

INSTITUTO DE ALTOS ESTUDIOS NACIONALES
LA UNIVERSIDAD DE POSGRADO DEL ESTADO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

INSTITUTO DE ALTOS ESTUDIOS NACIONALES
LA UNIVERSIDAD DE POSTGRADO DEL ESTADO

MAESTRÍA EN PREVENCIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS DE DESASTRES.

ARTÍCULO CIENTÍFICO

ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL, DE LA SEVERIDAD DE INCENDIOS Y SU
IMPACTO EN EL USO Y COBERTURA DE SUELO EN LA PROVINCIA DE LOJA
ENTRE LOS AÑOS 2017 Y 2020.

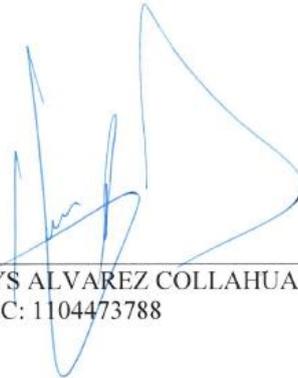
Autor: Harry Alexys Alvarez Collahuazo

Tutor: Pablo Edilberto Melo Coy

Quito, octubre 2021

AUTORÍA

Yo, Harry Alexys Alvarez Collahuazo, con CC 1104473788, declaro que las ideas, juicios, valoraciones, interpretaciones, consultas bibliográficas, definiciones y conceptualizaciones expuestas en el presente trabajo, así como sus procedimientos y herramientas utilizadas en la investigación son de absoluta responsabilidad del autor del trabajo de titulación. Asimismo, me acojo a los reglamentos internos de la universidad correspondientes a los temas de honestidad académica.

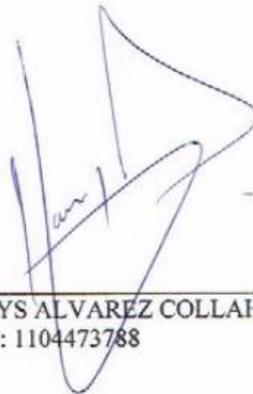


HARRY ALEXYS ALVAREZ COLLAHUAZO
CC: 1104473788

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Autorizo al Instituto de Altos Estudios Nacionales (IAEN) la publicación de este trabajo de titulación, de su bibliografía y anexos, como artículo en publicaciones para lectura seleccionada o fuente de investigación, siempre dando a conocer el nombre del autor y respetando la propiedad intelectual del mismo.

Quito, 01 de octubre de 2021.



HARRY ALEXYS ALVAREZ COLLAHUAZO
CC: 1104473788

Tabla de Contenido

Título	5
Resumen	5
Palabras clave	5
Abstract	5
Keywords.....	5
Introducción.....	6
Desarrollo	8
Área de estudio	8
Datos y método.....	10
Enmascaramiento de nubes, sombras y cuerpos de agua.	11
Mosaicos y composiciones de imágenes pre y post incendio.....	12
Índices espectrales para mapeo de áreas quemadas.	12
SMILE Random Forest (SRF).....	13
Resultados.	14
Discusión y conclusiones.	18
Fuentes bibliográficas.....	20

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de los productos utilizados.....	10
---	----

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Provincias más afectadas por incendios	6
Ilustración 2. Mapa de Uso y Cobertura de la Tierra provincia de Loja.....	9
Ilustración 3. Media mensual de lluvias a largo plazo (2010 – 2021).....	9
Ilustración 4. Flujograma metodológico	11
Ilustración 5. Representación gráfica de índices y áreas de incendio.	14
Ilustración 6. Cobertura y uso de la tierra afectada.....	15
Ilustración 7. Años por severidad de incendios.....	15
Ilustración 8. Área de afectación por cantones de la provincia de Loja.....	16
Ilustración 9. Severidad de incendio por cobertura y uso del suelo.	17
Ilustración 10. Comparación de áreas entrenadas y alertas FIRMS.....	17

Título

Análisis espacio temporal, de la severidad de incendios y su impacto en el uso y cobertura de suelo en la provincia de Loja entre los años 2017 y 2020.

Resumen

Los incendios constituyen uno de los eventos peligrosos que más a afectado a la provincia de Loja en los últimos años. Es por esto que la presente investigación presenta una propuesta metodológica para el análisis de la severidad de incendios y su impacto en la cobertura del suelo, haciendo uso de una plataforma de análisis de datos a escala planetaria (Google Earth Engine), además de índices espectrales y de algoritmos de aprendizaje automático para identificar las zonas donde se ha producido un incendio y su posterior evaluación en cuanto a la severidad del mismo y determinar cual o cuales han sido los usos de suelo más afectados; con el fin de aportar al entendimiento de los incendios en el marco de la prevención y gestión de riesgos.

Palabras clave

Incendios, Google Earth Engine, Sentinel 2, Loja, SMILE Random Forest

Abstract

Wildfires are one of the most dangerous events that have been affected the Loja province in recent years. This is why this research presents a methodological proposal for the analysis of wildfires severity and its impact on land cover, by using a planetary-scale data analysis platform (Google Earth Engine), in addition to spectral indices and automatic learning algorithms to identify the areas where wildfires had occurred and its subsequent evaluation in terms of its severity and to determine which have been the most affected land uses; in order to contribute to the understanding of fires within the framework of risk prevention and management.

Keywords

Wildfires, Google Earth Engine, Sentinel 2, Loja, SMILE Random Forest

Introducción

Los incendios forestales se pueden definir como fuegos que se propagan en la naturaleza sin control humano que pueden ser de origen natural o antrópico, consumiendo la flora y fauna a su paso (Pausas, 2020). Para que se produzca un incendio forestal son necesarios tres factores: una ignición, oxígeno y combustible (Pausas, 2020), sin embargo existen tres factores subyacentes más (humedad, disponibilidad de biomasa y la disponibilidad hídrica), tal es el caso que el oxígeno es necesario para que la vegetación conserve una humedad baja, pero que pasa en los desiertos que cumplen ya esta función y es que existe un subfactor extra que es la cantidad de biomasa disponible para combustionar además de la disponibilidad hídrica que se refiere a la ausencia o presencia de lluvias en determinado tiempo.

De acuerdo con Global Forest Watch (GFW, 2020) de 2001 a 2019, Ecuador perdió 822 mil ha de cobertura arbórea, lo que equivale a una disminución del 4.3% de la cobertura arbórea desde 2000, y al menos 367Mt de las emisiones de CO₂, principalmente por temas de deforestación, sin embargo entre octubre de 2017 y noviembre de 2020, han existido 64.659 alertas de incendio de acuerdo a la información proporcionada por el sensor VIIRS¹, con una tendencia marcada en los meses de octubre y noviembre.

En 2019 las provincias más afectadas por incendios forestales son Loja, Pichincha y Azuay, en las que se registran un total de hectáreas quemadas de 3.700, 2.200 y 2070 respectivamente (El Comercio & SNGRE, 2020a) Desde el 2018 la provincia de Loja es la provincia más afectada a causa de incendios forestales siendo el 2019 el año con mayor cantidad de hectáreas quemadas 8.503. (El Comercio & SNGRE, 2020b). (Ilustración 1)

Ilustración 1. Provincias más afectadas por incendios

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
LOJA	3 161	6 460	1 794	4 144	8 503	5 339
PICHINCHA	6 532	885	2 326	3 437	2 876	4 074
AZUAY	1 681	2 898	1 604	4 390	509	2 498
IMBABURA	2 626	1 430	1 298	1 598	3 499	1 660
CHIMBORA..	2 234	2 564	1 140	2 585	738	2 548

Fuente: El Comercio & SNGRE, 2020(MAE, 2018)

Elaborado por: El Comercio & SNGRE, 2020

Desde el 2015 hasta el 13 de noviembre de 2020, la provincia de Loja ha sufrido la pérdida de 29.401 hectáreas a causa de incendios (El Comercio & SNGRE, 2020a). En la

¹ Conjunto de radiómetros de imágenes de infrarrojos visibles (VIIRS por sus siglas en inglés)

provincia de Loja se concentran una gran cantidad de bosques secos tropicales, por la condiciones climáticas y posición geográfica (latitud), al occidente de la provincia los cantones Zapotillo, Macará, Celica, Pindal, Puyango, Paltas, Olmedo, Sozoranga, Calvas, Gonzanama, Quilanga, Espíndola, Catamayo, Chaguarpamba y Loja, históricamente han sido afectados por sequías severas que se podrían considerar como factor detonante de muchos incendios forestales, ocasionando pérdidas incalculables de biodiversidad y económicas.

Actualmente el Programa de Entrenamiento en Sensores Remotos Aplicados (ARSET por sus siglas en inglés) que forma parte de la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA por sus siglas en inglés) proporciona una serie de herramientas, cuya principal fuente de información son imágenes satelitales que proporcionan y aportan diferentes tipos de datos para el monitoreo de incendios, dentro de los principales usos en los que se emplean para monitoreo de incendios se encuentran: mapeo de combustibles (biomasa), monitoreo de paisajes pre incendio, monitoreo de vegetación, condiciones climáticas, anomalías de temperatura, humedad del suelo, detección de humo, áreas quemadas etc.(ARSET, 2021) . A nivel regional el Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mariano Gulich” es el ente que lidera estudios de geomática aplicada a nivel de Sudamérica, incluyendo la Gestión de Incendios Forestales, además de proporcionar talleres como el impartido en febrero de 2021 denominado “Gestión de incendios forestales mediante el uso de la plataforma Google Earth Engine”, el mismo que fue socializado a través de YouTube (IG, 2021).

Barboza (et al., 2020), en su investigación sobre el monitoreo de incendios en la región norte del Perú, compara el uso de imágenes satelitales Landsat 8 y Sentinel 2, además de la aplicación de diferentes índices espectrales a fin de obtener la mejor interpretación de las áreas afectadas por incendios y los patrones espacio temporales que producen la pérdida de bosques en la amazonia peruana, mediante el uso de la plataforma Google Earth Engine; Anaya (et al., 2018) en su investigación describe la identificación de áreas quemadas en tres zonas diferentes de Sudamérica (Bosques amazónicos de Colombia, bosques amazónicos de transición en Bolivia y una zona agrícola en el sector del Chaco en Argentina) y se discuten los límites más adecuados para aceptar un índice espectral como válido al momento de identificar áreas quemadas y se anotan de manera favorable las facilidades de manejo de información y de uso de la plataforma Google Earth Engine para el manejo de las imágenes satelitales; para el Ecuador Torres (2021) detalla el uso de diferentes índices espectrales respecto a la identificación de áreas quemadas y la aplicación en las regiones de la Sierra y la Costa ecuatoriana aplicando la metodología propuesta por UN-SPIDER (2019), utilizando como plataforma de análisis Google Earth Engine.

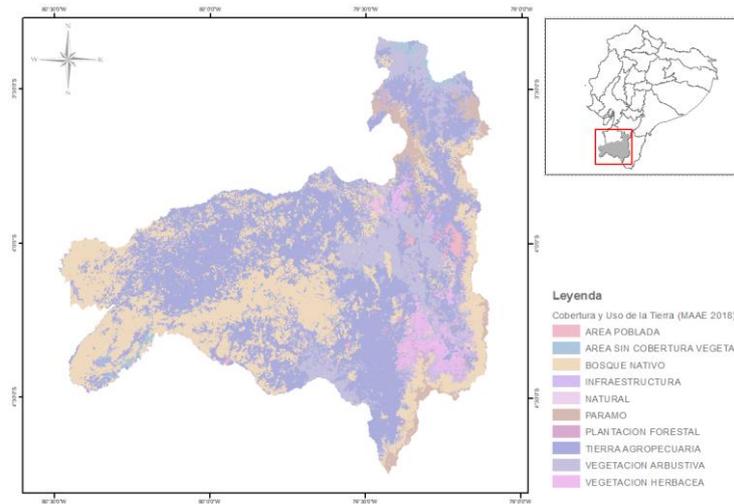
En este contexto la presente investigación aporta a la comprensión de uno de los fenómenos climatológicos que, en los últimos años más afectado a la provincia de Loja, dado que no se han encontrado evidencias bibliográficas de acciones concretas con la finalidad de evitar la pérdida de cobertura vegetal ocasionada por los incendios. Además, permitirá identificar las áreas de mayor afectación por incendios forestales, los patrones espaciales asociados a esta y la cobertura y uso de la tierra que más ha sido afectado, con la finalidad de que se puedan emprender acciones de recuperación, políticas de reducción y mitigación de riesgo.

Desarrollo

Área de estudio

La provincia de Loja se encuentra demarcada territorialmente al sur del Ecuador (aproximadamente a 4° de latitud sur y 79° de longitud oeste), con una superficie aproximada de 11.065 km² (GADPL, 2015), con elevaciones que comprenden desde los 120 a 3880 metros sobre el nivel medio del mar, estas diferencias de alturas disminuyen de oriente a occidente (GADPL, 2015); administrativamente está conformado por 16 cantones (CONALI, 2020). La provincia de Loja se caracteriza por su diversidad en climas y pisos altitudinales, en donde los ecosistemas presentes y las acciones agrícolas en la provincia se ven directamente afectadas por las variaciones inter anuales del clima (Rollenbeck et al., 2011), y las características físicas propias de la topografía, dado a que la cordillera sufre una caída altitudinal conocida como la depresión de Huancabamba (Samaniego et al., 2015, Maldonado et al., 2005). En cuanto al uso y ocupación del suelo el Ministerio del Ambiente (MAE, 2018), ha clasificado que 17,86% de la provincia se encuentra ocupado por Vegetación Arborea (con subtipos de Bosque Natural y Plantaciones Forestales) y es el uso más predominante, seguido de Vegetación Arbustiva (13,91%) y Páramo (4,42%).

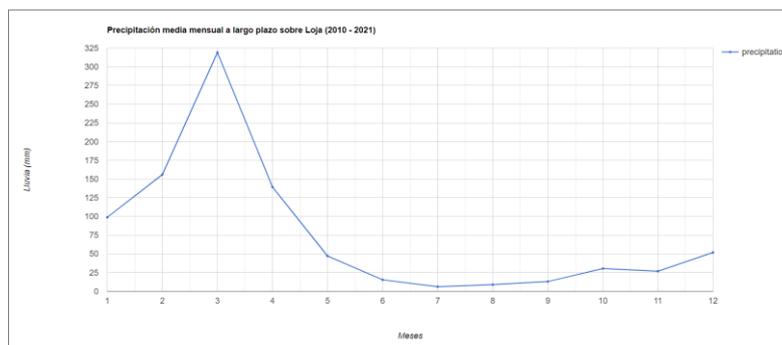
Ilustración 2. Mapa de Uso y Cobertura de la Tierra provincia de Loja



Fuente: (MAE, 2018).
Elaborado por: autor (2021).

Uno de los fenómenos planetarios que influencia las condiciones climáticas en la provincia de Loja es el evento atmosférico conocido como la oscilación del sur (ENSO por sus siglas en inglés) y (Samaniego et al., 2015). En lo que concierne a la provincia de Loja estos eventos climatológicos ocasionan que se marquen de forma definida la espacio temporalidad de las lluvias, siendo los meses de enero a abril en los cuales se alcanzan los máximos registros y una época notablemente seca entre los meses de junio a noviembre (Ilustración 3) de acuerdo a la disponibilidad de información proporcionada por el producto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data) (Funk et al., 2015); estas épocas son menos variables en zonas donde la topografía no es cambiante, al contrario de lo que sucede al acercarse a la cordillera en donde los eventos son variables con cada estacionalidad, dado que la cordillera disipa el fenómeno (Samaniego et al., 2015). Por otro lado, es necesario marcar que La Niña produce el efecto contrario registrando épocas extremadamente secas en las zonas más cercanas al océano.

Ilustración 3. Media mensual de lluvias a largo plazo (2010 – 2021)



Fuente: (Funk et al., 2015)
Elaborado por: autor (2021).

Datos y método.

Para el presente trabajo de investigación se ha delimitado temporalmente a la disposición de información en el periodo de tiempo que comprende desde el 2015 al 2020, además de la utilización de imágenes satelitales pertenecientes a la Agencia Espacial Europea (ESA) a través del programa COPERNICUS. Para la presente investigación se ha implementado una metodología basada en las recomendaciones propuestas por UN SPIDER en la cual se utiliza información de Sentinel 2 L1C (ESA, 2021)(UN-SPIDER, 2019b)²(Bar et al., 2020), el producto FireCCI51 denominado pixel de área quemada (Chuvieco et al., 2018)(Lizundia-Loiola et al., 2020), el producto MCD64A1 denominado área quemada mensual global (EROS, 2021), máscaras para nubes (Tabla 1), sombras de nubes y cuerpos de agua, cálculo del índice espectral Differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) por sus siglas en inglés, dos algoritmos con enfoque de aprendizaje automático relacionados a la detección de nubes, sombras y cuerpos de agua utilizando la banda QA del producto Sentinel 2 L1C y la identificación de áreas de incendio utilizando 12 bandas de Sentinel 2 L1C incluidas bandas de NBR (Normalized Burn Ratio) y NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). En este contexto los datos utilizados corresponden a las colecciones de imágenes satelitales Sentinel L1C desde 2017 a 2020 y los productos mencionados relacionados con identificación de áreas quemadas en el mismo periodo de tiempo.

Tabla 1. Características de los productos utilizados

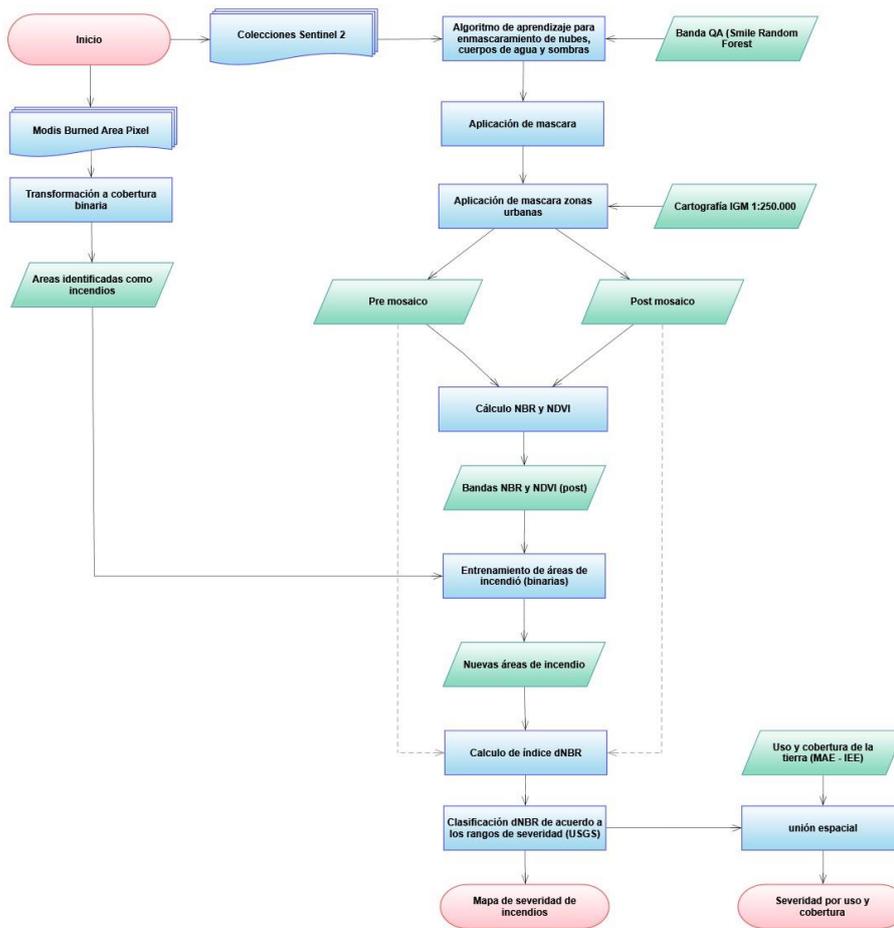
Características / Producto	Sentinel 2 L1C	FireCCI51	MCD64A1
Resolución espacial	10 metros	250 metros	500 metros
Resolución temporal	5 días	Acumulado mensual	Acumulado mensual
Disponibilidad de información	junio 2015 a enero 2021	enero 2001 a diciembre de 2019	noviembre 2000 a enero 2021

Fuente: (ESA, 2021) (UN-SPIDER, 2019b) (Chuvieco et al., 2018) (Lizundia-Loiola et al., 2020)

Elaborado por: autor (2021).

² Google Earth Engine (GEE) Es una plataforma que permite el uso y acceso a datos científicos e información geoespacial a escala planetaria y su procesamiento haciendo uso los recursos computacionales de Google; además combina un catálogo de información de varios petabytes, lo cual permite reducir considerablemente tiempos de procesamiento y recursos económicos para el mapeo, identificación de tendencias, cuantificación de diferencias de los fenómenos que ocurren sobre y en la superficie terrestre. (Gorelick et al., 2017)

Ilustración 4. Flujoograma metodológico



Elaborado por: autor (2021).

Enmascaramiento de nubes, sombras y cuerpos de agua.

Para el enmascaramiento de las imágenes correspondientes a Sentinel 2 L1C, se tiene como recurso la banda denominada QA60 (ESA, 2015), sin embargo Nguyen (2020) menciona que el desempeño de esta banda al usarse para enmascarar nubes no es el más óptimo sobre todo cuando se tienen condiciones atmosféricas críticas, sin embargo para esto propone un mejoramiento al algoritmo de enmascaramiento utilizando un enfoque de machine learning (Nguyen et al., 2020). Este algoritmo ha sido adaptado a la presente investigación para obtener mejores resultados al enmascarar nubes, sombras y cuerpos de agua, haciendo uso de una clasificación supervisada tomando como base la banda QA60 y realizando un muestreo estratificado simple para poder identificar en las escenas Sentinel 2 L1C, pixeles con las mismas características espectrales, dado que una de las limitaciones acotadas por UN SPIDER (2019b) en cuanto al uso del índice dNBR, es que puede detectar severidad de acuerdo a los umbrales establecidos en zonas donde existe presencia de nubes o sombras. En este contexto se obtienen composiciones libres de nubes dadas las características en cada espacio de tiempo en los casos

en los cuales no existe la suficiente información se hace un corte a la composición a fin de que no se generen datos erróneos.

Mosaicos y composiciones de imágenes pre y post incendio.

Se tiene un promedio de 20 y 21 imágenes Sentinel 2 L1C sobre la provincia de Loja (considerando un filtro de nubes de al menos 60%), agrupadas en una *colección* (pre y post), y a su vez temporalmente agrupadas cada dos meses (Barboza Castillo et al., 2020) en el rango de 2017 a 2020; en este contexto para la correcta identificación de los cambios sobre la superficie de la tierra y de la aplicación del índice dNBR es necesario reducir la dimensionalidad de la colección y generar un compuesto en donde se consideren estadísticos de cada una de las imágenes; La mediana es uno de los estadísticos más atractivos ante la presencia de observaciones extremas (Anaya et al., 2018), por lo cual ha sido seleccionado para la conformación de los *composite* pre y post mensuales que se consideran en la presente investigación.

Índices espectrales para mapeo de áreas quemadas.

El presente estudio hace uso de dos de los índices más utilizados para la identificación de áreas quemadas (Bar et al., 2020)(Barboza Castillo et al., 2020) (Tabla), los mismos que hacen uso de las siguientes bandas espectrales para detectar cambios en la cobertura vegetal de las áreas en observación, Rojo Visible (RED), Infrarrojo Cercano (NIR), Infrarrojo de Onda corta 1 (SWIR1) e Infrarrojo de Onda Corta 2 (SWIR2), cada uno denominado por sus siglas en inglés. La longitud de onda más sensitiva a la vegetación en las cicatrices de quema es SWIR (Bar et al., 2020: 4) la misma que comprende entre 1 a 3 μm (Fornacca et al., 2018: 8), mientras que RED y NIR son reconocidas como indicadores del verdor de la vegetación ya que son sensibles al contenido de clorofila y otros pigmentos que absorben la radiación solar en el rango rojo del espectro electromagnético (Barboza Castillo et al., 2020:7) e indirectamente representan la salud de la vegetación. La relación normalizada entre SWIR y NIR es usada para identificar vegetación calcinada mediante el uso del índice Normalized Burn Ratio (NBR) y en este mismo sentido la diferencia normalizada entre NIR y RED permite identificar zonas en donde la vegetación ha perdido su verdor (Bar et al., 2020: 4) utilizando el índice Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)(2).

Del cálculo del índice NBR se desprende el cálculo del diferencial NBR (1), el mismo que de acuerdo con Key & Benson (2006), se reduce en el cálculo de la severidad de incendio

que puede ser definido como la magnitud del daño medio ambiental ocasionado por un incendio expresado en costo en términos ambientales o socio económicos; que aplicado a la presente investigación obtiene datos de diferencia de NBR aplicados en las zonas definidas como incendios de acuerdo a los umbrales definidos por UN-SPIDER (2019a) (Key & Benson, 2006: 38). Además de aportar información adicional al entrenamiento propuesto a fin de que los píxeles caracterizados como incendio tengan mayor porcentaje de información referente a las características de un incendio.

$$dNBR = pre\ NBR - post\ NBR = pre\left(\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}\right) - post\left(\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}\right) \quad (1)$$

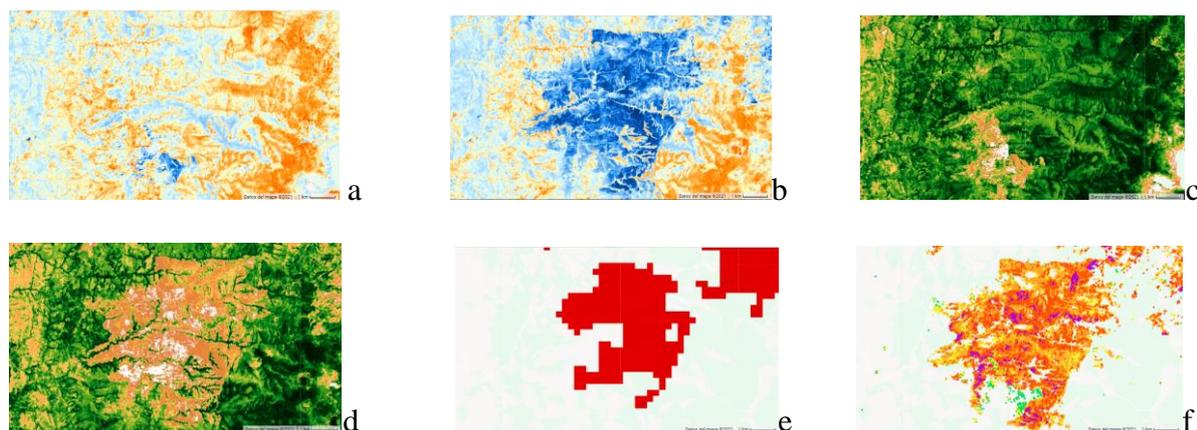
$$NDVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED}\right) \quad (2)$$

En este contexto la severidad de un incendio se puede definir como los efectos a nivel del terreno que ha tenido el fuego sobre determinada área a nivel del paisaje presente previo. Es necesario también mencionar que esta definición puede variar en función de los datos que se estén interpretando dependiendo de la escala de trabajo (Key & Benson, 2006: 5). Sus principales usos son el aporte de información para desarrollar planes de rehabilitación y restauración de emergencia después de un incendio, también es útil para estimar la probabilidad de impactos futuro que pueden ser causados por inundaciones, deslizamientos de tierra y erosión del suelo (UN-SPIDER, 2019a).

SMILE Random Forest (SRF).

Google Earth Engine, provee de un algoritmo que se denomina SMILE Random Forest, el mismo que ha sido utilizado para el entrenamiento de áreas de incendio y no incendio, generando una cobertura binaria de datos que utiliza los productos FireCCI51 y MCD64A1, como áreas principales de entrenamiento, sobre las composiciones Sentinel 2 L1C de 10 bandas más las bandas agregadas NDVI y NBR a fin de tener mejores resultados en los árboles de decisión que se emplean en el algoritmo SRF, para de esta manera obtener predicciones fiables (Bar et al., 2020: 4) al momento de identificar píxeles que se consideren como quemados (Orellana, 2018). (Ilustración 5).

Ilustración 5. Representación gráfica de índices y áreas de incendio.



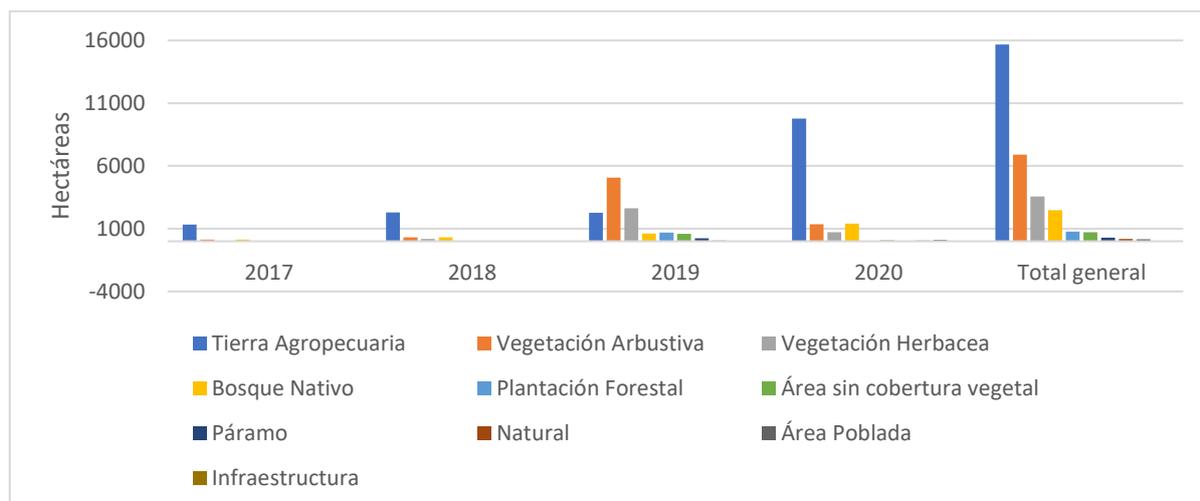
Fecha agosto septiembre 2019, (a) Pre fuego falso color NBR, (b) Post fuego falso color NBR, (c) pre fuego falso color NDVI, (d) post fuego falso color NDVI, (e) áreas de incendio del producto FireCCI51, (f) producto final áreas de incendio entrenadas y dNBR.

Resultados.

De las áreas entrenadas para identificación de cicatrices de incendios se tiene un total de 30.719,41 hectáreas que por sus características espectrales son consideradas como áreas de incendios; los meses en los cuales los patrones espaciales indican que existen más incendios son de julio a enero los mismos que coinciden con la época seca de la provincia de Loja (Samaniego et al., 2015, Maldonado et al., 2005) y la mayor disponibilidad de biomasa (Parson et al., 2010) luego de una intensa temporada lluviosa. De los años analizados el 2020 es el año con mayor cantidad de área de incendio con 13.584,25 hectáreas identificadas, seguido de 2019 con 12.213,58 para el 2018 3.223,03 y en 2017 con 1.698,54.

Del análisis realizado se obtiene que la exactitud con la que fueron generadas las áreas correspondientes a incendios de acuerdo al modelo de clasificación basado en aprendizaje automático fue de 0,9980 en relación a los resultados de las matrices de confusión, lo que quiere decir que se tiene un nivel de confianza óptimo para aceptar como válidas estas áreas. Es necesario mencionar que las áreas consideradas como incendios no fueron generadas para todas las combinaciones de meses de 2017 a 2020, los meses de febrero, marzo, abril, mayo y junio, no registran áreas quemadas según los productos FireCCI51 y MCD64A1, y esto coincide con la distribución media de lluvias en la provincia de Loja (Ilustración 2), meses en los cuales las precipitaciones favorecen las condiciones ambientales y climatológicas para que no se generen incendios. Se obtuvieron 19 archivos en formato raster en los cuales se encuentra identificada la severidad de incendio dentro de las áreas de incendio entrenadas.

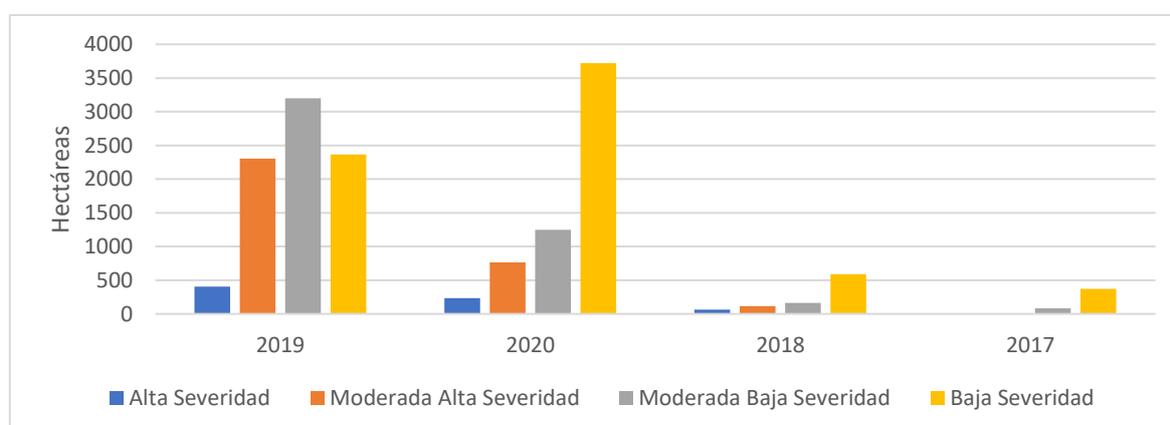
Ilustración 6. Cobertura y uso de la tierra afectada



Fuente: autor (2021).
Elaborado por: autor (2021).

En cuanto al uso y cobertura de la tierra, se utilizó el producto CUT 2018 (MAE, 2018), el mismo que de acuerdo a la información del Ministerio de Agua y Ambiente corresponde a las clases definidas por el grupo de expertos sobre cambio climático en coordinación con el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) y el extinto Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE); en este contexto la cobertura y uso del suelo más afectado por incendios en la provincia de Loja en el periodo analizado es Tierra Agropecuaria que corresponde a 15.675,80 hectáreas, seguido de vegetación arbustiva con 6.896,17 hectáreas, en tercer lugar vegetación herbácea con 3561.47 hectáreas, en cuarto lugar bosque nativo con 5.471,66 hectáreas y en quinto lugar plantaciones forestales con 759,06 hectáreas afectadas, siendo el año 2020 el más afectado (Ilustración 6).

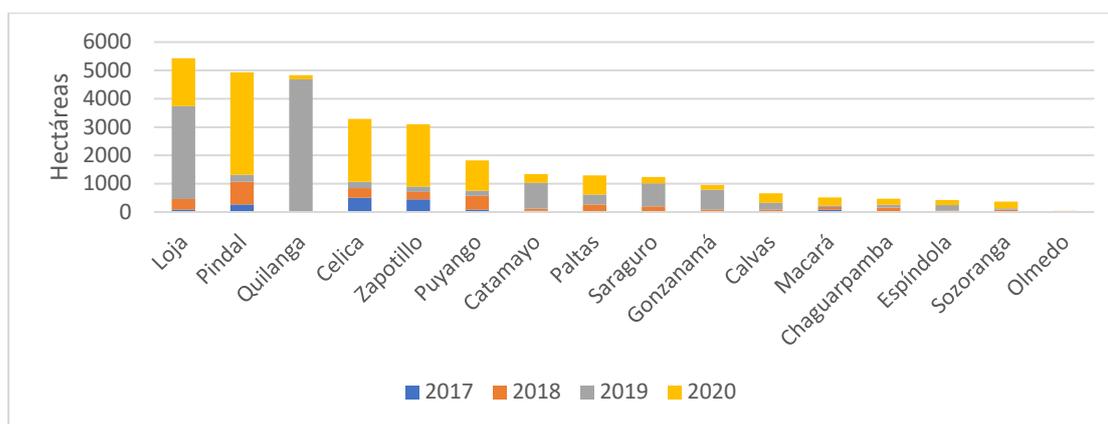
Ilustración 7. Años por severidad de incendios.



Fuente: autor (2021).
Elaborado por: autor (2021).

En cuanto a la distribución político administrativa los cantones más afectados por incendios entre 2017 y 2020 han sido en primer lugar el cantón Loja con 5.430,31 hectáreas afectadas, seguido del cantón Pindal con 4.936,57 hectáreas afectadas, en tercer lugar, el cantón Quilanga con 4.830,64 hectáreas, en cuarto lugar, el cantón Celica con 3.287,88 hectáreas, y para el quinto lugar el cantón Zapotillo con 3.099,21 hectáreas (Ilustración 8).

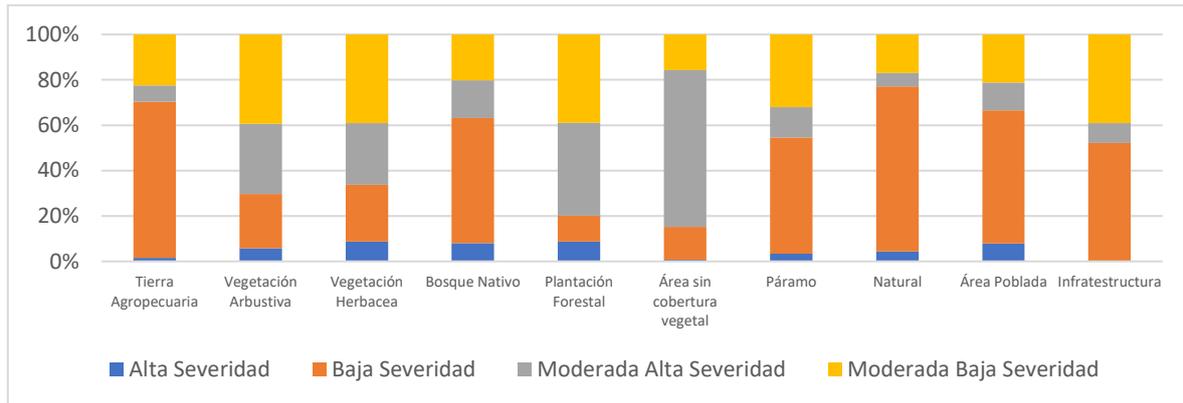
Ilustración 8. Área de afectación por cantones de la provincia de Loja.



Fuente: autor (2021).
Elaborado por: autor (2021).

En cuanto a la severidad de los incendios de acuerdo a la metodología propuesta que considera umbrales corroborados en campo de UN-SPIDER (2019a) y Parson et al., (2010: 9), se tiene que las coberturas y usos del suelo con mayor grado de severidad de incendio afectadas son (Ilustración 9): en primer lugar Tierra agropecuaria con 6.713,16 hectáreas (101,08 hectáreas en alta severidad, 485,22 hectáreas en moderada alta severidad, 1.507,57 hectáreas en moderada baja severidad y 4.619,28 hectáreas en baja severidad), en segundo lugar Vegetación Arbustiva con 4.328,02 hectáreas (252,82 hectáreas en alta severidad, 1.341,41 hectáreas en moderada alta severidad, 1.703,77 hectáreas en moderada baja severidad y 1.030,01 hectáreas en baja severidad), en tercer lugar Vegetación herbácea con 2.440,95 hectáreas (212,14 hectáreas en alta severidad, 663,04 hectáreas en moderada alta severidad, 953,83 hectáreas en moderada baja severidad y 611,92 hectáreas en baja severidad), en cuarto lugar Bosque Nativo con 965,50 hectáreas (78,01 hectáreas en alta severidad, 160,21 hectáreas en moderada alta severidad, 194,59 hectáreas en moderada baja severidad y 532,67 hectáreas en baja severidad) y en quinto lugar Plantación Forestal con 502,36 hectáreas (44,06 hectáreas en alta severidad, 160,21 hectáreas en moderada alta severidad, 195,73 hectáreas en moderada baja severidad y 57,11 hectáreas en baja severidad). El año 2019 fue el año que en cuanto a severidad de incendios fue mayormente afectado. (Ilustración 9).

Ilustración 9. Severidad de incendio por cobertura y uso del suelo.

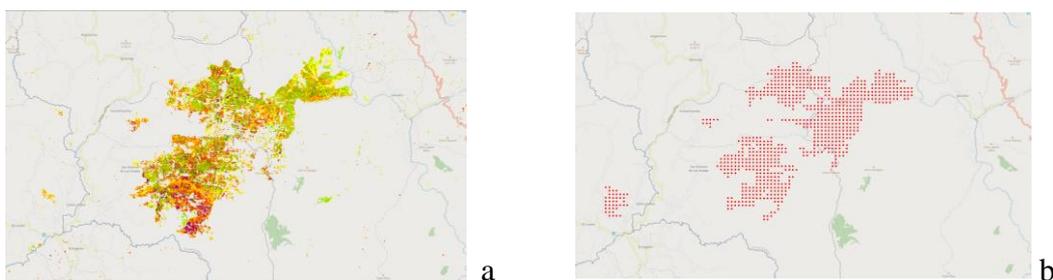


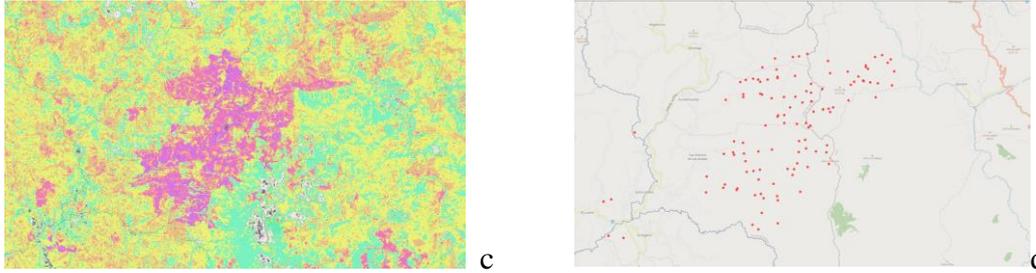
Fuente: autor (2021).
Elaborado por: autor (2021).

Se realizó una comparación visual con los datos propuestos por Torres (2021), en donde utiliza imágenes satelitales del sensor Landsat 8, el cual tiene una resolución espacial de 30 metros y temporal de 15 días, la revisión fue realizada para la época comprendida entre los meses de agosto y septiembre de 2019, en los cuales se produce uno de los incendios más grandes en la provincia de Loja, específicamente en el cantón Quilanga; de esta revisión se puede destacar que las áreas consideradas de incendio son similares espacialmente sin embargo existen diferencias en cuanto a los datos de severidad.

También se realizó una comparación (Ilustración 10) con los datos proporcionados por Ministerio de Ambiente y Agua (MAAE), estos datos corresponden a la colección histórica de incendios en Ecuador de 2010 a 2019, de acuerdo a la información proporcionada por esta cartera de estado en mención, se han utilizado datos MODIS para la identificación de superficies incendiadas superiores a 6,25 hectáreas. Para la comparación realizada se tomó como referencia el año 2019 en el cual a través de las coberturas proporcionadas por el MAAE se tiene que existen 1.819 puntos con una confianza superior al 50% que representan superficies de incendio, ante esto realizado un procedimiento espacial de intersección con las áreas entrenadas para identificación de áreas de incendio planteadas en la presente investigación se tiene que 1.458 son coincidentes lo que representa un 80.15% de coincidencia

Ilustración 10. Comparación de áreas entrenadas y alertas FIRMS





Seco Quilanga, datos correspondientes a 2019. (a) áreas entrenadas, (b) datos proporcionados por MAAE, (c) datos de severidad (Torres, 2021), (d) producto FIRMS (NASA, 2020)

Fuente: autor (2021).

Elaborado por: autor (2021).

Discusión y conclusiones.

GEE permite un procesamiento de datos altamente eficiente dado que permite el acceso a volúmenes de datos que manualmente tomarían meses en ser procesados sin los recursos computacionales adecuados. De la presente investigación se estima que se han utilizados aproximado 96 Gb de datos de imágenes satelitales Sentinel L1C, que para su procesamiento tomarían aproximadamente 6 meses (Torres, 2021: 84) en obtener resultados similares con equipos in situ. La sencilla manipulación de los parámetros establecidos y los tiempos en los cuales se obtienen resultados en GEE facilita la prueba de los mismos. Sin embargo, la disponibilidad de datos para la provincia de Loja y el Ecuador en algunos casos es escasa hablando en términos de que el producto usado son imágenes Sentinel L1C, el mismo que las características de sus niveles digitales tiene la información Top of Atmospher (TOA), en este contexto lo más recomendable sería utilizar las colecciones asociadas a Sentinel 2 de nivel 2 que entre sus principales características ya cuenta con una corrección atmosférica.(ESA, 2021).

La aplicación de SFR genera áreas de incendio considerando las características espectrales de cada uno de los pixeles sumadas dos bandas una NDVI y una NBR, para obtener un mejor resultado al momento de la decisión para definir si es o no considerada como área de incendio, el beneficio para la estimación del impacto y magnitud de incendios pasados y en la actualidad es alto en comparación a los recursos computacionales ahorrados y por qué no a los económicos, sin embargo es necesario mencionar que las áreas usadas como entrenadores para SRF son derivadas de los productos FireCCI51 y el producto MCD64A1, siendo estos adquisiciones de plataformas satelitales cuentan con un alto nivel de confianza sin embargo la resolución espacial de cada uno (250m y 500m respectivamente), mantienen cierto nivel de incertidumbre al momento del entrenamiento, por eso es importante que este tipo de investigación cuente con el apoyo de entes técnicos oficiales como el Ministerio de Ambiente y Agua, además de que se institucionalice en el país institutos de investigación de incendios que

muchos de los países vecinos lo tienen para que los productos sean mucho más fiables y nazcan a partir de datos levantados en campo como en este caso las áreas que fueron afectadas en cada uno de los incendios durante el periodo de tiempo analizado.

En cuanto a la severidad de incendios esta ha sido calculada de acuerdo a las recomendaciones hechas por UN-SPIDER, sin embargo Parson et al., (2010: 31) menciona que para una correcta interpretación de datos de severidad relacionada a incendios es necesario la presencia de especialistas en los lugares en los cuales se tienen identificadas las cicatrices de incendios, dado los efectos inmediatos sobre los componentes biofísicos que han sido afectados (Key & Benson, 2006: 28), sino también sobre los componentes edáficos del lugar en análisis.

Es necesario precisar que el algoritmo de enmascaramiento de nubes mejoró significativamente los resultados obtenidos sin embargo dadas las características de la banda QA60, muchos cirrus (tipo de nube) no fueron caracterizados, al igual que las columnas de humo de incendios activos son reconocidas como nubes y posteriormente enmascaradas. Así mismo es necesario considerar que la presencia de nubes, sombras de nubes y cuerpos de agua en las composiciones pre y post incendio pueden generar resultados falsos de severidad de incendios dadas las características espectrales de estos.

Los umbrales utilizados para la definición de severidad incendios aplicados en la presente investigación obedecen a características de paisaje y ecosistemas validados por Parson et al., (2010) que para el uso en la presente zona de estudio podrían generar cierta incertidumbre, por lo que su uso debe ser monitoreado, además de requerir una validación de campo.

La aplicación y uso del presente trabajo de investigación puede constituirse en una herramienta de gran utilidad para el monitoreo nacional de incendios, su evaluación y la gestión de riesgos de incendios, dado que la información al momento es de libre acceso, además de reducir los costos relacionados a la adquisición de imágenes satelitales, lo cual permitiría a las entidades gubernamentales facilitar acciones y enfocar recursos a las áreas que presenten mayor susceptibilidad garantizando lo dispuesto en la constitución ecuatoriana, a más de alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 (UN, 2019) y la agendas dispuestas por el Marco de Sendai (UNDRR, 2015). También destaca que el código generado es ya un aporte, dado que su uso y aplicación puede de manera inmediata convertirse en una herramienta que permita análisis y evaluación de incendios, sobre todo en instituciones donde su capacidad técnica y operativa sea reducida.

Se podría plantear a las carteras de estado que se abra una línea de investigación que pueda aportar con datos de campo inmediatamente después de que se produzcan incendios para así definir umbrales que se ajusten a Ecuador y poder tener mejores resultados que aporten a la gestión de riesgos de desastres, resaltando que los daños y pérdidas que resultantes de los incendios que a través de los años van aumentando en la provincia de Loja y la han convertido en la provincia con mayor afectación por incendios a nivel nacional.

Fuentes bibliográficas

Anaya, J. A., Sione, W. F., & Rodríguez-Montellano, A. M. (2018). Identificación de áreas quemadas mediante el análisis de series de tiempo en el ámbito de computación en la nube. *Revista de Teledetección*, 51, 61–73.

ARSET , (Applied Remote Sensing Training Program). (2021). *Observaciones de Satélites y Herramientas para el Riesgo, Detección y Análisis de Incendios | NASA Applied Science*. <https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/spanish/arset-observaciones-de-satelites-y-herramientas-para-el-riesgo>

Bar, S., Parida, B. R., & Pandey, A. C. (2020). Landsat-8 and Sentinel-2 based Forest fire burn area mapping using machine learning algorithms on GEE cloud platform over Uttarakhand, Western Himalaya. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100324.

Barboza Castillo, E., Turpo Cayo, E. Y., de Almeida, C. M., Salas López, R., Rojas Briceño, N. B., Silva López, J. O., Barrera Gurbillón, M. Á., Oliva, M., & Espinoza-Villar, R. (2020). Monitoring Wildfires in the Northeastern Peruvian Amazon Using Landsat-8 and Sentinel-2 Imagery in the GEE Platform. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10), 564.

Chuvieco, E., Pettinari, M. L., Lizundia-Loiola, J., Roteta, E., Padilla Parellada, M., Oom, D., Lewis, P., Storm, T., Kaiser, J., & Mouillot, F. (2018). Generation of a global burned area product from satellite data: the ESA Fire_cci project. *Parte: Http://Hdl. Handle. Net/10316.2/44517*.

Consejo Nacional de Limites. (2020).

El Comercio, & SNGRE, (Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias). (2020a). *Ecuador registra 9 063 incendios forestales entre 2015 y 2019*. <https://www.elcomercio.com/tendencias/incendios-forestales-fuego-casitagua-pichincha.html>

El Comercio, & SNGRE, (Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias). (2020b). *Ecuador tiene inviernos anómalos desde 1991 ¿Qué fenómeno incide en la Sierra?* <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador-inviernos-anomalos-fenomeno-sierra.html>

EROS, (USGS Earth Resources Observation and Science Center). (2021). *MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500 m SIN Grid*.

ESA, (European Space Agency). (2015). *Level-1C Cloud Masks - Sentinel-2 MSI Technical Guide - Sentinel Online - Sentinel*. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/cloud-masks>

ESA, (European Space Agency). (2021). *Copernicus Sentinel-2*. <https://www.esa.int/>

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), 1196.

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., & Hoell, A. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 1–21.

GFW, (Global Forest Watch). (2020). *Tendencias de alertas de incendios*. <https://www.globalforestwatch.org/>

Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Loja. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Loja 2015 - 2025*. <https://multimedia.planificacion.gob.ec/PDOT/descargas.html>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.

IG, (Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mariano Gulich”. (2021). *Gestión de incendios forestales mediante el uso de la plataforma Google Earth Engine - YouTube*. https://www.youtube.com/watch?v=xvP6MzS1E3I&ab_channel=InstitutoGulich

Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape assessment (LA). In: *Lutes, Duncan C.; Keane, Robert E.; Caratti, John F.; Key, Carl H.; Benson, Nathan C.; Sutherland, Steve; Gangi,*

Larry J. 2006. *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: US Department Of , 164.*

Lizundia-Loiola, J., Otón, G., Ramo, R., & Chuvieco, E. (2020). A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111493.

MAE, (Ministerio del Ambiente). (2018). *Cobertura y Uso de la Tierra (CUT 2018)*.

Maldonado, N., Vivar, F., & Velez, J. (2005). Escenario Natural de la cultura de Loja. *Loja (Ec.)*, 96–105.

NASA. (2020). *Fire Information for Resource Management System (FIRMS) MODIS*. <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms>

Nguyen, M. D. (2020). *Improve Sentinel 2 satellite images cloud detection with machine learning in Google Earth Engine | by Minh Duc nguyen | EE Laboratory | Medium*. <https://medium.com/eelab/improve-cloud-detection-and-removal-with-machine-learning-in-google-earth-engine-ac0a2f759022>

Nguyen, M. D., Baez-Villanueva, O. M., Bui, D. D., Nguyen, P. T., & Ribbe, L. (2020). Harmonization of Landsat and Sentinel 2 for Crop Monitoring in Drought Prone Areas: Case Studies of Ninh Thuan (Vietnam) and Bekaa (Lebanon). *Remote Sensing*, 12(2), 281.

Orellana, J. (2018). *Arboles de decision y Random Forest*. <https://bookdown.org/content/224878ff-81d8-4034-bd84-6fc9ff820cfc/>

Parson, A., Robichaud, P. R., Lewis, S. A., Napper, C., & Clark, J. T. (2010). Field guide for mapping post-fire soil burn severity. *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-243. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 49 P., 243.*

Pausas, J. G. (2020). *Incendios forestales*. LOS LIBROS DE LA CATARATA.

Rollenbeck, R., Bendix, J., & Fabian, P. (2011). Spatial and temporal dynamics of atmospheric water inputs in tropical mountain forests of South Ecuador. *Hydrological Processes*, 25(3), 344–352.

Samaniego-Rojas, N., Eguiguren, P., Maita, J., & Aguirre, N. (2015). Clima de la región Sur el Ecuador: historia y tendencias. N. Aguirre, T. Ojeda, P. Eguiguren, Z. Aguiire.(Eds.), *Cambio Climático y Biodiversidad: Estudio de Caso de Los Páramos Del Parque Nacional Podocarpus*, 43–62.

Torres, R. (2021). *Aplicación de índices espectrales para detección de cicatrices de incendios usando Google Earth Engine Oncloud – caso de estudio Ecuador*. Universidad de Salzburg.

UN-SPIDER, (Space based information for disaster management and emergency response). (2019a). *In Detail: Burn Severity Mapping | Knowledge Portal*. <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail>

UN-SPIDER, (Space based information for disaster management and emergency response). (2019b). *Step by Step: Burn Severity Mapping | Knowledge Portal*. <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/step-by-step>

UN, (Naciones Unidas). (2019). *Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

UNDRR, (UN Office for Disaster Risk Reduction). (2015). *Marco de Sendai*.