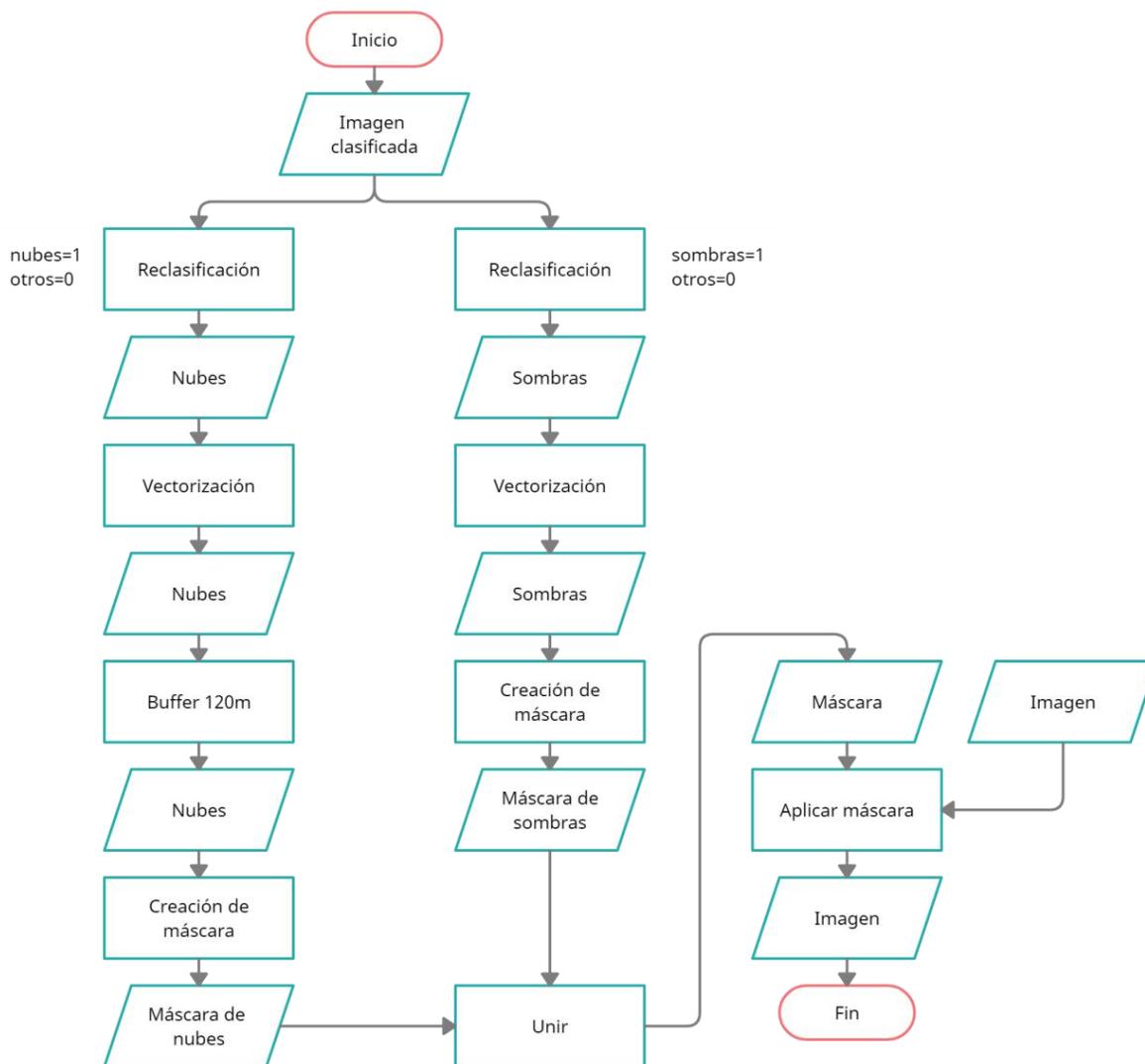
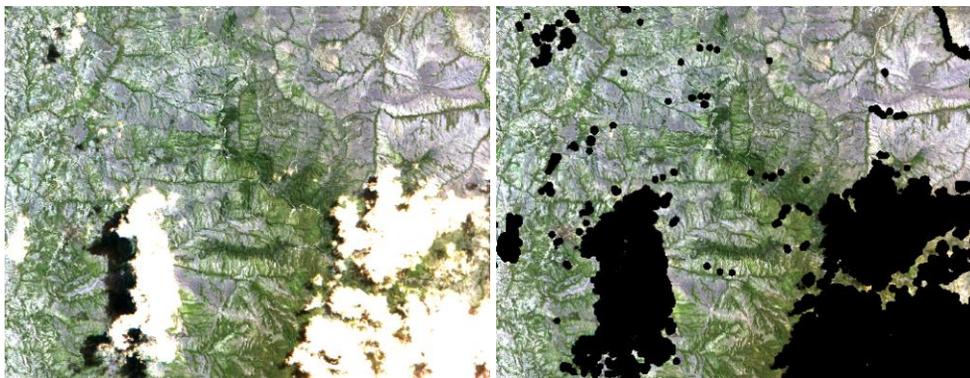


Figura 15

Enmascaramiento de nubes - QGIS



Nota. Antes y después de la aplicación del enmascaramiento de nubes sobre una sección de la imagen S2A_MSIL2A_20190825T153621_N0213_R068_T17MPR_20190825T212229.

Estimación de la severidad

Con el objetivo de obtener resultados homogéneos y que la severidad sea positiva para todos los índices considerados en el estudio: BAIS2 (Ec. 7), IAQ (Ec. 8), NBR (Ec. 1), NDVI (Ec. 3) y NDWI (Ec. 4), los valores correspondientes a los índices IAQ y BAIS2 se invirtieron. En la aplicación se desarrollaron funciones para calcular índices espectrales en cada imagen dentro de una colección, posteriormente se realiza un mosaico generando una imagen única para cada época (pre-evento y pos-evento) y finalmente ambos mosaicos se restan para obtener la severidad (Ec. 2), por otro lado, en QGIS se utilizó la calculadora ráster para el cálculo de índices, posteriormente se crearon los mosaicos para pre-evento y pos-evento y finalmente, estos mosaicos se restan.

Clasificación

La clasificación de las diferencias se realizó con la herramienta K-means de SAGA-GIS (Conrad, O. 2001). El archivo de entrada es una imagen, el método elegido fue la combinación de los métodos *Minimum Iterative Distance* y *Hill-climbing*, el número de clases se definió entre cinco y diez, de acuerdo a los resultados obtenidos para cada clase, de igual forma, el número de iteraciones máximo se definió

de tal forma que no existieran variaciones en los centroides hasta el cuarto decimal. Las imágenes clasificadas se reclasifican con el objetivo de obtener dos clases: quemado y no quemado, esta nueva imagen se transforma en un polígono para calcular su área.

Separabilidad

La diferencia entre las “clases quemado” y “no quemado” se estima de acuerdo al índice de separabilidad (Ec. 9). Este valor es un indicativo de la idoneidad de un índice para discriminar áreas quemadas, para ello se calculó la media y la desviación estándar de las dos clases: quemado y no quemado.

Ya que se han descrito la metodología empleada, los resultados obtenidos del empleo de la misma son analizados con el objetivo de llegar a conclusiones significativas acerca del presente estudio, a través de la discusión de resultados.

Capítulo IV

Análisis de Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el presente estudio, de acuerdo a los objetivos planteados y tomando en cuenta el enfoque y el alcance definidos en el capítulo III.

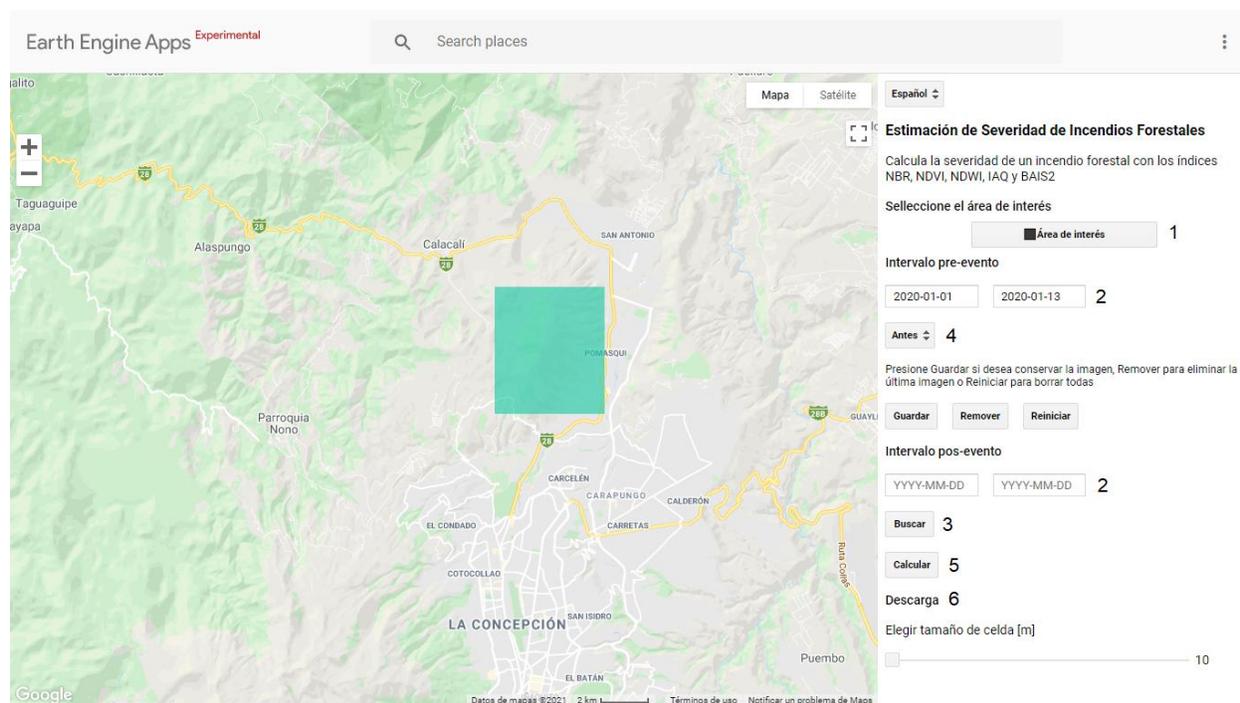
Aplicación web

La aplicación web desarrollada en Google Earth Engine para la estimación de la severidad de incendios forestales fue programada en lenguaje Javascript, se encuentra disponible en:

<https://jonathangej.users.earthengine.app/view/forest-fires-severity>, cuenta con una interfaz gráfica (ver Figura 16) que le permite al usuario seleccionar un área de interés e intervalos de búsqueda para cada época, seleccionar las imágenes, calcular la severidad y finalmente descargar los resultados.

Figura 16

Interfaz gráfica de la aplicación

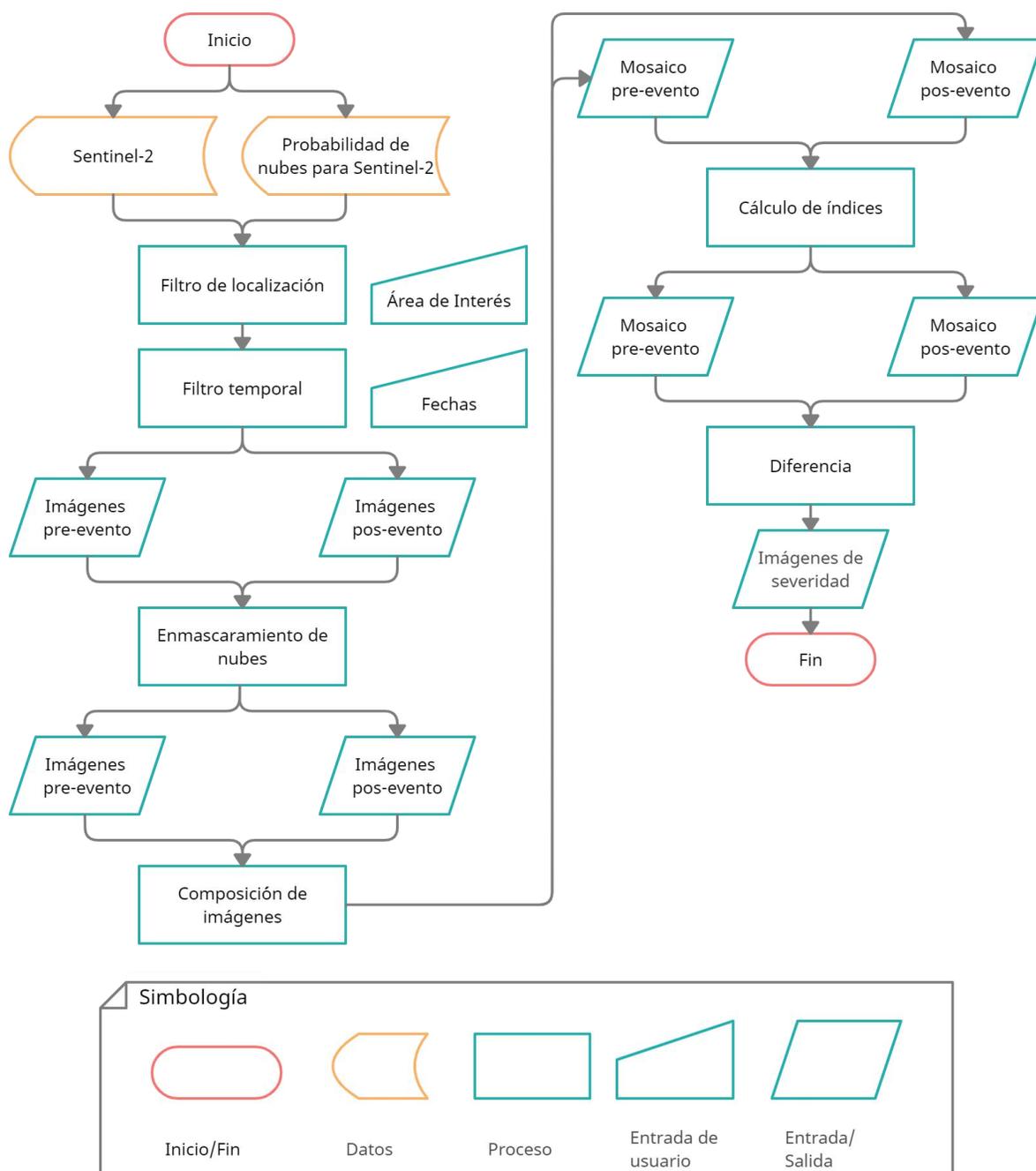


Nota. 1) Selección de área de interés, 2) ingreso de intervalos de búsqueda, 3) búsqueda de imágenes, 4) menú para selección de imágenes, 5) cálculo de severidad, 6) sección de descarga de resultados.

El esquema básico del funcionamiento de la aplicación se presenta en la figura 17, mientras que el código fuente de la aplicación se presenta en el Anexo 1.

Figura 17

Diagrama de funcionamiento de la aplicación



Área de afectación

En la tabla 7 se pueden observar los valores de media y desviación estándar tanto para el área afectada por el incendio del cantón Quilanga (μ_Q y σ_Q) como para áreas no afectadas (μ_{NQ} y σ_{NQ}), de estos valores se deriva el índice de separabilidad (IS).

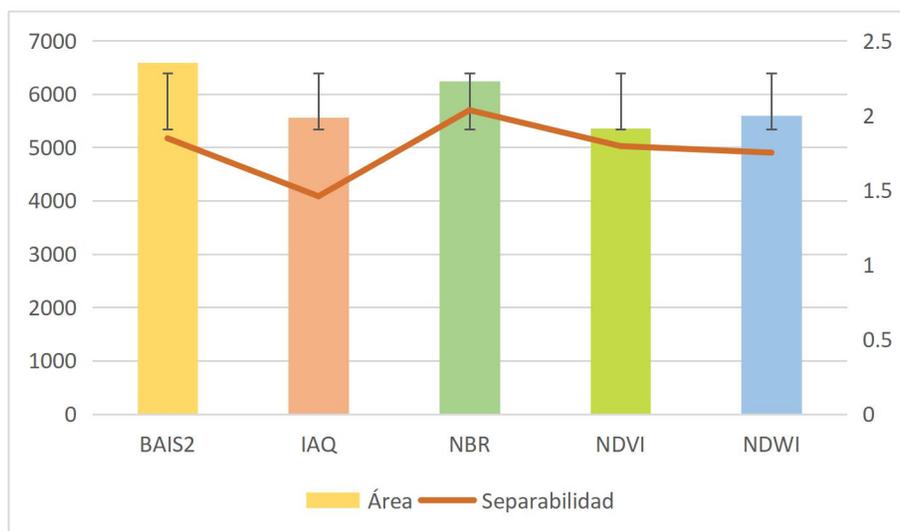
Tabla 7

Resumen estadístico - Quilanga, 2019

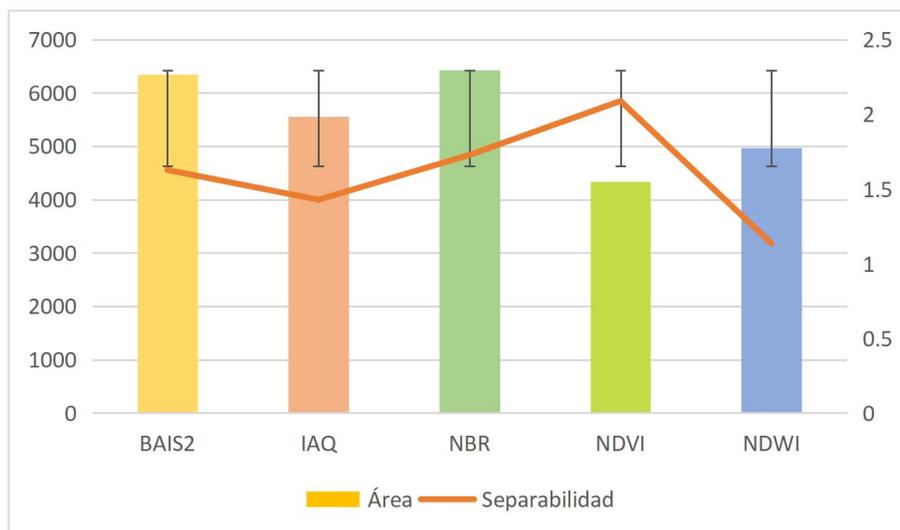
	Aplicación					
	μ_Q	σ_Q	μ_{NQ}	σ_{NQ}	IS	Área (ha)
BAIS2	0,503	0,180	0,048	0,067	1,846	6586,327
IAQ	240,431	143,498	-6,629	25,980	1,458	5557,709
NBR	0,547	0,174	0,086	0,053	2,034	6242,334
NDVI	0,400	0,116	0,106	0,048	1,794	5353,505
NDWI	0,332	0,117	0,058	0,039	1,750	5591,281
	QGIS					
	μ_Q	σ_Q	μ_{NQ}	σ_{NQ}	IS	Área (ha)
BAIS2	0,513	0,182	0,081	0,084	1,627	6347,159
IAQ	200,282	127,940	-0,319	12,551	1,428	5561,729
NBR	0,537	0,181	0,108	0,067	1,728	6426,178
NDVI	0,452	0,094	0,136	0,057	2,089	4342,741
NDWI	0,324	0,155	0,083	0,057	1,135	4967,516

Nota. μ representa la media, σ la desviación estándar e IS el índice de separabilidad

El área delimitada por el índice NBR presenta los valores de IS más altos en conjunto con una área de afectación mayor (ver Figuras 18 y 19), si bien en el proceso de QGIS presenta el valor más alto de IS con el índice NDVI, también presenta el valor de área más bajo. En consecuencia, este incendio forestal ocurrido en septiembre de 2019 afectó 6242,334 hectáreas.

Figura 18*Área e IS - Quilanga (Aplicación)*

Nota. Comparación del IS y el área afectada obtenidos a través de la aplicación. Las barras de error corresponden al área.

Figura 19*Área e IS - Quilanga (QGIS)*

Nota. Comparación del IS y el área afectada obtenidos a través de QGIS. Las barras de error corresponden al área.

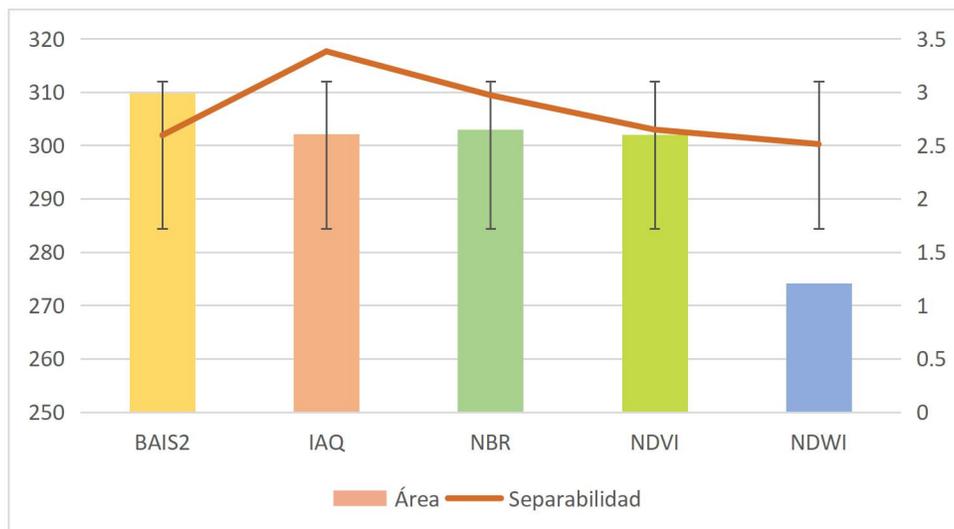
De acuerdo al resumen presentado en la tabla 8, las clases quemado y no quemado para el caso de estudio del volcán Casitagua son más distinguibles en el área delimitada por el índice IAQ obtenido por la aplicación, el cual presenta un IS de 3,38 (ver Figuras 20 y 21). El área afectada por el incendio forestal en el volcán Casitagua de enero de 2020 fue de 302,113 hectáreas.

Tabla 8

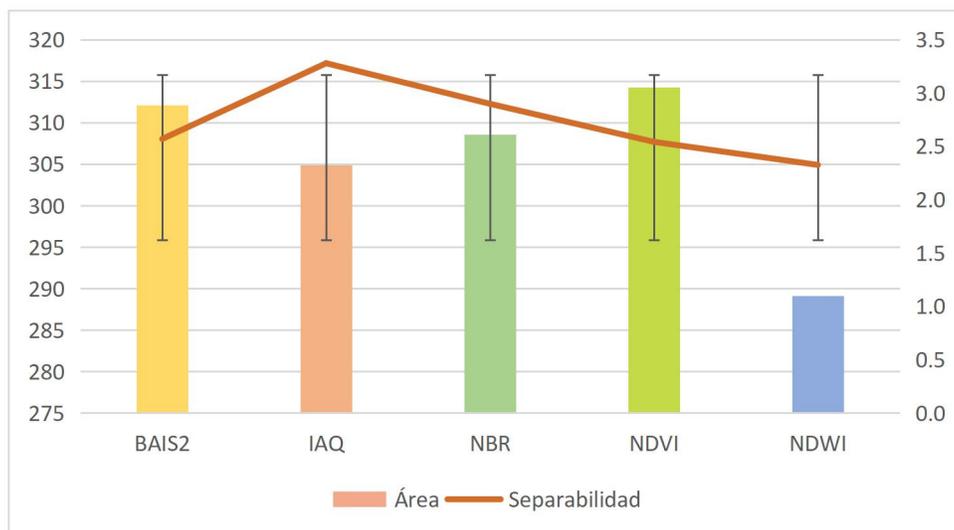
Resumen estadístico - Casitagua, 2020

Aplicación						
	μ_Q	σ_{NQ}	μ_{NQ}	σ_{NQ}	IS	Área (ha)
BAIS2	0,417	0,080	0,009	0,077	2,594	309,782
IAQ	334,297	78,295	0,076	20,582	3,380	302,113
NBR	0,530	0,100	0,007	0,076	2,969	302,958
NDVI	0,347	0,071	0,007	0,058	2,647	301,994
NDWI	0,322	0,065	0,015	0,058	2,511	274,132
QGIS						
	μ_Q	σ_Q	μ_{NQ}	σ_{NQ}	IS	Área (ha)
BAIS2	0,416	0,081	0,007	0,078	2,569	312,098
IAQ	332,441	80,214	1,286	20,795	3,278	304,916
NBR	0,527	0,103	0,005	0,077	2,898	308,602
NDVI	0,341	0,074	0,005	0,058	2,541	314,295
NDWI	0,319	0,073	0,007	0,061	2,325	289,125

Nota. μ representa la media, σ la desviación estándar e IS el índice de separabilidad

Figura 20*Área e IS - Casitagua (Aplicación)*

Nota. Comparación del IS y el área afectada obtenidos a través de la aplicación. Las barras de error corresponden al área.

Figura 21*Área e IS - Casitagua (Aplicación)*

Nota. Comparación del IS y el área afectada obtenidos a través de QGIS. Las barras de error corresponden al área.

Análisis de Severidad

Una vez obtenida el área afectada, se realizó la clasificación de la diferencia de NBR de acuerdo a la Tabla 5. De acuerdo a la clasificación de severidad del incendio en el cantón Quilanga (ver Tabla 9), el 49,02% del área afectada corresponde a una severidad alta, lo cual abarca un área de 3059,851 hectáreas. La distribución espacial de las clases de severidad se presenta en la figura 22.

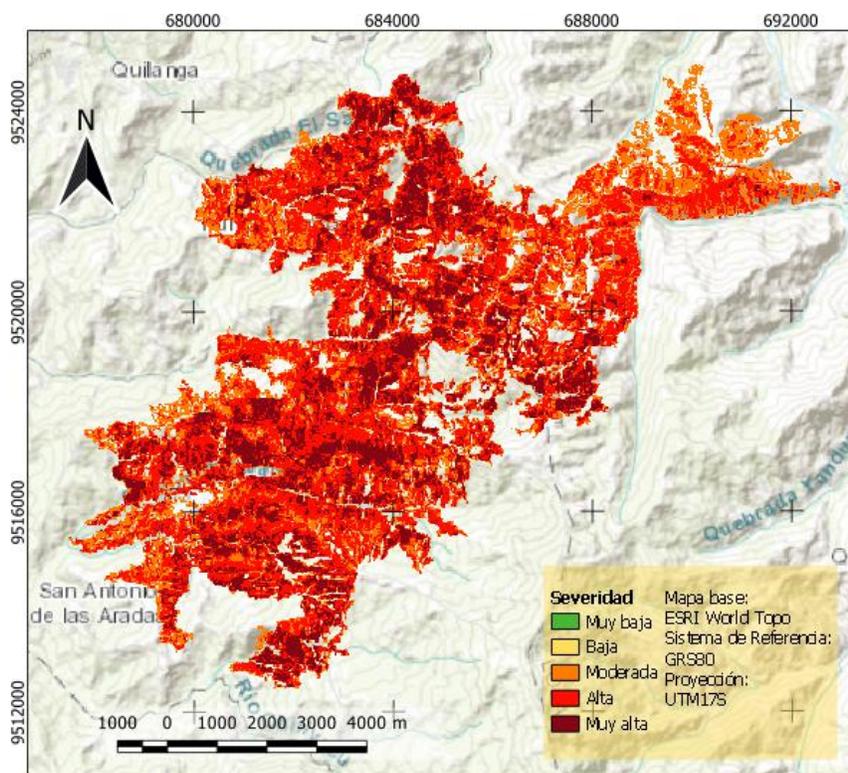
Tabla 9

Clasificación de severidad - Quilanga

Severidad	Área (ha)	Porcentaje
Muy baja	0,159	0,002
Baja	7,234	0,12
Moderada	1627,663	26,08
Alta	3059,851	49,02
Muy alta	1547,427	24,78

Figura 22

Mapa de severidad - Quilanga

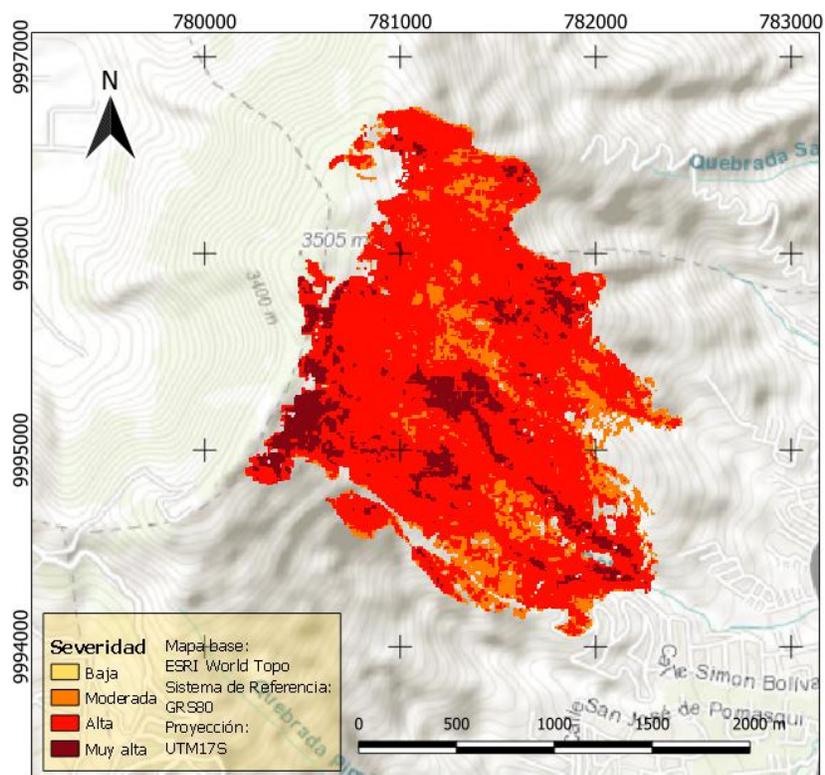


Para el caso de estudio del cantón Quilanga (ver Figura 23), la mayor parte del área afectada por el incendio corresponde a una severidad alta, con un área de 225,460 hectáreas, la cual representa el 74,63% del total (ver Tabla 10).

Tabla 10

Clasificación de severidad - Casitagua

Severidad	Área (ha)	Porcentaje
Baja	0,129	0,04
Moderada	41,808	13,84
Alta	225,460	74,63
Muy alta	34,716	11,49

Figura 23*Mapa de severidad - Casitagua***Balance de efectividad**

Con el fin de establecer diferencias cualitativas de las dos plataformas utilizadas, se plantea su evaluación de acuerdo a los siguientes parámetros: tiempo de adquisición, tiempo de procesamiento, requerimientos de hardware, software y conectividad (ver Tabla 9). Cabe recalcar que esta comparación se realiza únicamente en la fase de estimación de severidad, no contempla clasificación ni cálculo del índice de separabilidad. Ya que el software QGIS no ofrece información acerca de los requerimientos de hardware, se describen las características del hardware utilizado para el presente estudio.

Tabla 11*Matriz de balance de efectividad*

Parámetro	Aplicación	QGIS
Tiempo de adquisición de imágenes	2 minutos	1 hora (aprox.) por imagen, a una velocidad de descarga de 300Kbps
Tiempo de procesamiento	Mosaico y cálculo de índices: 2-10 minutos	Enmascaramiento de nubes: 10 min 32 seg Cálculo de índices: 56 segundos Mosaico: 1 min 30 seg por imagen Diferencia: 27 segundos
Requerimientos de hardware	Sistemas de escritorio con interacción de mouse o touchpad, compatibles con navegadores de internet	Velocidad de Procesador: mayor a 2GHz Arquitectura del procesador: 64-bits Memoria RAM: 4Gb Espacio libre en almacenamiento: 5Gb
Requerimientos de software	Navegador de internet	Navegador de internet para la adquisición de imágenes Software incluido en QGIS: Python 3,9 SAGA GIS GRASS
Requerimientos de conectividad	Conexión permanente	Una vez obtenidas las imágenes, la conexión a internet no es necesaria
Obtención de resultados	Límite de descarga de 20Mb	El límite referido al peso de los archivos resultantes dependerá del hardware disponible

De acuerdo a la evaluación de parámetros, la aplicación desarrollada en el presente proyecto demuestra una mayor efectividad, al cumplir el objetivo de cálculo de índices empleando un menor tiempo y sin la necesidad de de instalar software especializado para el procesamiento digital de imágenes, a continuación se presentan las ventajas derivadas de la Tabla 9.

- El tiempo de adquisición es considerablemente menor, debido a que Google Earth Engine utiliza repositorios locales, por el contrario, para el proceso en QGIS, es necesario que el usuario descargue las imágenes a su computador.

- En la aplicación desarrollada, el procesamiento está automatizado, por lo que el tiempo de interacción con el usuario disminuye respecto al proceso en QGIS debido a que es necesario interactuar con el sistema para cada uno de los procesos.
- Respecto a los requerimientos de software, la aplicación web funciona desde un navegador, por el contrario para el proceso de QGIS es necesario instalarlo y configurarlo, además del uso de un navegador para la descarga de imágenes.

Si bien la aplicación web demuestra diversas ventajas, también presenta desventajas respecto a la conectividad y a la obtención de resultados, como se evidencia a continuación:

- La aplicación requiere conexión a internet permanente, por el contrario, en el proceso de QGIS la conectividad solo es necesaria para descargar las imágenes.
- El límite de descarga de la aplicación es de 20MB, mientras que QGIS no tiene limitaciones respecto al peso de los archivos, dependerá de las características de hardware disponibles.

Los resultados obtenidos de la presente investigación se comparan con otros estudios de la misma temática o aquellos que hayan empleado metodologías similares, permitiendo obtener una visión más amplia de los resultados en un contexto científico.

Capítulo V

Discusión

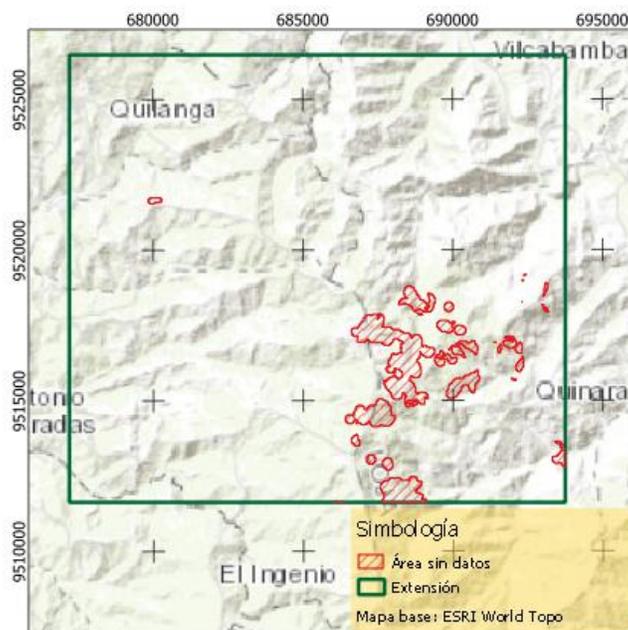
En este capítulo se discute la metodología empleada y los resultados obtenidos, contrastándolos con investigaciones acerca de los incendios forestales utilizando teledetección

Enmascaramiento de nubes y mosaico

Debido a que las escenas satelitales analizadas para estudiar el incendio ocurrido en el volcán Casitagua no presentaron nubes en el área incendiada, no fue necesario realizar el proceso de enmascaramiento de nubes ni el mosaico. Por el contrario, la zona de estudio del cantón Quilanga presentó cobertura de nubes sobre el área afectada por el incendio, es por este motivo que fue necesario usar diversas imágenes tanto para la época pre-evento como para la época pos-evento. El mosaico resultante (ver Figura 24) presenta zonas sin datos, por lo cual el área quemada puede ser mayor.

Figura 24

Área sin datos



Índices espectrales

De acuerdo a la revisión bibliográfica presentada en los antecedentes de la investigación, se pueden utilizar diferentes índices espectrales para la discriminación de áreas afectadas por incendios forestales y la determinación de su severidad. De acuerdo a Tran, et al. (2018), no existe índice ideal, lo cual se corresponde con los resultados obtenidos, para el incendio del cantón Quilanga, el índice espectral con un mayor valor de separabilidad corresponde al NBR mientras que para el incendio del volcán Casitagua, el valor de separabilidad correspondiente al índice IAQ fue el más alto.

El resultado obtenido para el volcán Casitagua presenta similitudes con los resultados obtenidos por Columba et al. (2016), en cuya investigación se describe al índice IAQ como el idóneo para la discriminación de áreas incendiadas de acuerdo a una inspección visual de los casos de estudio, en la presente investigación, la idoneidad de un índice se define de acuerdo al índice de separabilidad y el área afectada, a más de una inspección visual de los resultados.

Si bien el estudio de Filipponi (2018) asegura que el índice BAIS2 presenta valores mayores de separabilidad que el índice NBR, los resultados de la presente investigación difieren en ambos casos de estudio, a pesar de esto y de acuerdo a lo expresado por Llorens, et al. (2021) valores de separabilidad mayores a 1 indican una adecuada separación entre las clases, por consiguiente, los índices utilizados separan adecuadamente las clases quemado y no quemado en los dos casos de estudio.

Severidad

La severidad de un incendio forestal representa la magnitud de un cambio ecológico, por lo cual, los archivos ráster resultantes para cada diferencia multitemporal de índices pueden ser representados en mapas de severidad de incendio. Sin embargo, existe bibliografía referida a clases de severidad solo para el índice NBR como los planteados por Key y Benson (2006) o por EFFIS (citado en Llorens, 2021).

Sistemas de procesamiento

En este estudio se realizó la estimación de severidad de los incendios forestales a través de dos procesos: una aplicación web desarrollada en la plataforma Google Earth Engine y otro proceso usando el software libre QGIS.

Tal y como se describe en el capítulo de resultados, la aplicación presenta diversas ventajas sobre el procesamiento convencional a través de software GIS, sobre todo en lo correspondiente a la velocidad de procesamiento, sin embargo presenta una limitación respecto al límite de peso por archivo para descargar los resultados obtenidos.

Debido al límite mencionado, se implementó un ajuste de escala a través de una barra deslizadora, de esta forma, el usuario puede aumentar el tamaño de la celda, disminuyendo así el peso del archivo resultante. Cabe mencionar que no fue necesario aumentar el tamaño de celda en ninguno de los casos de estudio, sabiendo que el incendio del cantón Quilanga ha sido el incendio más grande del país, tomando las estadísticas desde 2018 hasta 2020 (SNGRE, 2021). Y fue comprobado con un testigo para realizar una comprobación de la metodología empleada.

Una vez que se contrastan los resultados obtenidos con los resultados de otras investigaciones y tomando en cuenta el contexto descrito en los antecedentes, las conclusiones se presentan como el punto culminatorio de la investigación, en la cual se informa el cumplimiento de los objetivos, hipótesis y metas de investigación.

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

En concordancia con lo desarrollado a lo largo del presente estudio, se describen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Conclusiones

OE1. Entendiendo a la severidad de un incendio forestal como la magnitud del cambio ecológico provocado por el fuego, se utilizó la diferencia de NBR para evaluar el cambio causado en la cobertura vegetal. En este sentido se concluye que los incendios forestales en el cantón Quilanga (2019) y en el volcán Casitagua (2020), ocasionaron una degradación con una severidad predominantemente alta en el estado de la vegetación: 49% y 74% respectivamente. Por lo tanto se cumple totalmente el objetivo específico 1.

OE2. Según los resultados obtenidos y la revisión bibliográfica, el objetivo de cuantificar el área afectada por los incendios forestales se cumple parcialmente en el caso de estudio del cantón Quilanga debido a que existen zonas sin datos, sin embargo este incendio ha sido el más grande registrado en el Ecuador en los tres últimos años, afectando 6243,334 hectáreas. Respecto al caso de estudio del volcán Casitagua, el objetivo mencionado se cumple en su totalidad, este incendio afectó alrededor de 302,113 hectáreas.

OE3. De acuerdo al balance de efectividad en el que se consideran los parámetros: tiempo de adquisición y procesamiento, requerimientos de hardware, software y conectividad, obtención de resultados, la aplicación desarrollada en Google Earth Engine es más efectiva, ya que cumple con el objetivo propuesto en menor tiempo y con un menor uso de recursos. En este sentido, el objetivo se cumple totalmente.

H1: El análisis de los resultados reveló que los valores de los índices de vegetación obtenidos de las dos zonas de estudio presentan una diferencia multitemporal (antes-después) positiva, lo cual indica

que el estado de la vegetación después del incendio es bajo en relación al estado previo al incendio, en consecuencia, existe una degradación en el estado de la vegetación causada por los incendios forestales del cantón Quilanga, 2019 y el volcán Casitagua, 2020. Por tal razón, la H1, se cumple totalmente.

H2: En la matriz de balance de efectividad se compararon los parámetros: tiempo de adquisición y procesamiento, requerimientos de hardware, software y conectividad, y obtención de resultados. De la cual se derivó cuali-cuantitativamente un conjunto de ventajas y desventajas de los sistemas de procesamiento, mismos que confirman que: la combinación de la teledetección con la computación en la nube superan al procesamiento convencional en tiempo y aprovechamiento de recursos. Por lo tanto la hipótesis se cumple parcialmente, en razón de una limitación de carga y descarga ocasionada por el peso de los ficheros.

Recomendaciones

Dado que el proceso de estimación de severidad a través de la aplicación web desarrollada demostró ser más efectivo, se recomienda su uso para toma de decisiones, investigaciones posteriores u otros propósitos que el usuario considere pertinentes.

En la presente investigación se estimó la severidad de acuerdo a dos épocas definidas, se recomienda emplear series de tiempo con el objetivo de observar el desarrollo de los fenómenos de degradación y recuperación ambiental a través del tiempo.

En esta investigación se abordó el ciclo de la gestión de riesgos desde su primera fase: evaluación, por lo cual se recomienda continuar con las fases de mitigación, preparación y planes de emergencia para futuras investigaciones.

Debido a las dificultades provocadas por la cobertura de nubes de las imágenes multiespectrales, se recomienda estudiar el uso potencial de las imágenes provenientes de Radar de Apertura Sintética para el monitoreo de la vegetación.

La automatización del procesamiento digital de imágenes permite economizar tiempo en el proceso de toma de decisiones, por lo cual se recomienda la automatización de procesos siempre y cuando no sea necesaria la intervención humana.

Referencias Bibliográficas

- Al-doski, J., Mansor, S. B., Zulhaidi, H., & Shafri, M. (2013). *Image Classification in Remote Sensing*. 3(10), 141–148.
- Ayanz, J. S.-M., Gitas, I., Camia, A., & Oliveira, S. (2011). *Advances in Remote Sensing and GIS applications in Forest Fire Management From local to global assessments*.
- Carr, N. (2021). Cloud computing. In *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/technology/cloud-computing>
- Chuvieco Salinero, E. (2009). Detección y análisis de incendios forestales desde satélites de teledetección. *Revista de La Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 173–182.
- Chuvieco Salinero, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (RIALP, S.A).
- Chuvieco, E., Martín, M. P., & Palacios, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5103–5110. <https://doi.org/10.1080/01431160210153129>
- Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación. Suplemento - Registro Oficial 899. 9 de diciembre de 2016.
- Código Orgánico de Ordenamiento Territorial, Autonomía y Descentralización. Registro Oficial Suplemento 303. 19 de octubre de 2010.
- Columba, M., Alezandra, W., Quisilema, R., Padilla, O., & Toulkeridis, T. (2016). Identificación de zonas de recurrencia de incendios forestales mediante análisis multitemporal y aplicación de índices espectrales, en el distrito metropolitano de Quito. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, 1(3), 7–13.
- Constitución de la República del Ecuador. Registro Oficial 449. 20 de octubre de 2008
- Cuadra, D. E. (2017). Los enfoques de la geografía en su evolución como ciencia. *Geográfica Digital*, 11(21), 1. <https://doi.org/10.30972/geo.11212186>
- Elbert, B. (2008). *Introduction to Satellite Communication* (3rd ed.). Artech House, Inc.
- ESA. (2020). *Types of orbits*. Enabling Support: Space Transportation.
https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits
- ESA. (s.f.a). *MultiSpectral Instrument (MSI) Overview*. Sentinel-2 MSI.
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>
- ESA. (s.f.b). *Products and Algorithms*. Sentinel-2 MSI. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/products-algorithms>

- ESA. (s.f.c). *Naming convention*. User guides: Sentinel-2 MSI.
[https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/naming-convention#:~:text=The%20top%2Dlevel%20SENTINEL%2D2,separated%20by%20an%20underscore%20\(–\)&text=The%20Mission%20Identifier%20\(MMM\)%20denotes,for%20the%20SENTINEL%2D2B%20instrument.](https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/naming-convention#:~:text=The%20top%2Dlevel%20SENTINEL%2D2,separated%20by%20an%20underscore%20(–)&text=The%20Mission%20Identifier%20(MMM)%20denotes,for%20the%20SENTINEL%2D2B%20instrument.)
- ESA. (2015). *Sentinel 2*. Space in Member States: Spain.
https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2
- Eurisy. (s.f.). *Satellite applications*. <https://www.eurisy.eu/satellite-applications/>
- Fang, H., & Liang, S. (2014). Leaf Area Index Models. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (Issue January). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09076-x>
- Filipponi, F. (2018). BAIS2: Burned Area Index for Sentinel-2. *Proceedings*, 2(7), 364.
<https://doi.org/10.3390/ecrs-2-05177>
- Fornacca, D., Ren, G., & Xiao, W. (2018). Evaluating the best spectral indices for the detection of burn scars at several post-fire dates in a Mountainous Region of Northwest Yunnan, China. *Remote Sensing*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/rs10081196>
- Gao, B.C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- GEE. (s.f.a). *Welcome to Google Earth Engine*. Google Earth Engine.
<https://developers.google.com/earth-engine>
- GEE. (s.f.b). *Google Earth Engine*. <https://earthengine.google.com/>
- GEE. (s.f.c). *Functional Programming Concepts*. Google Earth Engine: Guides.
https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/tutorial_js_03
- Hardesty, J., Myers, R., & Fulks, W. (2005). Fire, ecosystems and people: a preliminary assessment of fire as a global conservation issue. *Fire Management*, 22(4), 78–87.
- Hemmendinger, D. (2021). Computer programming language. In *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/technology/computer-programming-language>
- Hernández, L., Barreira, R., Grillo, C., Asunción, M., Colomina, D., Domínguez, E., & Peiteado, C. (2020). *El Planeta En llamas* (A. Asiain & M. Valladares (eds.); WWF España).
<https://www.wwf.es/?54921/Informe-incendios-forestales-2020-El-planeta-en-llamas>
- Instituto de Estadística de la UNESCO. (2013). Clasificación Internacional Normalizada de la Educación (CINE) 2011. In *Clasificación Internacional Normalizada de la Educación (CINE) 2011*. Instituto de Estadística de la UNESCO. <https://doi.org/10.15220/978-92-9189-129-0-spa>

- Instituto de Estadística de la UNESCO. (2014). *Campos de educación y capacitación 2013 de la CINE (ISCED-F 2013)*. Instituto de Estadística de la UNESCO.
<http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/isced-fields-of-education-and-training-2013-sp.pdf>
<http://www.uis.unesco.org/Library/Documents/isced-f-2013-fields-of-education-training-2014-spa.pdf>
- Instituto de Estadística de la UNESCO. (2015). *International Standard Classification of Education (ISCED) Fields of Education and Training 2013* (Issue May). Instituto de Estadística de la UNESCO.
<http://www.uis.unesco.org/Education/Pages/international-standard-classification-of-education.aspx>
- Jackson, R. D., & Huete, A. R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11(3–4), 185–200. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(05\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(05)80004-2)
- Jamsa, K. (2012). *Cloud Computing* (1st ed.). Learning, Jones and Bartlett.
- Johnston, R. (2020). Geography. In *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/geography>
- Jurvélius, M. (2004). HEALTH AND PROTECTION | Forest Fires (Prediction, Prevention, Preparedness and Suppression). *Encyclopedia of Forest Sciences*, 334–339. <https://doi.org/10.1016/b0-12-145160-7/00277-5>
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape Assessment (LA) sampling and analysis methods. In L. H. G. Duncan C. Lutes, Robert E. Keane, John F. Caratti, Carl H. Key, Nathan C. Benson, Steve Sutherland (Ed.), *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory* (Issues 164 RMRS-GTR, pp. 1–51). USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT.
https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr164.pdf
- Ley de Seguridad Pública y del Estado. Registro Oficial Suplemento 35. 28 de septiembre de 2009
- Llorens, R., Sobrino, J. A., Fernández, C., Fernández-Alonso, J. M., & Vega, J. A. (2021). A methodology to estimate forest fires burned areas and burn severity degrees using Sentinel-2 data. Application to the October 2017 fires in the Iberian Peninsula. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 95(October 2020), 102243. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102243>
- Lopez García, M. J., & Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. *Geocarto International*, 6(1), 31–37. <https://doi.org/10.1080/10106049109354290>
- Marinescu, D. C. (2013). Parallel and Distributed Systems. In *Cloud Computing*.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-404627-6.00002-6>
- Martín Isabel, M., & Chuvieco Salinero, E. (1998). Cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. *Serie Geográfica*, 7(7), 109–128.

- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432.
<https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Miller, J. D., & Thode, A. E. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109(1), 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>
- Montorio, R., Pérez-Cabello, F., García-Martín, A., Vlassova, L., & De la Riva, J. (2014). La severidad del fuego: revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales. *Geoecología, Cambio Ambiental y Paisaje: Homenaje Al Profesor José María García Ruiz*, 427–440.
- Myers, R. L. (2006). Living with Fire—Sustaining Ecosystems & Livelihoods through Integrated Fire Management. Global Fire Initiative. *The Nature Conservancy*, June, 28.
http://www.nature.org/initiatives/fire/files/integrated_fire_management_myers_2006.pdf.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 1.
<https://doi.org/10.1021/jf60203a024>
- Science learning hub. (2020). *Artificial satellites*. Resources.
<https://www.sciencelearn.org.nz/resources/269-artificial-satellites>
- Shlisky, A., Waugh, J., Gonzalez, P., Gonzalez, M., Manta, M., Santoso, H., Alvarado, E., Ainuddin, A., Rodríguez-trejo, D. A., Swaty, R., Schmidt, D., Kaufmann, M., Myers, R., Alencar, A., Kearns, F., Johnson, D., Smith, J., & Zollner, D. (2007). Fire, ecosystems and people : threats and strategies for global biodiversity conservation. *The Nature Conservancy Global Fire Initiative Technical Report, January 2015*, 17.
http://mrcc.isws.illinois.edu/living_wx/wildfires/fire_ecosystems_and_people.pdf
- Siso, G. (2010). ¿Qué es la Geografía? *Terra*, 26(39), 147–182.
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-70892010000100008&lng=es&tlng=es.
- SNGRE. (s.f.). *Incendios Forestales*. Programas y servicios.
<https://www.gestionderiesgos.gob.ec/incendios-forestales/>
- SNGRE. (2019). *Informe de Situación No.: 054 - Incendios Forestales*.
<https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2019/10/Informe-de-Situaci%C3%B3n-No-54-Incendios-Forestales-25102019.pdf>
- SNGRE. (2021). *Informe de Situación No.: 031 - Incendios Forestales*.
<https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2021/01/Informe-de-Situacion-No-031-Cierre-2020-Incendios-Forestales.pdf>
- Stillman, D. (2017). *What is a satellite?* Nasa Knows! <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-satellite-58.html>

- Tran, B. N., Tanase, M. A., Bennett, L. T., & Aponte, C. (2018). Evaluation of spectral indices for assessing fire severity in Australian temperate forests. *Remote Sensing*, *10*(11), 1–18.
<https://doi.org/10.3390/rs10111680>
- UNDRR. (2017). *Disaster risk*. Terminology. <https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk>
- UNDRR. (s.f.). *Disaster Risk*. PreventionWeb: Understanding Disaster Risk.
<https://www.preventionweb.net/understanding-disaster-risk/component-risk/disaster-risk>
- UNDRR. (2017). *Disaster risk reduction*. Terminology. <https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk-reduction>
- UNDRR. (2017). *Hazard*. Terminology. <https://www.undrr.org/terminology/hazard>
- WWF. (2020). Fires, forest and the future: a crisis raging out of control? *World Wide Fund for Nature*, 1–20. www.swim2birds.co.uk
- Xiong, X., & Butler, J. (2018). Volume 1 Overview. In *Comprehensive Remote Sensing* (pp. 1–6). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10311-2>

Anexos