



**UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**ANÁLISIS DE LA SEVERIDAD DE INCENDIOS
FORESTALES EN LA RESERVA ECOLÓGICA LOS
ILINIZAS
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO**

Trabajo de titulación presentado como requisito para la
obtención del título de
INGENIERO AMBIENTAL

**AUTOR
ZAPPA ALVARADO CARLOS ALBERTO**

**TUTOR
ZAMBRANO ZAVALA LEILA**

GUAYAQUIL – ECUADOR

2022



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **ZAMBRANO ZAVÁLA LEILA ELIZABETH**, docente de la Universidad Agraria del Ecuador, en mi calidad de Tutor, certifico que el presente trabajo de titulación: **ANÁLISIS DE LA SEVERIDAD DE INCENDIOS FORESTALES EN LA RESERVA ECOLÓGICA LOS ILINIZAS**, realizado por el estudiante **ZAPPA ALVARADO CARLOS ALBERTO**; con cédula de identidad N° **093147853-1** de la carrera **INGENIERÍA AMBIENTAL**, Unidad Académica **Guayaquil**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución; y cumple con los requisitos técnicos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador; por lo tanto se aprueba la presentación del mismo.

Atentamente,

OC. LEILA ELIZABETH ZAMBRANO ZAVALA
DIRECTOR DE TESIS

Guayaquil, 13 de abril del 2022



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Los abajo firmantes, docentes designados por el H. Consejo Directivo como miembros del Tribunal de Sustentación, aprobamos la defensa del trabajo de titulación: “**ANÁLISIS DE LA SEVERIDAD DE INCENDIOS FORESTALES EN LA RESERVA ECOLÓGICA LOS ILINIZAS**”, realizado por el estudiante **ZAPPA ALVARADO CARLOS ALBERTO**, el mismo que cumple con los requisitos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador.

Atentamente,

Blgo. Raúl Arizaga Gamboa M.Sc.
PRESIDENTE

Ing. Luis Morocho Rosero, M.Sc.
EXAMINADOR PRINCIPAL

Oc. Leila Zambrano Zavala, M.Sc.
EXAMINADOR PRINCIPAL

Guayaquil, 13 de abril del 2022

Dedicatoria

Esta tesis es dedicada a mis abuelos, Isabel Vera y Alberto Alvarado. No los olvido, los llevo a todos lados conmigo como un recuerdo permanente de la felicidad que me dieron. Sé que desde donde se encuentran están orgullosos de mí.

Agradecimiento

A mis padres, Martha Alvarado y Carlos Zappa, por su amor, sacrificio y consejo. Espero haberles cumplido.

A mi segunda madre, Ivon Alvarado, por creer en mí y ser un pilar fundamental en mi vida.

A mis hermanos, Cristopher, Mallerly y Odalys, me impulsan a seguir adelante. Mis logros también son sus logros.

A mi tío, Johnny Alvarado, por darme todo el apoyo necesario para que esta meta se cumpla

A mi tutora Oc. Leila Zambrano, quien con sus conocimientos me guió durante el proceso de este proyecto

A mi mascota, Yoko, por alegrarme los días y acompañar mi silencio.

Autorización de Autoría Intelectual

Yo, ZAPPA ALVARADO CARLOS ALBERTO, en calidad de autor(a) del proyecto realizado, sobre “ANÁLISIS DE LA SEVERIDAD DE INCENDIOS FORESTALES EN LA RESERVA ECOLÓGICA LOS ILINIZAS” para optar el título de INGENIERO AMBIENTAL, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o parte de los que contienen esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor(a) me correspondan, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8; 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Guayaquil, abril 13 y 2022

ZAPPA ALVARADO CARLOS ALBERTO

C.I. 093147853-1

Índice general

PORTADA	1
APROBACIÓN DEL TUTOR	2
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	3
Dedicatoria	4
Agradecimiento	5
Autorización de Autoría Intelectual	6
Índice general.....	7
Índice de tablas	11
Índice de figuras	14
Resumen.....	16
Abstract	17
1. Introducción	19
1.1 Antecedentes del problema.....	19
1.2 Planteamiento y formulación del problema	20
1.3 Justificación de la investigación.....	22
1.4 Delimitación de la investigación	24
1.5 Objetivo general	24
1.6 Objetivos específicos	24
2. Marco teórico	26
2.1 Estado del arte	26
2.2 Bases teóricas.....	28
2.2.1 Áreas protegidas.....	28
2.2.1.2 <i>Reserva ecológica</i>	31
2.2.1.3 <i>Reserva Ecológica Los Ilinizas</i>	32

2.2.1.4 Programas y Subprogramas para el Manejo de la Reserva Ecológica Los Ilinizas.....	34
2.2.2 Fuego	35
2.2.3 Quema.....	36
2.2.4 Intensidad del fuego	36
2.2.5 Severidad del incendio	36
2.2.6 Severidad del Fuego	37
2.2.7 Incendios forestales	38
2.2.8 Origen de los incendios forestales	38
2.2.10 Teledetección	39
2.2.11 Sistema de información de geográfica	39
2.2.12 Sentinel-2.....	39
2.2.13 Relación de Área Quemada Normalizada (NBR).....	39
2.2.14 Relación de Quema Normalizada Diferenciada (dNBR).....	40
2.2.14.1 Limitantes	41
2.2.15 Clasificación supervisada	41
2.2.16 Uso de la tierra	41
2.2.17 Cobertura vegetal.....	42
2.3 Marco legal	43
2.3.1 Constitución de la República del Ecuador (2018).....	43
2.3.2 Convención para la protección de la flora, de la fauna y de las bellezas escénicas naturales de los países de América (1940).....	45
2.3.3 Convenio sobre la Diversidad Biológica (1995).....	45
2.3.4 Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre (2004)	46

2.3.5 Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales (2018)...	47
2.3.6 Código Orgánico del Ambiente (2017).....	48
2.3.7 Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (2019)	49
3. Materiales y métodos.....	50
3.1 Enfoque de la investigación	50
3.1.1 Tipo de investigación	50
3.1.2 Diseño de investigación	50
3.2 Metodología.....	51
3.2.1 Variables	51
3.2.2 Tratamientos	51
3.2.3 Diseño experimental	51
3.2.4 Recolección de datos	51
3.2.5 Análisis estadístico.....	54
4. Resultados.....	56
4.1 Delimitar las áreas afectadas por incendios de la Reserva Ecológica “Los Ilinizas” utilizando imágenes satelitales Sentinel-2 en el período 2016-2020.	56
4.2 Estimar la severidad de los incendios forestales mediante el cálculo de los índices NBR y dNBR y la pérdida de cobertura vegetal utilizando sistemas de información geográfica, QGIS.....	59
4.3 Identificar espacialmente las áreas susceptibles a la ocurrencia de incendios forestales empleando mapas temáticos.	69
5. Discusión	72
6. Conclusiones.....	74
7. Recomendaciones.....	75

8. Bibliografía	76
9. Anexos	92

Índice de tablas

Tabla 1. Áreas protegidas por categoría de manejo.....	30
Tabla 2. Descripción de Formas de Vida de la RELI.....	34
Tabla 3. Programas y subprogramas para el Manejo de la RELI	35
Tabla 4. Niveles de severidad del fuego propuesta por Keeley, 2009	37
Tabla 5. Clasificación utilizada para los rangos de severidad	53
Tabla 6. Niveles de susceptibilidad física a la ocurrencia de incendios forestales	54
Tabla 7. Valor del índice Kappa	55
Tabla 8. Incendios forestales en la RELI.....	56
Tabla 9. Imágenes satelitales del periodo 2016-2020	57
Tabla 10. Superficie afectada por el fuego en la RELI	57
Tabla 11. Superficie en hectáreas por índice de severidad.....	59
Tabla 12. Resultados de la precisión mediante índice Kappa en las clasificaciones de los usos y coberturas de suelo	61
Tabla 13. Usos y coberturas de suelo de acuerdo con la superficie y sus índices de severidad en el área de incendio del año 2016.	62
Tabla 14. Usos y coberturas de suelo de acuerdo con la superficie y sus índices de severidad en el área de incendio del año 2017.	63
Tabla 15. Usos y coberturas de suelo de acuerdo con la superficie y sus índices de severidad en el área de incendio del año 2018.	65
Tabla 16. Usos y coberturas de suelo de acuerdo con la superficie y sus índices de severidad en el área de incendio del año 2019.	66
Tabla 17. Usos y coberturas de suelo de acuerdo con la superficie y sus índices de severidad en el área de incendio del año 2020.	68

Tabla 18. Material cartográfico utilizado.....	69
Tabla 19. Coincidencia de incendios y niveles de susceptibilidad	71
Tabla 20. Superficie por índice de severidad.	97
Tabla 21. Matriz de confusión de la clasificación supervisada del año 2016 en píxeles.	98
Tabla 22. Matriz de confusión de la clasificación supervisada del año 2017 en píxeles.	98
Tabla 23. Matriz de confusión de la clasificación supervisada del año 2018 en píxeles.	99
Tabla 24. Matriz de confusión de la clasificación supervisada del año 2019 en píxeles.	99
Tabla 25. Matriz de confusión de la clasificación supervisada del año 2020 en píxeles.	99
Tabla 26. Total de áreas afectadas por cobertura y año	100
Tabla 27. Pesos asignados a clases de cobertura vegetal, según su grado de influencia	100
Tabla 28. Nivel de susceptibilidad de acuerdo con la superficie que ocupan	101
Tabla 29. Pesos asignados a clases de textura del suelo, en base al análisis del complejo cobertura-suelo.....	101
Tabla 30. Pesos asignados a rangos de precipitación	102
Tabla 31. Pesos asignados a rangos de temperatura	102
Tabla 32. Pesos asignados a rangos de radiación.....	102
Tabla 33. Pesos asignados a rangos del modelo Digital de Elevación / DEM	102
Tabla 34. Pesos asignados a rangos del raster de pendiente (slope)	103

Tabla 35. Nivel de susceptibilidad con relación al área que ocupan en la RELI

..... 103

Índice de figuras

Figura 1. Incendios suscitados en la RELI en el periodo 2016-2020	58
Figura 2. Severidad de los incendios forestales en la RELI periodo 2016-2020	60
Figura 3. Coberturas y usos de la tierra clasificadas y áreas quemadas del año 2016.....	62
Figura 4. Coberturas y usos de la tierra clasificadas y áreas quemadas del año 2017.....	64
Figura 5. Coberturas y usos de la tierra clasificadas y áreas quemadas del año 2018.....	65
Figura 6. Coberturas y usos de la tierra clasificadas y áreas quemadas del año 2019.....	67
Figura 7. Coberturas y usos de la tierra clasificadas y áreas quemadas del año 2020.....	68
Figura 8. Ponderaciones y reclasificaciones del material cartográfico.....	69
Figura 9. Zonas susceptibles a incendios de la Reserva Ecológica Los Ilinizas	70
Figura 10. Superposición de las áreas afectadas y las zonas susceptibles a incendios de la RELI.	71
Figura 11. Mapa de Ubicación de la Reserva Ecológica “Los Ilinizas” Zappa, 2021.....	92
Figura 12. Incendios suscitados en la RELI año 2016.....	92
Figura 13. Incendios suscitados en la RELI año 2017.....	93
Figura 14. Incendios suscitados en la RELI año 2018.....	93
Figura 15. Incendios suscitados en la RELI año 2019.....	94

Figura 16. Incendios suscitados en la RELI año 2020.....	94
Figura 17. Severidad de incendios año 2016	95
Figura 18. Severidad de incendios año 2017	95
Figura 19. Severidad de incendios año 2018	96
Figura 20. Severidad de incendios año 2019	96
Figura 21. Severidad de incendios año 2020	97

Resumen

La presente investigación analiza la severidad de los incendios forestales ocurridos durante el periodo 2016-2020 en la reserva ecológica “Los Ilinizas”, para esto se calcularon con los índices espectrales NBR y dNBR a partir de imágenes satelitales del sensor Sentinel-2 (antes y después del incendio). Con el índice NBR se identificaron y cartografiaron 20505 incendios con un área de 12306,03 ha, lo que representa el 9,17% del área total de la reserva, y con la diferencia del NBR pre y post incendio se obtuvo la severidad de estos determinando que el 75,12% corresponden a un grado de severidad moderada-baja, el 18,38% moderada-alta severidad, mientras que el 6,50% cuenta con una severidad alta. Además, se estimó la pérdida de la cobertura vegetal a través de la clasificación supervisada de las imágenes satelitales y de esta manera obtener los usos y coberturas del suelo, la precisión de las clasificaciones se midió con el índice Kappa y estas obtuvieron un valor promedio de 0.88 lo que significa una fuerza de concordancia “casi perfecta”. Los resultados mostraron que la cobertura vegetal más afectada fue el “Bosque” con 3099,72 ha perdidas. Finalmente, empleando la metodología propuesta por la Subsecretaría de Gestión de la Información y Análisis de Riesgos se obtuvo como resultado que el 86,82 % del área de la reserva cumple con todas las condiciones estáticas para la ocurrencia de incendios.

Palabras clave: Cobertura vegetal, incendios forestales, índice espectral, kappa, severidad de incendios.

Abstract

This research analyzes the severity of forest fires that occurred during the period 2016-2020 in the ecological reserve "Los Ilinizas", for this they were calculated with the NBR and dNBR spectral indexes from satellite images of the Sentinel-2 sensor (before and after the fire). With the NBR index, 20505 fires with an area of 12306.03 ha were identified and mapped, representing 9.17% of the total area of the reserve, and with the difference of the NBR pre and post fire, the severity of these was obtained, determining that 75.12% correspond to a degree of moderate-low severity, 18.38% moderate-high severity, while 6.50% have a high severity. In addition, the loss of vegetation cover was estimated through the supervised classification of satellite images and in this way obtain the uses and land cover, the accuracy of the classifications was measured with the Kappa index and these obtained an average value of 0.88 which means an "almost perfect" matching force. The results showed that the most affected vegetation cover was the "Forest" with 3099.72 ha lost. Finally, using the methodology proposed by the "Subsecretaria de Gestión de la Información y Análisis de Riesgos" it was obtained as a result that 86.82% of the area of the reserve meets all the static conditions for the occurrence of fires.

Keyword: Burn severity, forest fires, kappa, spectral indexes, vegetation cover.



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

APROBACIÓN DEL ABSTRACT

Yo, TULCAN RODRIGUEZ ISABEL GUADALUPE, docente de la Universidad Agraria del Ecuador, en mi calidad de ENGLISH TEACHER, **CERTIFICO** que he procedido a la **REVISIÓN DEL ABSTRACT** del presente trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE LA SEVERIDAD DE INCENDIOS FORESTALES EN LA RESERVA ECOLÓGICA LOS ILINIZAS”, realizado por el estudiante ZAPPA ALVARADO CARLOS ALBERTO; con cédula de identidad N°093147853-1 de la carrera INGENIERÍA AMBIENTAL, Unidad Académica Guayaquil, el mismo que cumple con los requisitos técnicos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador; por lo tanto se aprueba la presentación del mismo.

Atentamente,

Dra. Isabel Guadalupe Tulcán Rodríguez
itulcan@uagraria.edu.ec

Guayaquil, 16 de marzo del 2022

1. Introducción

1.1 Antecedentes del problema

Actualmente, cerca del 3% de la superficie de la tierra se quema anualmente (Rogers, Balch, Goetz, Lehmann, y Turetsky, 2020). Solo en Ecuador los incendios han ocasionado pérdidas superiores a 196.429 ha de bosques y vegetación, como los páramos andinos, en el periodo comprendido entre 2012 y 2020 (MAATE, 2021).

Los regímenes de incendios actuales están muy influenciados por los seres humanos a través de las fuentes de ignición, la supresión y los cambios en la cobertura del suelo y los combustibles. Los regímenes de incendios también están cambiando rápidamente, en función de los cambios en los patrones climáticos, las condiciones meteorológicas extremas, el uso de la tierra, la población humana y la distribución de la vegetación (Rogers et al., 2020).

El fuego es uno de los factores ambientales que más influye en la formación y desarrollo de los ecosistemas forestales. Los incendios forestales pueden perturbar los ecosistemas afectando su composición, su densidad y estructura espacial. Dependiendo del grado y la intensidad del incendio la alteración puede considerarse como leve, moderado o severo. El grado de perturbación de un paisaje está estrechamente relacionado con la intensidad y frecuencia de los incendios forestales (Pastrana, 2017).

Por otra parte, la recuperación de las diversas especies vegetales afectadas por el fuego depende, en parte de la adaptación de éstas al fuego (favorece a las especies pirófitas) y de las condiciones ambientales pots-incendio (fertilidad, oscilaciones térmicas, iluminación). No obstante, cabe señalar que la recurrencia de los incendios en un mismo sitio promueve a las especies que mejor se adaptan

al fuego se conviertan en dominantes y que la vegetación instalada sea cada vez más pirófito (ASEFOGA, 2020).

Asimismo, el fuego modifica el suelo, el cual es de suma importancia para mantener los ciclos biogeoquímicos. Por lo tanto, el funcionamiento de los ecosistemas terrestres puede verse afectado a corto, mediano o largo plazo, y en algunos casos incluso de forma permanente, lo que dependerá de múltiples factores. Todos estos cambios provocados por efecto del fuego sobre la vegetación, la fauna, propiedades del suelo, procesos hidrológicos y geomorfológicos, son derivados del calentamiento que produce el propio incendio, de igual manera, los cambios indirectos sobre el paisaje y los recursos naturales son producto de la pérdida temporal de la cubierta vegetal y por el recubrimiento de las cenizas (Pinilla, 2016).

Dentro de este marco, la teledetección es un instrumento que facilita el seguimiento de los cambios en grandes extensiones geográficas a múltiples escalas. Esto es útil para estudiar la ecología del fuego. Los sensores remotos proporcionan la medición de variables biofísicas, de las condiciones del suelo antes y después de un incendio. Estas mediciones se utilizan para ayudar en el mapeo del riesgo de incendio, detección de incendios activos, evaluar las áreas quemadas, evaluación de la severidad y el monitoreo de recuperación de la cobertura vegetal. Los sistemas de teledetección más utilizados para la investigación de la ecología del fuego son los sensores multiespectrales (Szpakowski y Jensen, 2019).

1.2 Planteamiento y formulación del problema

1.2.1 Planteamiento del problema

De media, entre 2002 y 2016, se estimó que alrededor de 420 millones de hectáreas arden cada año en el planeta. Aunque no existe una cifra consensuada,

se estima que entre el 70% y el 90% de los incendios en la Tierra son provocados por el hombre (Robinne, 2021).

Ahora bien, la Agencia Espacial Europea (ESA, 2021) calcula que los incendios afectan cada año a unos cuatro millones de kilómetros cuadrados y son responsables de la liberación de aerosoles y gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Además, los incendios tienen efectos devastadores en la fauna, donde el fuego no es una amenaza natural. Las tasas de recuperación de los bosques pueden reducirse considerablemente debido a las pérdidas de organismos clave en los ecosistemas forestales, como los invertebrados, los polinizadores y los descomponedores (Purwar y Chauhan, 2020).

Por otra parte, del 100% de los eventos adversos reportados entre el 2010 y 2018 en Ecuador, los incendios forestales fueron los más recurrentes con un 38% frente a otros eventos adversos. Asimismo, entre el 2012 y 2019, los incendios forestales registrados en el Ecuador más del 80% se dan en la Región Sierra, mientras que un 18% en la Costa y menos del 2% en la Amazonía y la Región Insular. Es importante señalar que en dicho periodo de tiempo más de 164.000 hectáreas de bosques naturales y plantaciones se vieron afectadas por incendios forestales. El 99% de ellos son provocados por negligencia humana, quemas agrícolas incontroladas, fogatas o acciones pirómanas (CAF, 2020).

Cabe señalar que, a partir del mes de enero del año 2020, se han registrado 1.962 incendios forestales provocando la pérdida de 23.462,94 hectáreas de cobertura vegetal. Las provincias con la mayor afectación son: Loja, Pichincha, Chimborazo, Guayas, Imbabura y Azuay (SNGRE, 2020).

Las áreas protegidas no son inmunes a este tipo de siniestros, un ejemplo de esto es el incendio en la reserva ecológica El Ángel en el 2012, donde se consumieron nueve mil hectáreas de bosque primario, pasto, pajonales y plantaciones (El Universo, 2012). En la misma reserva en el 2019 los incendios devastaron alrededor de 500 ha (La Hora, 2019).

En la Reserva Ecológica Los Ilinizas, lugar donde se desarrollará esta investigación, en el año 2018 alrededor de 400 ha se vieron afectadas por incendios (Maisanche, 2018). De igual manera en 2019 se quemaron 320 ha en el cerro Corazón (SNGR, 2019).

Los incendios forestales es una problemática de gran interés, puesto que afecta a muchos ecosistemas a nivel mundial, ocasionando la muerte de fauna, grandes extensiones de vegetación que en su mayoría es muy difícil que su regeneración sea a corto plazo. Desafortunadamente, una de las principales causas de los incendios es la actividad humana mediante la quema de basura, maleza o acciones piro maniacas. Estos actos se pueden asociar a la falta de conocimiento e información sobre el uso controlado del fuego, y tratar de erradicar este problema social que preocupa en gran manera, no solo a las autoridades competentes, sino también a la ciudadanía en general que debe concientizar el daño que se causa a la naturaleza es una labor complicada.

1.2.2 Formulación del problema

¿Cuál es el grado de severidad de los incendios forestales en la reserva ecológica Los Ilinizas?

1.3 Justificación de la investigación

Actualmente el país cuenta con 62 reservas naturales que se extienden en aproximadamente el 20% de la superficie del Ecuador. Dichas reservas naturales

son fundamentales para la conservación a largo plazo de la diversidad biológica y cultural, proporcionando bienes y servicios ecosistémicos esenciales para la sociedad y la vida en general (UICN, 2015). No obstante, en los últimos años las áreas protegidas han sido escenario de gran cantidad de incendios.

Solo en 2020, se estima que alrededor de 2 900 ha resultaron afectadas por las llamas. El MAE (2020) calcula que 2 000 ha del Parque Nacional Cayambe Coca han sido afectadas. En Cajas aproximadamente 600 ha, en Antisana 470 ha (SNFRE, 2020), en Llanganates 250 ha, Ilinizas 50 ha y Cotopaxi 5 ha (Alarcón, 2020). Cabe destacar que dicho acontecimiento destruye flora y fauna característica cada área protegida.

Los incendios tienen impactos muy complejos que van desde la pérdida de animales y vegetación hasta deslizamientos de tierra. La recopilación de información de incendios en el campo es mucho más costosa en términos de tiempo y dinero, especialmente en áreas remotas, extensas o de difícil acceso. Por otra parte, el estudio de incendios mediante teledetección ofrece claras ventajas puesto que son una fuente fiable de datos, permiten acceder de forma eficaz, puntual y rápida a zonas que, de otra manera, sería casi imposible.

Visto de esta forma, este trabajo pretende generar información cartográfica precisa para evidenciar que la teledetección puede ser utilizada en la gestión de incendios, permitiendo tomar decisiones de prevención y/o mitigación y así resguardar las áreas protegidas con el fin de preservar y conservar la flora, fauna y belleza paisajística de Ecuador.

Por tal motivo se realizará el mapeo de incendios forestales suscitados en la reserva ecología Los Ilinizas, la severidad de estos y la susceptibilidad física de la reserva ante incendios. La información obtenida puede aumentar la eficiencia de la

lucha contra incendios y permitir la asignación de recursos en la prevención de incendios.

1.4 Delimitación de la investigación

- **Espacio:** La Reserva Ecológica “Los Ilinizas” se localiza al occidente de la provincia de Cotopaxi en jurisdicciones cantonales de Latacunga, La Maná, Pujilí, Sigchos y Pangua; en el extremo sur de las provincias de Pichincha con jurisdicción en el cantón Mejía y en Santo Domingo de los Tsáchilas, el cantón Alluriquín (MAE, 2008). Sus coordenadas son Latitud: 0°42'08.2" S Longitud: 79°03'52.2" W (Ver anexo figura 11).

- **Tiempo:** El tiempo estimado para el presente trabajo de investigación es de 5 meses.

- **Población:** Se estima que la población según el censo (INEC, 2010) es de 13.916 personas de las cuales solo 32 comunidades se relacionan directa o indirectamente con la reserva (Santos 2007).

1.5 Objetivo general

Evaluar la severidad de incendios forestales utilizando sistemas de información geográfica (SIG) para identificación espacial de áreas susceptibles a la ocurrencia de incendios forestales en la Reserva Ecológica Los Ilinizas, provincia Cotopaxi, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas.

1.6 Objetivos específicos

- Delimitar las áreas afectadas por incendios de la Reserva Ecológica “Los Ilinizas” utilizando imágenes satelitales Sentinel-2 en el período 2016-2020.
- Estimar la severidad de los incendios forestales mediante el cálculo de los índices NBR y dNBR y la pérdida de cobertura vegetal utilizando sistemas de información geográfica, QGIS.

- Identificar espacialmente las áreas susceptibles a la ocurrencia de incendios forestales empleando mapas temáticos.

1.7 Hipótesis

Los incendios forestales producidos en la Reserva Ecológica Los Ilinizas tienen un alto grado de severidad.

2. Marco teórico

2.1 Estado del arte

En el estudio de Adagbasa, Adelabu y Okello (2018), el nivel de gravedad del incendio se calcula utilizando el índice NBR de la imagen LANDSAT. Los resultados muestran que, en el año 2.000, 30.704,22 ha de área quemada con gravedad baja a alta, 31.352,13 ha en el año 2005, 4.697 ha en el año 2013 y 30.009,33 ha en 2017. Concluyeron que el Normalized Burn Ratio index (NBR) una herramienta ideal para la evaluación de la gravedad del incendio y es adecuado para la cartografía de la gravedad de los incendios.

Como expresa Combee, et al. (2021) utilizando imágenes de Sentinel-2, el Differenced Normalized Burn Ratio (dNBR), se comparó con las mediciones de campo del Geo Composite Burn Index (GeoCBI) y de la profundidad del quemado. El dNBR mostró cierto potencial como predictor de la profundidad de quemado, especialmente en los bosques densos de alerce, además, captó la variabilidad de los incendios de baja a alta gravedad dentro de las cicatrices de las quemaduras, pero fue incapaz de discriminar entre las sutiles diferencias de los incendios de alta gravedad.

Según Picos, Alonso, Bastos y Armesto (2019) empleando imágenes Sentinel-2 puede evaluar la relación de la severidad de los incendios y el conjunto de sus factores impulsores. Evidenciaron que la presencia de arroyos se identificó como una de las principales causas de la reducción de la gravedad de los incendios en latifoliadas. La ocurrencia de incendios en el pasado está relacionada con la severidad de los incendios, dependiendo de la cobertura del suelo.

Teniendo en cuenta a Saputra, Setiabudidaya, Setyawan, Khakim y Iskandar (2017) analizaron la gravedad del incendio mediante el Normalized Burning Ratio

(NBR) mediante imágenes de pre y post incendio del satélite LANDSAT. Determinaron que, para establecer un plan de rehabilitación para recuperar el impacto de los incendios forestales, se necesita información sobre la superficie total quemada y el nivel de gravedad. Los resultados demostraron que alrededor de 42.906,00 ha de la superficie total del bosque de turba, dichas áreas quemadas se clasificaron en cuatro categorías, es decir, sin quemar, baja, extrema y moderadamente extrema.

Desde el punto de vista de Santos, Gonçalves, Rocha y Baptista (2020) al caracteriza la severidad de las quemaduras y el rebrote en áreas afectadas por tres incendios, concluyeron que, para la zona de estudio, teniendo en cuenta las limitaciones del trabajo de campo, el índice multitemporal dNBR y el índice relativo RdNBR son herramientas importantes para clasificar las zonas quemadas y pueden utilizarse para evaluar el rebrote de la vegetación.

Con base en Campos, Chaves y Araya (2021) utilizaron el índice NBR e identificaron las afectaciones de los incendios entre 176 y 307 ha y que el uso de las imágenes Sentinel-2 y especialmente las bandas 8 (infrarrojo cercano NIR) y la banda 12 (onda corta SWIR) permiten mapear la severidad de un incendio para unidades mayores o iguales a 400 m².

De acuerdo con Fornacca, Ren y Xiao (2018) la capacidad de detectar las áreas afectadas por el fuego de 11 índices espectrales. Determinaron que el Normalized Burn Ratio (NBR) y el Normalized Difference Moisture Index (NDMI) son los índices espectrales que siempre están entre los tres con mejor rendimiento para la detección de las cicatrices de incendio a partir de 1 año después del incendio, pero no para la evaluación inmediata después del incendio.

En esta perspectiva, Mattar, Rivera y Alarcón (2017) determinaron la magnitud de los cambios en la vegetación afectada por incendios con el índice “Normalized Burn Ratio” (NBR) para los incendios de los años 2005 y 2011-2012. Los resultados muestran que los incendios 2005 y 2011-2012 afectaron a más de 30.000 hectáreas del Parque Nacional, siendo las coberturas de “Matorral” y “Bosque” las más afectadas debido a su alto nivel de severidad.

Dentro de este marco Smith et al. (2021) para evaluar la severidad de incendios forestales, utilizaron imágenes de satélite Sentinel 2 de antes y después del incendio y los índices espectrales NDVI (96 %) y dNBR (89 %) generaron productos de mayor precisión, además demostraron que, si se dispone de suficientes datos de campo, los clasificadores de machine learning (ML) son eficaces para la cartografía de la severidad de los incendios, mientras que con datos limitados de campo los índices espectrales tradicionales serían más adecuados.

En el estudio realizado por Zavala, Peña y Manzo (2019) mediante el índice normalized burn ratio (NBR) en 28 imágenes satelitales correspondientes al periodo 2013-2017. El NBR identificó 1260.73 ha de áreas quemadas, de las cuales en 1030,12 ha se alteró su cobertura y uso del suelo, el resto de la superficie permaneció sin cambio. Para obtener mejores resultados, es necesario validar con imágenes satelitales de alta resolución, esto para mejorar la visualización y delimitación de las zonas afectadas.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Áreas protegidas

Como plantea Dudley (2008) a las áreas protegidas como un espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y gestionado, mediante medios legales

u otros tipos de medios eficaces para conseguir la conservación a largo plazo de la naturaleza y de sus servicios ecosistémicos y sus valores culturales asociados.

2.2.1.1 Áreas protegidas del Ecuador

El manejo institucional de las áreas protegidas se inicia en 1976 fundamentado en la Estrategia Preliminar para la Conservación de Áreas Silvestres Sobresalientes del Ecuador, con el propósito de conservar la biodiversidad y el acervo histórico cultural, además de los vestigios, yacimientos y asentamientos arqueológicos del país (Zárate, 2013).

En el Ecuador, la primera área protegida fue el Archipiélago de las Galápagos, en 1936. A la fecha, el SNAP incluye 62 áreas protegidas en el país que se extienden por 18.416.138 hectáreas. El SNAP se desagrega en terrestres y marinas, de las cuales el 20,29% del territorio nacional se encuentra protegido a través de áreas protegidas terrestres y el 12,07% se encuentra conservado a través de áreas protegidas marinas (MAATE, 2020).

La constitución del 2008 establece el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, conformado por cuatro subsistemas (CIIFEN, 2014):

- Subsistema Estatal (Patrimonio de Áreas Naturales Protegidas del Estado-PANE)
- Subsistema de Áreas Protegidas de Gobiernos Autónomos Descentralizados,
- Subsistema de Áreas Protegidas Comunitarias
- Subsistema de Áreas Protegidas Privadas

El PANE es administrado y manejado por el Ministerio del Ambiente, mientras que los otros subsistemas se amplía la gama de administradores y manejadores

de áreas protegidas siempre bajo la rectoría y regulación del Estado, a través del Ministerio del Ambiente (CIIFEN, 2014).

A continuación, se citan las áreas protegidas por categoría de manejo (MAATE, 2020):

Tabla 1. Áreas protegidas por categoría de manejo

N°	Áreas Protegidas	Categoría de Manejo
1	Siete Iglesias	Área Ecológica de Conservación Municipal
2	La Bonita	Área Ecológica de Conservación Municipal
3	Yacuambi	Área Ecológica de Conservación Municipal
4	Mazán	Área Ecológica de Conservación Municipal
5	Cordillera Oriental Del Carchi	Área Protegida Autónoma Descentralizada
6	Quimsacocha	Área Nacional de Recreación
7	Playas De Villamil	Área Nacional de Recreación
8	Parque Lago	Área Nacional de Recreación
9	Isla Santay	Área Nacional de Recreación
10	Los Samanes	Área Nacional de Recreación
11	El Boliche	Área Nacional de Recreación
12	Marcos Perez De Castilla	Área Protegida Comunitaria
13	Tambillo	Área Protegida Comunitaria
14	Bellavista	Área Protegida Privada
15	Ichubamba Yasepan	Área Protegida Privada
16	Cajas	Parque Nacional
17	Cotopaxi	Parque Nacional
18	Llanganates	Parque Nacional
19	Podocarpus	Parque Nacional
20	Sangay	Parque Nacional
21	Yasuní	Parque Nacional
22	Rio Negro Sopladora	Parque Nacional
23	Cayambe Coca	Parque Nacional
24	Yacurí	Parque Nacional
25	Sumaco Napo-Galeras	Parque Nacional
26	Galapagos	Parque Nacional
27	Cotacachi Cayapas	Parque Nacional
28	Machalilla	Parque Nacional
29	El Zarza	Refugio de Vida Silvestre
30	Pasochoa	Refugio de Vida Silvestre
31	Islas Corazon Y Las Islas Fragatas	Refugio de Vida Silvestre
32	La Chiquita	Refugio de Vida Silvestre

33	Manglares Estuario Del Rio Esmeraldas	Refugio de Vida Silvestre
34	El Pambilar	Refugio de Vida Silvestre
35	Manglares El Morro	Refugio de Vida Silvestre
36	Pacoche	Refugio de Vida Silvestre
37	Samama Mumbes	Refugio de Vida Silvestre
38	Manglares Estuario Del Rio Muisne	Refugio de Vida Silvestre
39	El Quimi	Reserva Biológica
40	Cerro Plateado	Reserva Biológica
41	El Condor	Reserva Biológica
42	Limoncocha	Reserva Biológica
43	Colonso Chalupas	Reserva Biológica
44	Chimborazo	Reserva de Producción de Fauna
45	Cuyabeno	Reserva de Producción de Fauna
46	Puntilla De Santa Elena	Reserva de Producción de Fauna
47	Manglares El Salado	Reserva de Producción de Fauna
48	Antisana	Reserva Ecológica
49	El Ángel	Reserva Ecológica
50	Manglares Cayapas Mataje	Reserva Ecológica
51	Cofan Bermejo	Reserva Ecológica
52	Mache Chíndul	Reserva Ecológica
53	Los Ilinizas	Reserva Ecológica
54	Manglares Churute	Reserva Ecológica
55	Arenillas	Reserva Ecológica
56	Pululahua	Reserva Geobotánica
57	Isla Santa Clara	Reserva Marina
58	Galera San Francisco	Reserva Marina
59	El Pelado	Reserva Marina
60	Cantagallo - Machalilla	Reserva Marina
61	Bajo Cope	Reserva Marina
62	Galápagos	Reserva Marina

MAATE, 2020

2.2.1.2 Reserva ecológica

De acuerdo con Dávalos (2021) y Cervantes (2008) son áreas naturales terrestres y/o marinas de extensiones variables que pueden incluir uno o varios ecosistemas que se caracterizan por tener un alto grado de conservación y diversidad que debe ser preservada en su totalidad, sujeta a protección estricta y estar alejada de las fuentes de perturbación.

Según ECOLAP y MAE (2007) es una categoría de Manejo de un Área Estatal Protegida, que comprende uno o más ecosistemas con especies de flora y fauna silvestres importantes y amenazadas de extinción, por lo cual se prohíbe cualquier tipo de explotación u ocupación formaciones geológicas singulares en áreas naturales o parcialmente alteradas. De mínimo 10 000 ha. de superficie.

2.2.1.3 Reserva Ecológica Los Ilinizas

La Reserva Ecológica Los Ilinizas (RELI) fue creada el 11 de diciembre de 1996, mediante Resolución No. 066, publicada en el Registro oficial No. 92 del 19 de diciembre de 1996. Forma parte del (PANE), conformando el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) (INEFAN, 1996).

Es importante mencionar que en la Resolución No. 066 (creación de la reserva) está registrada como Reserva Ecológica “Los Ilinizas” (INEFAN, 1996); sin embargo, en documentación actual del SNAP esta como Reserva Ecológica “Los Ilinizas”.

La RELI tiene una extensión de 134.233,25 ha (MAATE, 2020) localizada en la provincia de Cotopaxi y provincia de Pichincha. De toda su superficie 70.000 ha son de propiedad privada (MAE, 2007).

La reserva se divide en cuatro secciones. La más grande incluye un bloque largo al oeste del Quilotoa, donde nacen las vertientes y riachuelos que agua abajo alimentarán al río Toachi. La segunda zona, ubicada al noreste, es el bloque donde están los Ilinizas y el Corazón. El tercer bloque está al suroccidente, separado de la sección más grande por la carretera Latacunga – La Maná. El cuarto bloque es una especie de isla de 800 hectáreas que básicamente rodea la laguna del Quilotoa (SNAP, 2016).

2.2.1.3.1 Ecosistemas en la RELI

La RELI al estar ubicada en el ramal occidental de los Andes ecuatorianos, y en un rango altitudinal entre los 800 y 5.265 metros sobre el nivel del mar, ha permitido el desarrollo de una gran riqueza de especies de mamíferos, aves, anfibios, reptiles, peces e invertebrados terrestres.

Esas características permiten identificar cuatro tipos de ecosistemas (El Universo, 2010): el páramo, fuente de agua en cantidad y calidad que está apta para el consumo humano y agrícola. El bosque de ceja andina, que limita con los páramos y su presencia disminuye por el avance de la frontera agrícola. En esta área se encuentran especies nativas endémicas de plantas como pumamaqui, quishuar o el árbol de papel (*Polylepis*) que también están amenazados. Otro de los ecosistemas son los bosques de neblina, donde existen diversas especies maderables, cuya extracción no cesa y amenaza la supervivencia del olivo, podocarpus, el colorado, cedro y el arrayán, explotado para la elaboración del carbón. Finalmente está el bosque subtropical.

2.2.1.3.2 Fauna

Según información de (MAE, 2008) y (ECOLAP y MAE, 2007) el conocimiento de los animales presentes dentro de la RELI es escaso, no obstante, se estima que a nivel de ornitofauna se registran 386 especies de aves agrupadas en 50 familias. Para los anfibios se obtuvo una lista de 66 especies, agrupando a 43 anfibios y 23 reptiles. En cuanto a mamíferos silvestres se registraron 64 especies agrupadas en 11 órdenes, 26 familias y 49 géneros.

Ahora bien, dado a la faunística registrada en la RELI existen especies endémicas, es así en el caso de las aves puesto se han identificado alrededor de 35 especies de aves localizadas en 5 áreas endémicas: Bajuras del Chocó, Bajuras

Tumbesinas, Ladera Occidental Andina, Laderas y valles Interandinos y Sierra del Suroeste (MAE, 2008).

En cuanto a los mamíferos registrados en la REI, tres especies son endémicas para el Ecuador: *Cryptotis equatoris*, *Phyllotis haggardi* y *Thomasomys rhoadsi*. Dentro del área de estudio los mamíferos que viven de manera solitaria fueron los más característicos, alcanzando el 62,5% del total de registros y 24 especies (37,5%) viven en grupo (gregarios).

2.2.1.3.4 Flora y Vegetación

La REI se divide en tres sectores, bloques o cuerpos. El primero comprende de la vía La Maná hacia el norte. El segundo, está ubicado de la vía La Mana hacia el sur. La tercera zona es una pequeña área y corresponde a la laguna del Quilotoa. Se definen siete formaciones vegetales; Adicionalmente se reconocen dos tipos de formaciones antrópicas: Pastizales y Cultivos (MAE, 2008).

Tabla 2. Descripción de Formas de Vida de la RELI

Descripción de la formación Vegetal	Altitudes según el PM 2008 en msnm
Bosque siempre verde pie-montano	300-1300
Bosque siempre verde montano bajo	1300-2000
Bosque de neblina montano	2000-3400
Bosque siempre verde montano alto	3400-4000
Páramo herbáceo	3600-4200
Páramo seco	3600-4200
Gelidofita	4200-4700

MAE, 2008

2.2.1.4 Programas y Subprogramas para el Manejo de la Reserva Ecológica

Los Ilinizas

Los Programas y Subprogramas en el presente Plan de Manejo, se estructuran en base a los lineamientos definidos por el MAE. Las necesidades para el Manejo Integral incluyen actividades que garantizan el cumplimiento de los objetivos y

metas de la Reserva en el largo plazo. El manejo integral implica el cumplimiento de los cuatro programas (MAE, 2008):

- Administración, Control y Vigilancia
- Planificación Participativa
- Fortalecimiento de la relación con poblaciones locales
- Investigación Científica

La Estrategia de acción del Manejo de la RELI se estructura a través de 4 programas y 11 subprogramas, que suministran las directrices generales que deben guiar a los tomadores de decisiones.

Tabla 3. Programas y subprogramas para el Manejo de la RELI

Programas de Manejo	Subprogramas de Manejo
Administración control y vigilancia	Inversión Consolidación Territorial Consolidación y vigilancia Fortalecimiento Institucional del Área Protegida Sostenibilidad Financiera
Planificación participativa	Planificación, seguimiento y evaluación
Fortalecimiento de las relaciones con poblaciones locales.	Fortalecimiento de la organización comunitaria Educación y comunicación ambiental Turismo y recreación
Investigación científica	Uso de recursos naturales Investigación Científica, Manejo de Recursos Naturales y Monitoreo Ambiental.

MAE, 2008

Es importante mencionar que se establecieron objetivos y actividades para cada subprograma, pero ninguno se ejecutó solo se establecieron los costos de inversión.

2.2.2 Fuego

El fenómeno de la combustión se manifiesta en luz, llama y calor. Período de flameo y combustión activa (Lutes et al., 2006).

2.2.3 Quema

Lesión, daño o efecto producido por calentamiento. El (los) resultado (s) del fuego, también un área donde se ha producido un incendio en el pasado (Lutes et al., 2006).

2.2.4 Intensidad del fuego

La intensidad del fuego se define como la fuerza o la cantidad de energía gastada. El nivel de calor producido por el fuego (Lutes et al., 2006).

Para DellaSala (2018) la intensidad del fuego se refiere a la energía calorífica liberada durante un incendio forestal.

2.2.5 Severidad del incendio

La severidad se puede definir como la cualidad o estado de aflicción infligida por una fuerza. La magnitud del cambio medioambiental causado por el fuego, o el nivel de coste resultante en términos socioeconómicos (Lutes et al., 2006).

Como plantea Llovería, Cabello, Martín, Vlassova y Fernández (2014) concepto severidad hace referencia a los efectos del fuego sobre el medio ambiente, siendo comúnmente definido como la magnitud del cambio ecológico causado por el fuego.

Teniendo en cuenta a NWCG (2006) lo define como evaluación cualitativa del calor dirigido hacia el suelo durante un incendio. La severidad del incendio está relacionada con el calentamiento del suelo, el consumo de grandes cantidades de combustible y la mortalidad de la cobertura vegetal.

La severidad del incendio en sentido estricto, son a largo plazo o, simplemente, como respuesta del ecosistema (Llovería et al., 2014).

La gravedad del incendio depende de múltiples factores que afectan al comportamiento del fuego. Esos factores suelen representarse en lo que se llama

un "triángulo de comportamiento del fuego". Los tres factores principales del triángulo son (Berger, Grand, Fitzgerald, y Leavell, 2018):

- Las condiciones meteorológicas durante el incendio (viento, temperatura, humedad)
- La topografía del paisaje (pendiente, aspecto)
- La cantidad, disposición y tipos de combustibles presentes durante el incendio

2.2.6 Severidad del Fuego

La severidad del fuego es la afección más inmediata tras el incendio, donde se abarcan aspectos como la vegetación consumida o la alteración del suelo (Lentile, Holden, Falkowski, y Smith, 2006).

Según Pastrana (2017) el grado de cambio ambiental causado directamente por el fuego, su evaluación se realiza inmediatamente después de un evento de incendio (una evaluación inicial). Esta es la evaluación de la gravedad a corto plazo.

La severidad del fuego como un concepto nacido a partir de la necesidad de describir cómo la intensidad afecta a los ecosistemas, la siguiente matriz (Tabla 4) mide las diferentes severidades (Keeley, 2009).

Tabla 4. Niveles de severidad del fuego propuesta por Keeley, 2009

Severidad del fuego	Descripción
No quemado	Las partes de las plantas permanecen verdes e inalteradas. No existe evidencia de ningún efecto directo del calor.
Chamuscado	No quemado, pero las plantas muestran pérdida de hojas debido al calor radiado. Pérdida de hojas por el calor irradiado, pero sin llegar a quemar las plantas.
Ligeramente quemado	El dosel de árboles con acículas permanece verde, aunque los tallos, la hojarasca superficial, musgos y hierbas, presentan quemaduras o están consumidos levemente La capa orgánica del suelo en gran parte está intacta y la carbonización se limita a una profundidad de unos pocos milímetros

Incendio superficial moderado o severo	<p>Algunos árboles con dosel superior están muertos o presentan algunas hojas consumidas. Todas las plantas del sotobosque están carbonizadas o consumidas. Algunos troncos están consumidos o carbonizados y hay presencia de ramas finas muertas en la superficie del suelo. La capa orgánica del suelo esta consumida en gran parte.</p>
Quema profunda o incendio de copas	<p>Todos los árboles del dosel superior están muertos y sus hojas han sido consumidas. La capa orgánica del suelo y la hojarasca superficial se encuentran carbonizadas Deposición de ceniza blanca y la materia orgánica carbonizada a varios centímetros cm de profundidad.</p>

Keeley, 2009

2.2.7 Incendios forestales

La plataforma de las Naciones Unidas UN-SPIDER (2015) define a los incendios forestales, como cualquier combustión o quema descontroladas y no prescrita de plantas en un entorno natural como un bosque, pradera, terreno de matorral o tundra, que consume los combustibles naturales y se propaga en función de las condiciones ambientales.

2.2.8 Origen de los incendios forestales

Existen incendios de origen natural y por causas humanas. Los primeros son producidos por erupciones volcánicas o por rayos en tormentas eléctricas secas, sin presencia de lluvia. Los segundos son incendios forestales originados por las personas, producto de descuido, desconocimiento, mala intención o accidentes (CONAF, 2011).

2.2.9 Susceptibilidad a incendios forestales

Un territorio es susceptible a incendios forestales cuando reúne las condiciones necesarias para el inicio y posterior expansión del fuego. En especial, aquellas relacionadas con la combustibilidad de la vegetación, las condiciones meteorológicas y la cercanía a actividades antrópicas (Córdova y Bueno, 2020).

2.2.10 Teledetección

Plantea el IGN (2017) que la teledetección es una tecnología que adquiere datos de la superficie de la tierra desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el suelo y el sensor produce un conjunto de datos que se procesan para obtener información interpretable de la Tierra.

2.2.11 Sistema de información de geográfica

Desde el punto de vista de Saavedra (1992) un Sistema de Información Geográfico (SIG) se puede definir como “Un conjunto interactivo de subsistemas orientados hacia la captura y organización de la información georreferenciada, con el fin de suministrar elementos de juicio para apoyar la toma de decisiones” (p.3).

2.2.12 Sentinel-2

Los Sentinel son una flota de satélites diseñada específicamente para proporcionar los abundantes datos e imágenes de que se nutre el programa Copernicus, de la Comisión Europea (ESA, 2015).

La misión se basa en una constelación de dos satélites idénticos en la misma órbita, separados por 180 grados (ESA, 2015). Su propósito es monitorear los cambios en las condiciones de la superficie terrestre. Tiene una franja de 290 km y alto tiempo de revisión (10 días en el ecuador con un satélite y 5 días con dos satélites, lo que da como resultado 2-3 días en latitudes medias) (ESA, 2013).

2.2.13 Relación de Área Quemada Normalizada (NBR)

El índice NBR (Normalized Burn Ratio) está diseñado para resaltar las áreas quemadas en zonas de grandes incendios a través de una sencilla relación entre bandas multiespectrales siguiendo la siguiente ecuación (UN-SPIDER, 2018):

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

Donde:

NIR: Infrarrojo cercano

SWIR: Infrarrojo de onda corta

En Sentinel 2 se utilizan las bandas B8A y B12:

$$NBR = \frac{(B8A - B12)}{(B8A + B12)}$$

Donde:

B8A: Infrarrojo cercano

B12: Infrarrojo de onda corta

El índice NBR muestra valores entre -1 y 1. Donde los valores negativos de nuestro ilustran zonas afectadas por el fuego mientras que valores positivos representan zonas vegetales sanas o en fase de regeneración si previamente ha existido un incendio (Gis&Beers, 2018). Las zonas no quemadas se atribuyen normalmente a valores cercanos a cero (UN-SPIDER, 2015).

2.2.14 Relación de Quema Normalizada Diferenciada (dNBR)

Proporciona una comparación de condiciones pre y post incendio para determinar la severidad (Bengtsson, Torres-Pérez, y McCullum, 2021). Esta diferencia es utilizada para discriminar las áreas quemadas de las que no están y proporcionar una categoría del cambio causado por el fuego o severidad de los daños. Un valor más alto de dNBR indica un daño más severo, mientras que las áreas con valores negativos de dNBR pueden indicar el rebrote después de un incendio. La fórmula utilizada para calcular el dNBR es la siguiente (UN-SPIDER, 2018):

$$dNBR = NBR_{prefuego} - NBR_{postfuego}$$

2.2.14.1 Limitantes

Debido a que el análisis de la severidad mediante el dNBR es un proceso de detección de cambios, donde los datos de antes y después de un evento se deducen entre sí, también los cambios no relacionados con el fuego en el medio ambiente pueden detectarse como daños por incendios forestales. Los ejemplos pueden incluir cambios en la vegetación natural, la deforestación y otros cambios en la cobertura del suelo, inclusive la nieve, las nubes y su sombra, en el caso las dos últimas se pueden enmascarar. Sin embargo, los algoritmos de enmascaramiento a veces no cubren, las sombras completamente, lo que más tarde puede conducir a detecciones falsas.

Por ejemplo, una sombra de nube que no se ha enmascarado por completo y luego se clasificó falsamente como un nuevo rebrote de vegetación. Los cambios leves en la vegetación (después de un período de vegetación natural o fenológico) también pueden detectarse como afectaciones de severidad baja, por lo que esta clase debe tratarse con especial cuidado (UN-SPIDER, 2020).

2.2.15 Clasificación supervisada

De acuerdo con UM (2018) la clasificación supervisada se basa en la disponibilidad de áreas de entrenamiento. Se trata de áreas de las que se conoce a priori la clase a la que pertenecen y que servirán para generar una signatura espectral característica de cada una de las clases.

2.2.16 Uso de la tierra

Según MAGAP (2020) el uso de la tierra se aplica al empleo que el hombre da a los diferentes tipos de cobertura, cíclica o permanente para satisfacer sus necesidades

2.2.17 Cobertura vegetal

De acuerdo con MAGAP (2020) es el dato que describe la capa de vegetación que cubre la superficie terrestre, comprendiendo a la flora silvestre la cual se define como el conjunto de especies nativas, que crecen espontáneamente.

2.2.18 Sistema de clasificación de cobertura de la tierra

Como señala MAGAP (2020) se identifican cinco niveles y seis grandes formas de cobertura (tierra forestal, vegetación arbustiva y herbácea, tierra agropecuaria, cuerpo de agua, zona antrópica y otras áreas), definiendo dentro de cada forma las subclases respectivas.

En lo que se refiere a la parte agropecuaria, el nivel I corresponde la gran forma de cobertura “Tierra Agropecuaria”, en nivel II corresponde a los objetos cultivo, pastizal, mosaico agropecuario y otras tierras agrícolas, para el caso de los cultivos, el nivel III indica el tiempo de duración del ciclo de cultivo (temporalidad), nivel IV Indica el grupo alimenticio o el uso que tiene el cultivo, el nivel V indica el nombre propio o denominación verbal de la especie de cultivo. En una columna adicional se presenta el uso de la tierra (MAGAP, 2020).

2.2.19 Tipos de ecosistemas según su relación con el fuego

No todos los ecosistemas se relacionan con el fuego de la misma manera, desde el punto de vista ecológico, unos se benefician del fuego y otros se ven severamente afectados, esta relación varía en cuanto a los regímenes naturales de incendios, en consecuencia, se pueden clasificar como sensibles al fuego, dependientes del fuego e independientes del fuego (Armenteras, González, Ríos, Elizalde, y Oliveras, 2020).

Ecosistemas independientes del fuego: Son aquellos que se caracterizan por altos valores de humedad durante todo el año, es decir no tienen características

intrínsecas para que se dé la ignición y propagación del fuego como los ecosistemas de bosques tropicales lluviosos, paramos y bosques de niebla. Otros ecosistemas que entran en esta categoría, son aquellos que tienen una baja producción de biomasa a causa del estrés por bajas temperaturas o estrés hídrico, ya que no tienen suficiente fuente de combustible para que el fuego se manifieste como fuerza evolutiva.

Ecosistemas sensibles al fuego: Dentro de los ecosistemas sensibles al fuego, se encuentran todos aquellos que debido a la composición y estructura de la vegetación, así como a las condiciones de humedad, la mayoría de las veces pueden inhibir la ignición y propagación del fuego. En otras palabras, no son muy inflamables, pero esta condición puede cambiar por efecto de cambios en el uso de la tierra, la invasión de pastos y arbustos pirófilos y el cambio climático. Algunos de los ecosistemas sensibles al fuego son los bosques secos, bosques andinos, páramos (subpáramo y páramo propiamente dicho) y el matorral espinoso.

Ecosistemas dependientes del fuego: En estos ecosistemas las especies han desarrollado adaptaciones que les permiten responder de forma positiva al fuego e incluso facilitar su reproducción, por ende, la vegetación de éstos es inflamable y propensa al fuego. Se encuentran las sabanas naturales de Colombia, ecosistemas de tierras bajas que se caracterizan por una estacionalidad marcada en las precipitaciones y la predominancia de vegetación herbácea, con árboles y arbustos en diferentes densidades de cobertura.

2.3 Marco legal

2.3.1 Constitución de la República del Ecuador (2018)

Capítulo séptimo Derechos de la naturaleza

Art. 71.- La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos.

Toda persona, comunidad, pueblo o nacionalidad podrá exigir a la autoridad pública el cumplimiento de los derechos de la naturaleza. Para aplicar e interpretar estos derechos se observarán los principios establecidos en la Constitución, en lo que proceda. El Estado incentivará a las personas naturales y jurídicas, y a los colectivos, para que protejan la naturaleza, y promoverá el respeto a todos los elementos que forman un ecosistema (p. 36).

Art. 73.- El Estado aplicará medidas de precaución y restricción para las actividades que puedan conducir a la extinción de especies, la destrucción de ecosistemas o la alteración permanente de los ciclos naturales. Se prohíbe la introducción de organismos y material orgánico e inorgánico que puedan alterar de manera definitiva el patrimonio genético nacional (p. 37).

Art. 74.- Las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades tendrán derecho a beneficiarse del ambiente y de las riquezas naturales que les permitan el buen vivir. Los servicios ambientales no serán susceptibles de apropiación; su producción, prestación, uso y aprovechamiento serán regulados por el Estado (p. 37).

Capítulo segundo Biodiversidad y recursos naturales

Sección primera Naturaleza y ambiente

Art. 397.- En caso de daños ambientales el Estado actuará de manera inmediata y subsidiaria para garantizar la salud y la restauración de los ecosistemas. Además de la sanción correspondiente, el Estado repetirá contra el operador de la actividad que produjera el daño las obligaciones que conlleve la reparación integral, en las condiciones y con los procedimientos que la ley establezca. La responsabilidad también recaerá sobre las servidoras o servidores responsables de realizar el control ambiental. Para garantizar el derecho individual y colectivo a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, el Estado se compromete a:

1. Permitir a cualquier persona natural o jurídica, colectividad o grupo humano, ejercer las acciones legales y acudir a los órganos judiciales y administrativos, sin perjuicio de su interés directo, para obtener de ellos la tutela efectiva en materia ambiental, incluyendo la posibilidad de solicitar medidas cautelares que permitan cesar la amenaza o el daño ambiental materia de litigio. La carga de la prueba sobre la inexistencia de daño potencial o real recaerá sobre el gestor de la actividad o el demandado.
2. Establecer mecanismos efectivos de prevención y control de la contaminación ambiental, de recuperación de espacios naturales degradados y de manejo sustentable de los recursos naturales.
3. Regular la producción, importación, distribución, uso y disposición final de materiales tóxicos y peligrosos para las personas o el ambiente.
4. Asegurar la intangibilidad de las áreas naturales protegidas, de tal forma que se garantice la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de las funciones ecológicas de los ecosistemas. El manejo y administración de las áreas naturales protegidas estará a cargo del Estado.
5. Establecer un sistema nacional de prevención, gestión de riesgos y desastres naturales, basado en los principios de inmediatez, eficiencia, precaución, responsabilidad y solidaridad (p. 177).

Sección tercera

Patrimonio natural y ecosistemas

Art. 405.- El sistema nacional de áreas protegidas garantizará la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de las funciones ecológicas. El sistema se integrará por los subsistemas estatal, autónomo descentralizado, comunitario y privado, y su rectoría y regulación será ejercida por el Estado. El Estado asignará los recursos económicos necesarios para la sostenibilidad financiera del sistema, y fomentará la participación de las comunidades, pueblos y nacionalidades que han habitado ancestralmente las áreas protegidas en su administración y gestión. Las personas naturales o jurídicas extranjeras no podrán adquirir a ningún título tierras o concesiones en las áreas de seguridad nacional ni en áreas protegidas, de acuerdo con la ley (p. 179).

Art. 406.- El Estado regulará la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación, y limitaciones de dominio de los ecosistemas frágiles y amenazados; entre otros, los páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos y manglares, ecosistemas marinos y marinos-costeros (p. 180).

Art. 407.- Se prohíbe la actividad extractiva de recursos no renovables en las áreas protegidas y en zonas declaradas como intangibles, incluida la explotación forestal. Excepcionalmente dichos recursos se podrán explotar a petición fundamentada de la Presidencia de la República y previa declaratoria de interés nacional por parte de la Asamblea Nacional, que, de estimarlo conveniente, podrá convocar a consulta popular (p. 180).

2.3.2 Convención para la protección de la flora, de la fauna y de las bellezas escénicas naturales de los países de América (1940)

Art. 3.- Los Gobiernos Contratantes convienen en prohibir la caza, la matanza y la captura de especímenes de la fauna y la destrucción y recolección de ejemplares de la flora en los parques nacionales, excepto cuando se haga por las autoridades del parque o por orden o bajo la vigilancia de las mismas, o para investigaciones científicas debidamente autorizadas (p. 2).

Art 4.- Los Gobiernos Contratantes acuerdan mantener las reservas de regiones vírgenes inviolables en tanto sea factible, excepto para la investigación científica debidamente autorizada y para inspección gubernamental, o para otros fines que estén de acuerdo con los propósitos para los cuales la reserva ha sido creada (p. 3).

Art 5.- Los Gobiernos Contratantes convienen en adoptar o en recomendar a sus respectivos cuerpos legislativos competentes, la adopción de leyes y reglamentos que aseguren la protección y conservación de la flora y fauna dentro de sus respectivos territorios y fuera de los parques y reservas nacionales, monumentos naturales y de las reservas de regiones (p. 3).

2.3.3 Convenio sobre la Diversidad Biológica (1995)

Artículo 8.- Conservación in situ

Cada Parte Contratante, en la medida de lo posible y según proceda:

- a) Establecerá un sistema de áreas protegidas o áreas donde haya que tomar medidas especiales para conservar la diversidad biológica;
- b) Cuando sea necesario, elaborará directrices para la selección, el establecimiento y la ordenación de áreas protegidas o áreas donde haya que tomar medidas especiales para conservar la diversidad biológica;
- c) Reglamentará o administrará los recursos biológicos importantes para la conservación de la diversidad biológica, ya sea dentro o fuera de las áreas protegidas, para garantizar su conservación y utilización sostenible;
- d) Promoverá la protección de ecosistemas y hábitats naturales y el mantenimiento de poblaciones viables de especies en entornos naturales;
- e) Promoverá un desarrollo ambientalmente adecuado y sostenible en zonas adyacentes a áreas protegidas, con miras a aumentar la protección de esas zonas (p. 5);

Artículo 10.- Utilización sostenible de los componentes de la diversidad biológica Cada Parte Contratante, en la medida de lo posible y según proceda:

- c) Protegerá y alentará, la utilización consuetudinaria de los recursos biológicos, de conformidad con las prácticas culturales tradicionales que sean compatibles con las exigencias de la conservación o de la utilización sostenible;
- d) Prestará ayuda a las poblaciones locales para preparar y aplicar medidas correctivas en las zonas degradadas donde la diversidad biológica se ha reducido;y
- e) Fomentará la cooperación entre sus autoridades gubernamentales y su sector privado en la elaboración de métodos para la utilización sostenible de los recursos biológicos (p. 6).

Artículo 13.- Educación y conciencia pública Las Partes Contratantes:

- a) Promoverán y fomentarán' la comprensión de la importancia de la conservación de la diversidad biológica y de las medidas necesarias a esos efectos, así como su propagación a través de los medios de información, y la inclusión de esos temas en los programas de educación; y
- b) Cooperarán, según proceda, con otros Estados y organizaciones internacionales en la elaboración de programas de educación y sensibilización del público en lo que respecta a la conservación y la utilización sostenible de la diversidad biológica (p. 7).

2.3.4 Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre

(2004)

CAPITULO X

De la Protección Foresta

Art. 57.- El Ministerio del Ambiente prevendrá y controlará los incendios forestales, plagas, enfermedades y riesgos en general que puedan afectar a los bosques y vegetación natural (p. 9).

Art. 58.- El Ministerio del Ambiente organizará campañas educativas para prevenir y combatir los incendios forestales, mediante conferencias en escuelas,

colegios y centros públicos, proyección de películas y otras medidas similares (p. 9).

Art. 59.- Los propietarios de bosques, los contratistas de aprovechamiento forestal y, en general, los poseedores, administradores y tenedores de bosques, están obligados a adoptar las medidas necesarias para prevenir o controlar los incendios o flagelos, plagas, enfermedades y perjuicios a los recursos forestales (p. 9).

Art. 60.- En el seguro agropecuario se incluirá el seguro forestal, contra riesgos provenientes de incendios, plagas, enfermedades y otros riesgos forestales, al que podrán acogerse las personas naturales o jurídicas propietarias de bosques cultivados (p. 9).

TITULO IV

De las Infracciones a la Presente Ley y su Juzgamiento

CAPITULO I

De las Infracciones y Penas

Art. 79.- Sin perjuicio de la acción penal correspondiente, quien provoque incendios de bosques o vegetación protectores, cause daños en ellos, destruya la vida silvestre o instigue la comisión de tales actos será multado con una cantidad equivalente de uno a diez salarios mínimos vitales generales (p. 12).

2.3.5 Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales (2018)

Art. 50.- Límite a la ampliación de la frontera agrícola. Se limita el avance de la frontera agrícola en ecosistemas frágiles y amenazados, como páramos, manglares, humedales, bosques nublados, bosques tropicales, secos y húmedos, zonas de patrimonio natural, cultural y arqueológico.

Se respetarán los asentamientos humanos y las actividades agrarias existentes en estas zonas. Cuando se trate de predios de comunidades o personas individuales de la agricultura familiar campesina de subsistencia, estas actividades deberán enmarcarse en un instrumento de manejo zonal que incluya su corresponsabilidad en el control de la ampliación de la frontera agrícola y la protección ambiental, que será formulado por la Autoridad Agraria Nacional en un proceso participativo comunitario y según los lineamientos que emita la Autoridad Ambiental Nacional.

No se permitirá el avance de la frontera agrícola en los páramos no intervenidos que se encuentren sobre los 3300 metros de altitud sobre el nivel del mar, al norte del paralelo tres latitud sur, y sobre los 2700 metros de altitud, al sur de dicho paralelo; y en general, en áreas naturales protegidas y particularmente en los territorios con alta biodiversidad o que generen servicios ambientales.

La conservación y el uso de los ecosistemas frágiles y amenazados, serán regulados por la Autoridad Ambiental Nacional en coordinación con la Autoridad Agraria Nacional.

Se aplicarán programas de incentivos económicos para comunidades, comunas, pueblos y nacionalidades que habitan en ecosistemas frágiles, impulsando su conservación y restauración.

Los predios privados que no forman parte de la agricultura familiar campesina de subsistencia, ubicados en páramos deben contar con las autorizaciones ambientales respectivas.

Las actividades agrarias que se ejecuten en predios ubicados en áreas que forman parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, deberán cumplir los lineamientos y la normativa emitida por la Autoridad Ambiental Nacional en coordinación con la Autoridad Agraria Nacional.

Está prohibido el cambio de uso de las tierras rurales destinadas a la conservación de recursos naturales renovables. La Autoridad Ambiental Nacional regulará y controlará el cumplimiento de estas políticas (p. 19).

2.3.6 Código Orgánico del Ambiente (2017)

LIBRO SEGUNDO DEL PATRIMONIO NATURAL

CAPITULO II

Sistema Nacional de Áreas Protegidas

Art. 49.- Facultad de expropiación y prohibición de invasiones. Para conservar la biodiversidad y garantizar la conectividad de los ecosistemas o áreas de interés ecológico, se podrán expropiar las tierras de propiedad pública o privada que se encuentren dentro de las áreas protegidas, de conformidad con la ley de la materia. Se prohíbe la invasión o cualquier tipo de ocupación ilegal con cualquier fin en las áreas incorporadas en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (p. 25).

CAPITULO III

Áreas Especiales para la Conservación de la Biodiversidad

Art. 55.- De las áreas especiales para la conservación de la biodiversidad. Se podrán incorporar áreas especiales para la conservación de la biodiversidad complementarias al Sistema Nacional de Áreas Protegidas con el fin de asegurar la integridad de los ecosistemas, la funcionalidad de los paisajes, la sostenibilidad de las dinámicas del desarrollo territorial, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales o la recuperación de las áreas que han sido degradadas o se encuentran en proceso de degradación, de acuerdo a los criterios que determine la Autoridad Ambiental Nacional. La creación de estas áreas especiales podrá ser impulsada por iniciativa pública, privada o comunitaria y deberá ser registrada tanto en los sistemas de información de los Gobiernos Autónomos Descentralizados como en el Sistema Único de Información Ambiental. Cuando un área especial para la conservación de la biodiversidad haya sido establecida con anterioridad a un área protegida, prevalecerán las reglas para las áreas protegidas (p. 26).

CAPITULO II

Disposiciones Fundamentales

Art. 95.- Potestad precauteladora. La Autoridad Ambiental Nacional tiene la potestad de disponer, en el sitio y de manera precauteladora, la inmediata suspensión de acciones que puedan causar la degradación y deforestación del Patrimonio Forestal Nacional en coordinación con la Policía Nacional y las Fuerzas Armadas. La coordinación será regulada en la normativa secundaria (p. 35).

CAPITULO VI

Restauración Ecológica, Plantaciones Forestales y Sistemas Agroforestales

Art. 122.- Prohibiciones para el establecimiento de plantaciones forestales. En ningún caso las plantaciones forestales con fines de conservación y producción afectarán o reemplazarán las áreas cubiertas con bosques naturales, vegetación nativa y arbustiva, ecosistemas frágiles, servidumbres ecológicas o zonas de protección permanente de agua, áreas bajo un esquema de incentivos para la conservación y áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (p. 40).

2.3.7 Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (2019)

CAPITULO I

Sistema Nacional De Áreas Protegidas

SECCIÓN 3 Categorías de manejo y zonificación de las áreas protegidas

Art. 146. Actividades permitidas.- Las actividades permitidas en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas serán aquellas relacionadas a la protección, conservación, investigación, uso y aprovechamiento sostenible de la biodiversidad, recuperación, restauración, manejo integral del fuego, educación, aspectos culturales, recreación, y turismo controlado, y las demás permitidas por la Autoridad Ambiental Nacional en coordinación con las autoridades competentes. Estas actividades serán reguladas y autorizadas por la Autoridad Ambiental Nacional, con base en la categoría de manejo de las áreas protegidas y el respectivo plan de manejo (p. 24).

CAPÍTULO X

Incendios forestales y manejo integral del fuego

Art. 369. Interés público.- Las acciones que se emprendan para el adecuado manejo integral del fuego e incendios forestales, con el fin de proteger y conservar el patrimonio natural y la biodiversidad son de interés público. Las medidas que se desarrollen y adopten para dicho fin, serán vinculantes en todos los niveles de gobierno, el sector privado y la población en general (p. 55).

Art. 370. Responsabilidad ciudadana.- El manejo integral del fuego implica un trabajo coordinado con los propietarios públicos y privados de los predios aledaños o que formen parte de las áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, áreas especiales para la conservación de la biodiversidad, y del Patrimonio Forestal Nacional, así como con la ciudadanía en general, quienes deberán incorporar acciones directas en materia de prevención (p. 55).

3. Materiales y métodos

3.1 Enfoque de la investigación

3.1.1 Tipo de investigación

- **Investigación aplicada**

Para Cordero (2009) la investigación aplicada se caracteriza por tener como objetivo la aplicación o utilización de los conocimientos alcanzados, al mismo tiempo que se adquieren otros, habiendo implementado y sistematizado la práctica basada en investigación. Por lo tanto, para esta investigación se emplearon Sistemas de información geográficos (SIG) en particular el software QGIS Versión 3.16, con la finalidad de generar mapas temáticos sobre la severidad de incendios forestales, la pérdida de la vegetación y la susceptibilidad física de la zona.

- **Investigación documental**

De acuerdo con Tancara (1993) la investigación documental es una serie de métodos y técnicas de búsqueda, procesamiento y almacenamiento de la información contenida en los documentos, en primera instancia, y la presentación sistemática, coherente y suficientemente argumentada de nueva información en un documento científico, en segunda instancia. Por consiguiente, para esta investigación se recopiló datos e información mediante revisión de revistas, artículos científicos, tesis, libros, manuales técnicos, información geográfica, entre otros, que guarden una relación la coherente entre sí siguiendo un orden de las fuentes consultadas.

3.1.2 Diseño de investigación

Este trabajo es de carácter no experimental, debido a que se utilizaron imágenes satelitales en programas de información geográfica con la finalidad de analizar la severidad de los incendios forestales y la susceptibilidad ante los mismo.

3.2 Metodología

3.2.1 Variables

3.2.1.1 Variable independiente

Imágenes Satelitales (Sentinel-2)

Relación de área quemada normalizada (NBR)

Relación de Quema Normalizada Diferenciada (dNBR)

3.2.1.2 Variable dependiente

Grado de severidad de los incendios forestales

Perdida de cobertura vegetal

3.2.2 Tratamientos

La presente investigación no aplica tratamiento ya que es de carácter no experimental

3.2.3 Diseño experimental

La presente investigación no aplica diseño experimental

3.2.4 Recolección de datos

3.2.4.1 Recursos

- **Materiales y equipos:** Imágenes satelitales Sentinel-2, laptop, productos cartográficos.
- **Recursos bibliográficos:** Artículos, libros, revista científica, información georreferenciada.
- **Software:** QGIS y Microsoft Office (Word y excel).
- **Recursos humanos:** Autor y la docente tutora, Oce. Leila Zambrano.

3.2.4.2 Métodos y técnicas

3.2.4.2.1 Delimitación de las áreas afectadas por incendios dentro de la reserva.

Para este objetivo se solicitó el registro de los incendios forestales suscitados en el área de estudio en el periodo 2016-2020 al Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE), esta base de datos se ingresó al SIG QGIS, para ubicar cada incendio suscitado en la reserva. Posteriormente se obtuvieron imágenes satelitales nivel 1-C y nivel 2-A de la misión Sentinel-2 a través de la plataforma Copernicus Open Access Hub.

Asimismo, solo se realizó la corrección atmosférica de las imágenes nivel 1-C puesto que las imágenes nivel 2-A ya cuentan con dicha corrección.

Después de las correcciones, se hizo el recorte (clip) del área de estudio y el cálculo del índice espectral NBR con la siguiente fórmula (UN-SPIDER, 2018):

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

Donde:

NIR: Infrarrojo cercano

SWIR: Infrarrojo de onda corta

Con este índice se obtuvo la delimitación del área quemada y su perímetro. Es importante mencionar que se calculó el NBR de las imágenes pre y post incendio.

3.2.4.2.2 Estimación de la severidad de los incendios y la pérdida de cobertura vegetal.

Para estimar la severidad se utilizó el dNBR (Difference Normalized Burn Ratio) el cual se obtiene de la siguiente expresión (UN-SPIDER, 2018):

$$dNBR = NBR \text{ prefuego} - NBR \text{ postfuego}$$

Las imágenes resultantes fueron reclasificadas según la categoría de severidad (Tabla 5) publicada por el programa FIREMON del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (Lutes, et al., 2006).

Tabla 5. Clasificación utilizada para los rangos de severidad

Valores del dNBR	Severidad de quemadura
<-0.25	Alto recrecimiento post - fuego
<-0.25 a -0.1	Bajo recrecimiento después del fuego
-0.1 a 0.1	Sin quemar
0.1 a 0.27	Quemadura de baja severidad
0.27 a 0.44	Severidad moderada - baja
0.44 a 0.66	Severidad moderada - alta
> 0.66	Severidad alta

Lutes, et al., 2006

Posteriormente, se realizaron la clasificación supervisada de las imágenes pre-incendio, a través de herramientas del software QGIS, para obtener los polígonos de las clases correspondientes a usos y cobertura vegetal y junto con los polígonos de las áreas quemadas, mediante la intersección de los datos mencionados se obtiene la cobertura vegetal perdida por efectos del fuego.

3.2.4.2.3 Identificación espacial de áreas susceptibles a la ocurrencia de incendios forestales.

Se utilizó la metodología propuesta por el Subsecretaría de Gestión de la Información y Análisis de Riesgos (SGIAR, 2019) para generar Mapas de Susceptibilidad Física a la Ocurrencia de Incendios Forestales. Para esto se emplearon los siguientes productos cartográficos:

- Modelo digital de Elevación disponible.
- Isoyetas- Interpolación a ráster de precipitación.
- Isotermas- Interpolación a ráster de temperatura.
- Capa de Geopedología - Textura del Suelo.
- Capa de Uso actual del Suelo- Cobertura vegetal. (MAGAP, 2020)
- Capa de Radiación.

Además, se emplearán las siguientes ecuaciones:

$$\text{Entrada radiación} = \text{Radiación} \times 0.75 + \text{elevación} \times 0.25$$

$$\text{Entrada Humedad} = \text{Precipitación} \times 0.35 + \text{cobertura vegetal} \times 0.15$$

$$+ \text{pendiente} \times 0.10 + \text{textura del suelo} \times 0.25 + \text{temperatura} \times 0.15$$

$$\text{Susceptibilidad física} = \text{Cobertura vegetal} \times 0.57 + \text{entrada humedad} \times 0.07$$

$$+ \text{entrada radiación} \times 0.17 + \text{temperatura} \times 0.09 + \text{textura del suelo} \times 0.10$$

Finalmente, se obtuvieron los niveles de susceptibilidad física y su distribución espacial, enmarcada en una escala de 5 niveles (Tabla 6), definiendo las siguientes clases (SGIAR, 2019):

Tabla 6. Niveles de susceptibilidad física a la ocurrencia de incendios forestales

Susceptibilidad ante incendios forestales	
Niveles	Descripción
 Muy baja	Escasa o nula probabilidad de ocurrencia de incendios forestales
 Baja	Incendios forestales pueden ocurrir bajo comportamiento natural anómalo muy puntual
 Media	Ocurrencia de incendios forestales responde a la ciclicidad normal de convergencia de variables naturales asociadas
 Alta	Todas las condiciones estáticas necesarias para la ocurrencia de incendios forestales
 Muy Alta	Todas las condiciones estáticas suficientes para la ocurrencia de incendios forestales. procesos de ignición latentes.

SGIAR, 2019

3.2.5 Análisis estadístico

El presente trabajo se utilizó un análisis estadístico descriptivo basado en los datos obtenidos en la investigación, estos fueron representados en tablas comparativas y gráficos para una clara comprensión de los datos.

Por otra parte, para la validación de los resultados obtenidos en la clasificación supervisada, se utilizó el índice Kappa. Éste se representa según la fórmula:

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c}$$

Siendo:

P_o = Número de aciertos/ Número total de clases

P_e = Cálculo generado desde la matriz de confusión.

El índice mide la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación con un software y la exactitud de lograr una clasificación correcta con una clasificación visual (en campo o con imágenes de alta resolución) (Verna, et al.,2016). En cuanto a la ejecución del cálculo se usó la herramienta Accuracy Assessment del software QGIS.

Para interpretar el valor de k se dispone de la siguiente escala (Tabla 7):

Tabla 7. Valor del índice Kappa

Coefficiente Kappa	Fuerza de Concordancia
0	Pobre
0,01-0,20	Leve
0,21-0,40	Aceptable
0,41-0,60	Moderada
0,61-0,80	Considerable
0,81-1,00	Casi perfecta

Altman, 1991

4. Resultados

4.1 Delimitar las áreas afectadas por incendios de la Reserva Ecológica “Los Ilinizas” utilizando imágenes satelitales Sentinel-2 en el período 2016-2020.

El Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias proporcionó información sobre los incendios suscitados en la RELI (Tabla 8), la misma sirvió de guía para descargar las imágenes satelitales necesarias. Los datos concedidos muestran que en el periodo 2016-2020 identificaron 17 incendios.

Tabla 8. Incendios forestales en la RELI.

N°	Parroquias	Latitud	Longitud	Evento	Fecha
1	La Maná	-1.064.207	-79.130.752	Incendio Forestal	14/8/2016
2	Aloasi	-0.522644	-78.645.341	Incendio Forestal	17/8/2017
3	El Chaupi	-0.548351	-78.664.566	Incendio Forestal	19/10/2017
4	Tingo	-0.925155	-79.097.073	Incendio Forestal	11/10/2018
5	El Chaupi	-0.596537	-78.684.776	Incendio Forestal	4/12/2018
6	Sigchos	-0.532056	-78.925.651	Incendio Forestal	28/8/2018
7	Chugchilán	-0.850547	-79.012.378	Incendio Forestal	28/10/2018
8	Toacaso	-0.6775	-786.889	Incendio Forestal	16/2/2019
9	Toacaso	-0.693887	-78.682.041	Incendio Forestal	21/8/2019
10	Aloasi	-0.543261	-78.641.733	Incendio Forestal	30/6/2019
11	El Chaupi	-0.611838	-78.675.861	Incendio Forestal	11/9/2019
12	El Chaupi	-0.623356	-78.699.937	Incendio Forestal	13/9/2019
13	El Chaupi	-0.644015	-78.705.687	Incendio Forestal	15/9/2019
14	San Juan de Pastocalle	-0.690279	-78.676.881	Incendio Forestal	26/3/2020
15	Sigchos	-0.762569	-79.015.697	Incendio Forestal	3/11/2020
16	Chugchilán	-0.832857	-78.996.689	Incendio Forestal	4/11/2020
17	El Chaupi	-0.537778	-78.668.611	Incendio Forestal	3/11/2020

SNGRE, 2021

Se descargaron y procesaron las imágenes (Tabla 9) más cercanas a las fechas de los incendios de la tabla 5 y con el menor porcentaje de nubosidad en el área de estudio.

Tabla 9. Imágenes satelitales del periodo 2016-2020

Fecha	Nombre del paquete de imágenes
10/8/2016	S2A_MSIL1C_20160810T153622_N0204_R068_T17MQU
	S2A_MSIL1C_20160810T153622_N0204_R068_T17MQV
29/10/2016	S2A_MSIL1C_20161029T153622_N0204_R068_T17MQU
	S2A_MSIL1C_20161029T153622_N0204_R068_T17MQV
16/7/2017	S2A_MSIL1C_20170716T153621_N0205_R068_T17MQU
	S2A_MSIL1C_20170716T153621_N0205_R068_T17MQV
13/12/2017	S2A_MSIL1C_20171213T154241_N0206_R068_T17MQU
	S2A_MSIL1C_20171213T154241_N0206_R068_T17MQV
16/7/2018	S2B_MSIL1C_20180716T153619_N0206_R068_T17MQU
	S2B_MSIL1C_20180716T153619_N0206_R068_T17MQV
24/10/2018	S2B_MSIL1C_20181024T153619_N0206_R068_T17MQU
	S2B_MSIL1C_20181024T153619_N0206_R068_T17MQV
30/8/2019	S2B_MSIL2A_20190830T153619_N0213_R068_T17MQU
	S2B_MSIL2A_20190830T153619_N0213_R068_T17MQV
9/9/2019	S2B_MSIL2A_20190909T153619_N0213_R068_T17MQU
	S2B_MSIL2A_20190909T153619_N0213_R068_T17MQV
19/8/2020	S2B_MSIL2A_20200804T153619_N0214_R068_T17MQU
	S2B_MSIL2A_20200804T153619_N0214_R068_T17MQV
3/9/2020	S2B_MSIL2A_20200903T153619_N0214_R068_T17MQU
	S2B_MSIL2A_20200903T153619_N0214_R068_T17MQV

Zappa, 2021

Respecto a las áreas afectadas en la RELI, en el periodo de años analizado se delimitaron total de 20505 incendios con un área de 12306,03 ha que representaría el 9,18% del área total de la RELI, los años 2017 y 2018 fueron lo que presentaron la mayor área afectada por incendios, con 1760,32 ha y 7833,57 ha respectivamente (Tabla 10), y este último tiene el mayor número de incendios identificado con 11160 incendios.

Tabla 10. Superficie afectada por el fuego en la RELI

Año	N° Incendios	Superficie afectada (ha)	% Superficie Total RELI
2016	3770	1478,79	1,10
2017	3846	1760,32	1,31
2018	11160	7833,57	5,84
2019	316	894,92	0,67
2020	1413	338,43	0,25
Total	20505	12306,03	9,17

Zappa, 2021

En la figura 2 se logra dimensionar la cantidad de incendios registrados para los diferentes años, es importante mencionar que la extensión de los incendios va desde 0.01 ha hasta 722.23 ha, este último se produjo en el año 2019, y es el que abarca mayor extensión de todos los delimitados en el periodo 2016-2020.

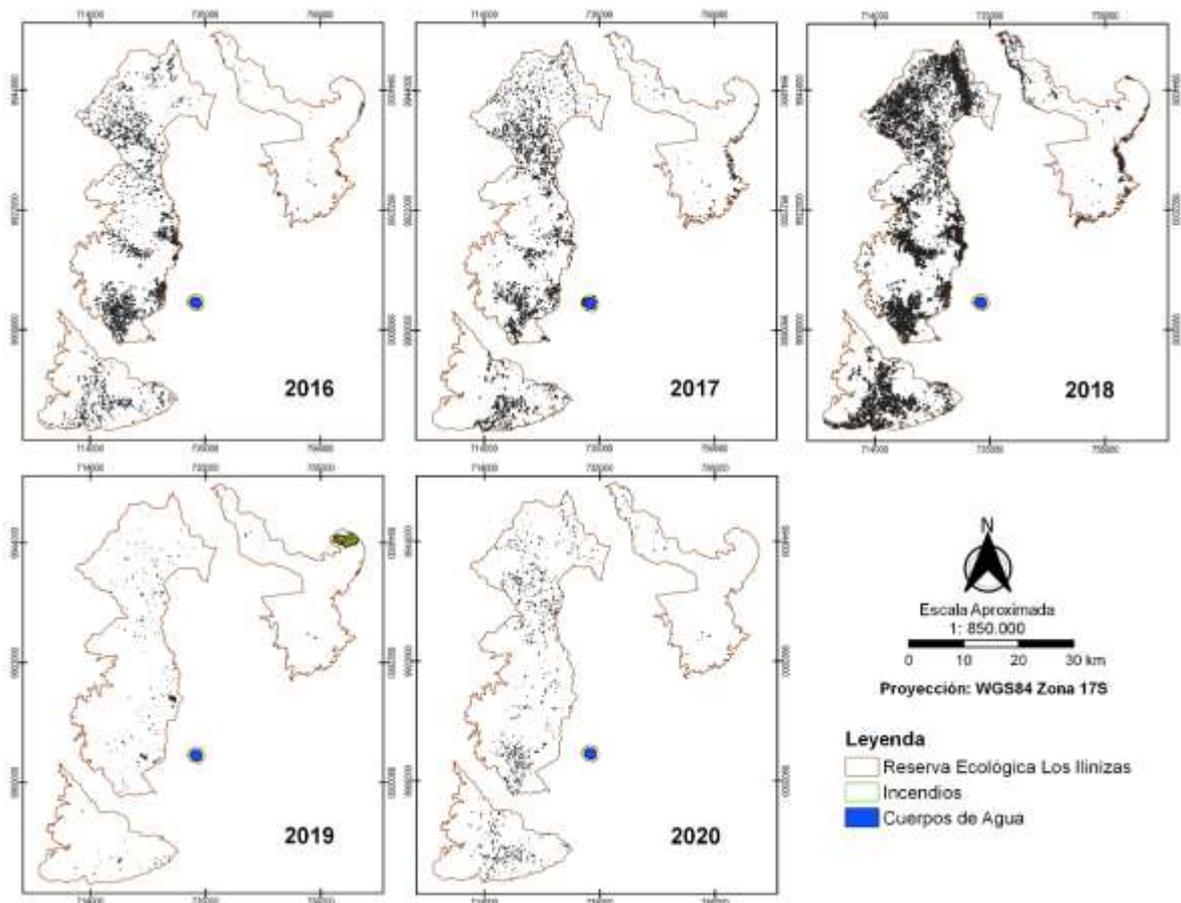


Figura 1. Incendios suscitados en la RELI en el periodo 2016-2020
Zappa, 2021

4.2 Estimar la severidad de los incendios forestales mediante el cálculo de los índices NBR y dNBR y la pérdida de cobertura vegetal utilizando sistemas de información geográfica, QGIS.

Después de los cálculos realizados, los mapas se clasificaron según la metodología propuesta y para el análisis solo se consideraron las categorías, severidad moderada- baja (SMB) severidad moderada- alta (SMA) y severidad alta (SA).

Para poder comprender la dimensión de la severidad de los incendios, se muestra la figura 2 que presenta la cuantificación del evento, en donde se puede observar que de toda la superficie quemada en el periodo 2016-2020, el 75,12% corresponde a un grado de severidad moderada- baja, el 18,38% de la zona ha sufrido incendios de moderada-alta severidad, mientras que el 6,50% cuenta con una severidad alta, del mismo modo destacan las clases SMB y SMA por el área que afectaron en el año 2018 con 6443,60 ha y 1169,63 ha respectivamente y la clase SA con 337,44 ha en el 2019 (Ver tabla 11).

Tabla 11. Superficie en hectáreas por índice de severidad.

Grado de Severidad	2016	2017	2018	2019	2020
Moderada - baja	1145,86	1215,06	6443,60	148,15	291,27
Moderada - alta	264,59	375,84	1169,63	409,33	42,77
Severidad alta	68,34	169,41	220,34	337,44	4,39
Total	1478,79	1760,32	7833,57	894,92	338,43

Zappa, 2021

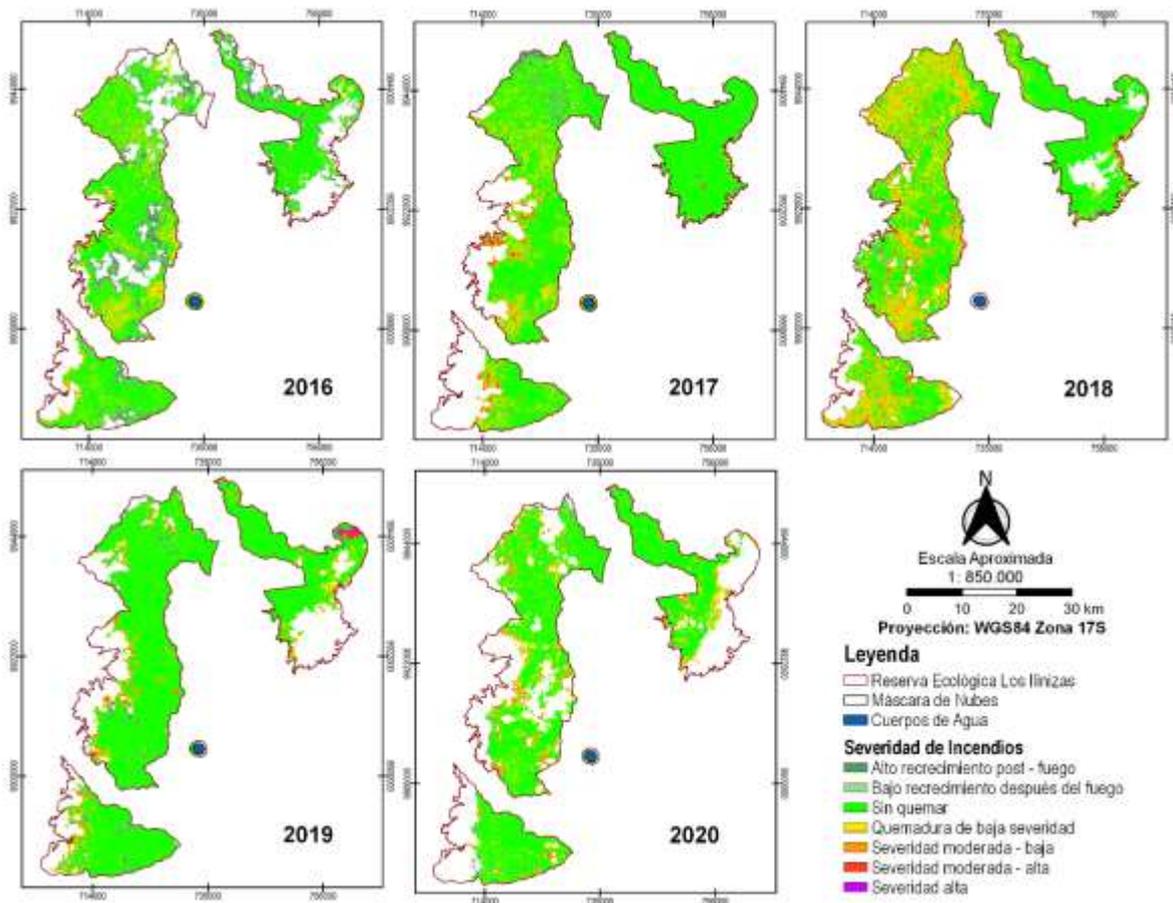


Figura 2. Severidad de los incendios forestales en la RELI periodo 2016-2020 Zappa, 2021

Cabe aclarar que la extensión de la máscara de nubes es significativa debido a esta es producto de la sumatoria de las nubes de las imágenes pre y post incendios.

Posteriormente se calculó la cobertura vegetal perdida producto del fuego, para esto se realizó la clasificación supervisada de las imágenes pre-incendio. La precisión de las clasificaciones se midió con el índice Kappa y en todos los años del periodo analizado se obtuvo una fuerza de concordancia casi perfecta (Ver tabla 12).

Tabla 12. Resultados de la precisión mediante índice Kappa en las clasificaciones de los usos y coberturas de suelo

Años	Coefficiente Kappa
2016	0,87
2017	0,89
2018	0,86
2019	0,84
2020	0,93
Zappa, 2021	

Según lo anteriormente expuesto, se tiene que en el área de estudio se encuentran 5 tipos de usos y coberturas diferentes, entre los cuales destacan bosque (BQ), cuerpos de agua (CA), área sin vegetación (ASV), tierra agrícola (TA) y vegetación arbustiva y herbácea (VAH). Para el análisis de la pérdida de cobertura solo se solo consideraron BQ y VAH, además la máscara de nubes solo fue contabilizada.

De acuerdo con la cantidad de superficie utilizada por cada uso y cobertura de suelo, se tiene que, en el año 2016, existe un predominio por parte de la cobertura correspondiente a BQ con un 48,26% de la superficie del área, seguido por la TA, que ocupa un 27,13%, luego VAH, con un 10,69%, siendo esta última, la cobertura vegetal que tuvo el mayor número de hectáreas afectadas en la clase severidad moderada-baja con 336,15 ha y severidad moderada-alta con 49,96 ha, de este modo, esta es la cobertura vegetal con más alteraciones (388,97 ha) (Ver tabla 13 y figura 3).

Tabla 13. Usos y coberturas de suelo de acuerdo con la superficie y sus índices de severidad en el área de incendio del año 2016.

Uso y Cobertura	Superficie en hectáreas total y porcentaje		índice de severidad en hectáreas			Total
			Severidad moderada - baja	Severidad moderada - alta	Severidad alta	
Máscara de Nubes	14871,65	11,08	-	-	-	-
Bosque	64782	48,26	23,11	1,13	0,55	24,79
Cuerpos de Agua	1000,92	0,75	0,79	2,19	1,54	4,52
Área sin Vegetación	2813,38	2,10	108,94	123,80	53,72	286,45
Tierra Agrícola	36419,70	27,13	676,87	87,52	9,67	774,06
Vegetación Arbustiva y Herbácea	14345,60	10,69	336,15	49,96	2,86	388,97
Total	134233,25	100	1145,86	264,59	68,34	1478,79

Zappa, 2021

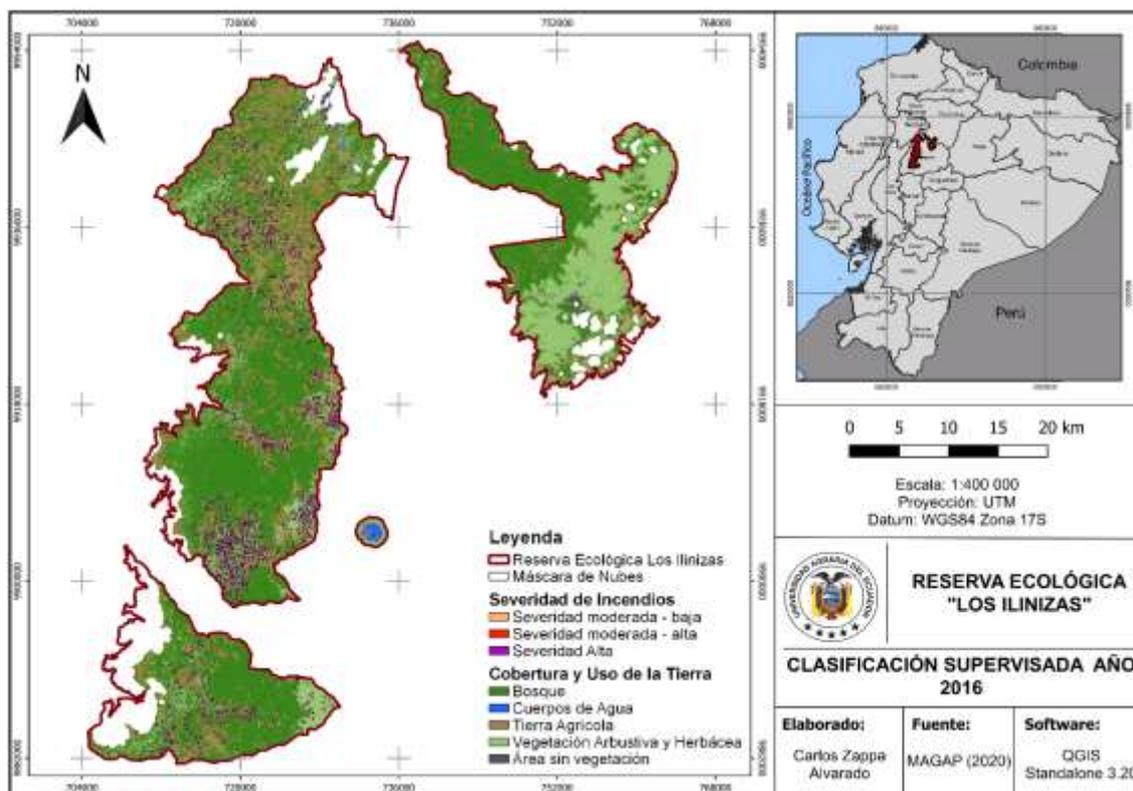


Figura 3. Coberturas y usos de la tierra clasificados y áreas quemadas del año 2016
Zappa, 2021

Para el año 2017, existe una preponderancia de las coberturas y usos de suelo BQ con 55,02%, TA que ocupa un 27,69% y por último VAH, con 13,88%. De igual manera, la cobertura vegetal que mayor número de hectáreas afectadas en las clases severidad moderada-baja, moderada-alta y severidad alta es BQ con 328,35 ha, 148,98 ha y 91,31 ha respectivamente, al mismo tiempo es la cobertura vegetal más hectáreas perdió a causa del fuego (568,64 ha) (Ver tabla 14 y figura 4).

Tabla 14. Usos y coberturas de suelo de acuerdo con la superficie y sus índices de severidad en el área de incendio del año 2017.

Uso y Cobertura	Superficie en hectáreas total y porcentaje		índice de severidad en hectáreas			Total
			Severidad moderada - baja	Severidad moderada - alta	Severidad alta	
Máscara de Nubes	1920,25	1,43	-	-	-	-
Bosque	73858	55,02	328,35	148,98	91,31	568,64
Cuerpos de Agua	280,66	0,21	-	-	-	0,00
Área sin Vegetación	2374,64	1,77	0,719	0,10	-	0,82
Tierra Agrícola	37169,70	27,69	721,21	170,64	65,31	957,16
Vegetación Arbustiva y Herbácea	18630,00	13,88	164,79	56,12	12,79	233,70
Total	134233,25	100	1215,06	375,84	169,41	1760,32

Zappa, 2021

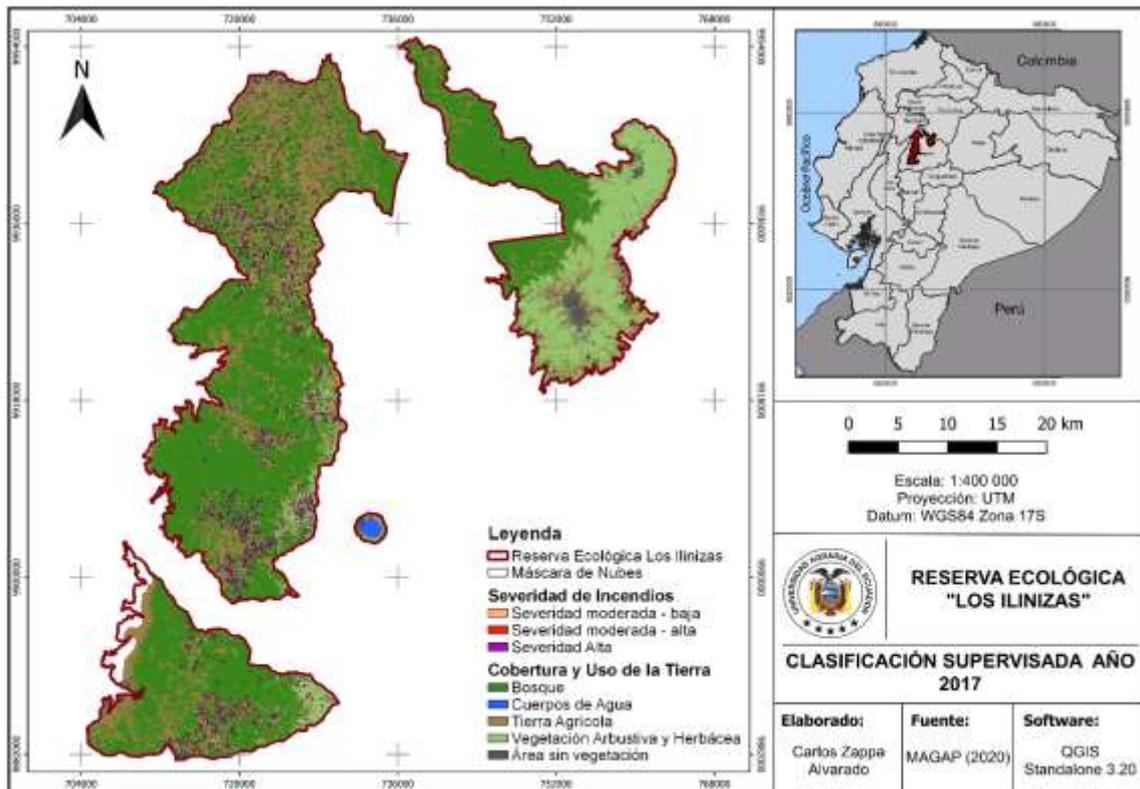


Figura 4. Coberturas y usos de la tierra clasificadas y áreas quemadas del año 2017 Zappa, 2021

Con respecto a las coberturas y usos de suelo que destacan por su extensión en el año 2018, son BQ con 55,66%, seguido por TA con un 26,57%, y VAH con 11,48%. Asimismo, se determinó la preponderancia de las clases severidad moderada-baja, moderada-alta y severidad alta es en la cobertura BQ con 1904,37 ha, 366,90 ha y 94,56 ha respectivamente, también es la cobertura vegetal con mayor afectación (2365,83 ha) (Ver tabla 15 y figura 5).

Tabla 15. Usos y coberturas de suelo de acuerdo con la superficie y sus índices de severidad en el área de incendio del año 2018.

Uso y Cobertura	Superficie en hectáreas total y porcentaje		índice de severidad en hectáreas			Total
			Severidad moderada - baja	Severidad moderada - alta	Severidad alta	
Máscara de Nubes	6928,58	5,16	-	-	-	-
Bosque	74716,2	55,66	1904,37	366,90	94,56	2365,83
Cuerpos de Agua	372,31	0,28	0,11	-	-	0,11
Área sin Vegetación	1140,26	0,85	6,54	1,62	0,14	8,30
Tierra Agrícola	35671,50	26,57	4038,6	696,92	111,83	4847,35
Vegetación Arbustiva y Herbácea	15404,40	11,48	493,98	104,19	13,81	611,98
Total	134233,25	100	6443,60	1169,63	220,34	7833,57

Zappa, 2021

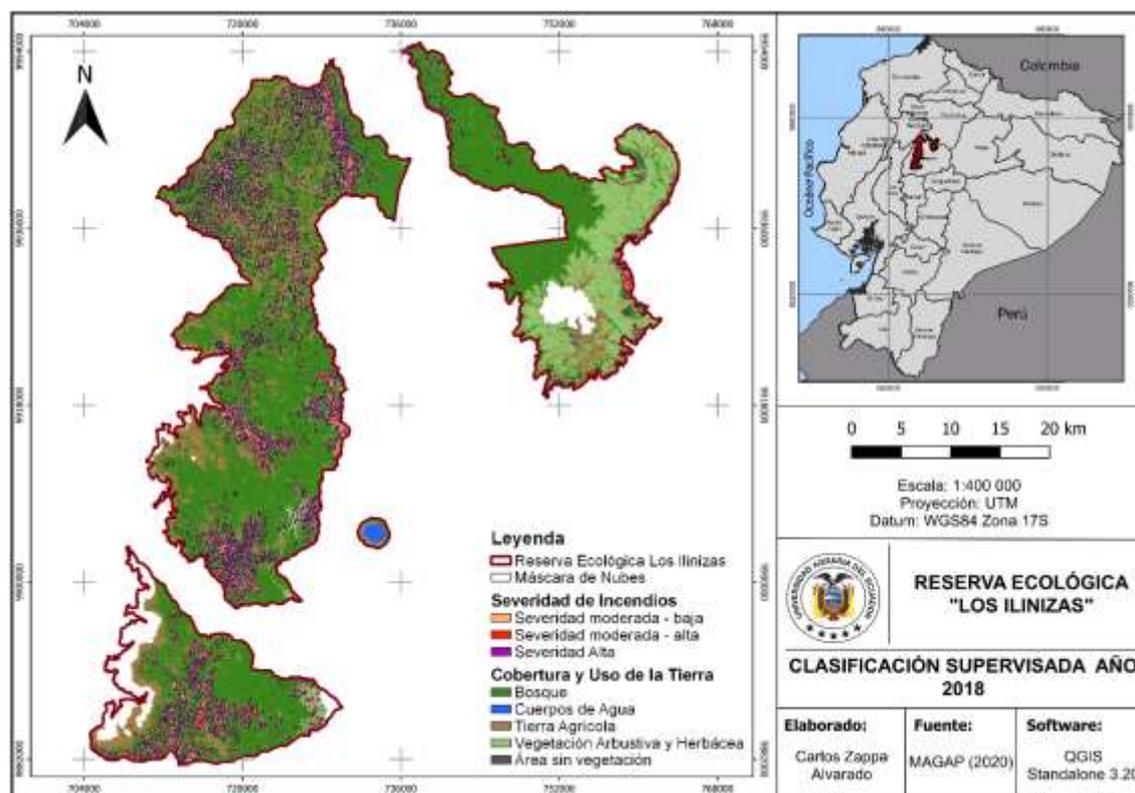


Figura 5. Coberturas y usos de la tierra clasificados y áreas quemadas del año 2018
Zappa, 2021

Se identificó que las coberturas y usos de suelo que despuntan por el área que abarcan en el 2019 son BQ con 47,14%%, TA con un 28,93%, y VAH con 12,20%. De este modo, por parte de las clases de severidad moderada-baja, moderada-alta y severidad alta, destaca la cobertura vegetal VAH con 58,86 ha, 350,62 ha y 303,75 ha, de esta clasificación (VAH) se registró 713 ha en pérdidas de cobertura vegetal (Ver tabla 16 y figura 6).

Tabla 16. Usos y coberturas de suelo de acuerdo con la superficie y sus índices de severidad en el área de incendio del año 2019.

Uso y Cobertura	Superficie en hectáreas total y porcentaje		índice de severidad en hectáreas			Total
			Severidad moderada - baja	Severidad moderada - alta	Severidad alta	
Máscara de Nubes	8381,35	6,24	-	-	-	-
Bosque	63279,6	47,14	33,55	14,32	8,99	56,86
Cuerpos de Agua	603,92	0,45	0,45	0,04	-	0,49
Área sin Vegetación	6758,18	5,03	2,93	3,28	1,71	7,92
Tierra Agrícola	38829,10	28,93	52,36	41,07	22,99	116,42
Vegetación Arbustiva y Herbácea	16381,10	12,20	58,86	350,62	303,75	713,23
Total	134233,25	100	148,15	409,33	337,44	894,92

Zappa, 2021

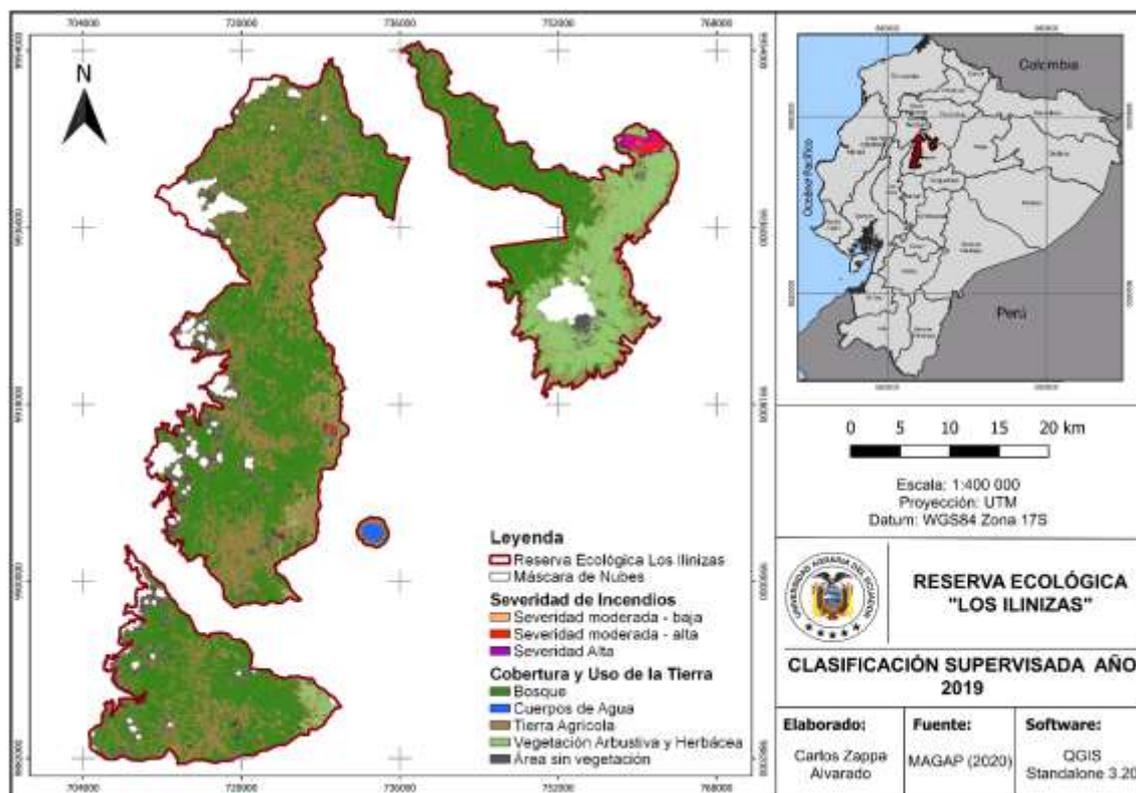


Figura 6. Coberturas y usos de la tierra clasificadas y áreas quemadas del año 2019 Zappa, 2021

Ahora bien, el año 2020 referente a las coberturas y usos de suelo resaltan BQ con 42,65%, seguido por TA con un 26,50%, y VAH con 12,62%. De modo similar, se estimó que este año cuenta con la menor cantidad de áreas afectadas, solo destaca la cobertura BQ en las clases severidad moderada-baja, moderada-alta y severidad alta con 1904,37 ha, 366,90 ha y 94,56 ha respectivamente, al mismo tiempo, es la cobertura vegetal con mayor afectación (2365,83 ha) (ver tabla 17 y figura 7).

De todas las áreas afectadas por el fuego (12306,03 ha), solo 11989,40 ha modificaron la cobertura preexistente y la diferencia está distribuida en las categorías CA) y ASV.

Tabla 17. Usos y coberturas de suelo de acuerdo con la superficie y sus índices de severidad en el área de incendio del año 2020.

Uso y Cobertura	Superficie en hectáreas total y porcentaje		índice de severidad en hectáreas			Total
			Severidad moderada - baja	Severidad moderada - alta	Severidad alta	
Máscara de Nubes	14668,32	10,93	-	-	-	-
Bosque	57252,6	42,65	71,80	11,26	0,54	83,60
Cuerpos de Agua	224,16	0,17	-	-	-	-
Área sin Vegetación	9577,97	7,14	5,37	2,61	0,04	8,02
Tierra Agrícola	35565,80	26,50	206,07	25,05	3,54	234,66
Vegetación Arbustiva y Herbácea	16944,40	12,62	8,03	3,85	0,27	12,15
Total	134233,25	100	291,27	42,77	4,39	338,43

Zappa, 2021

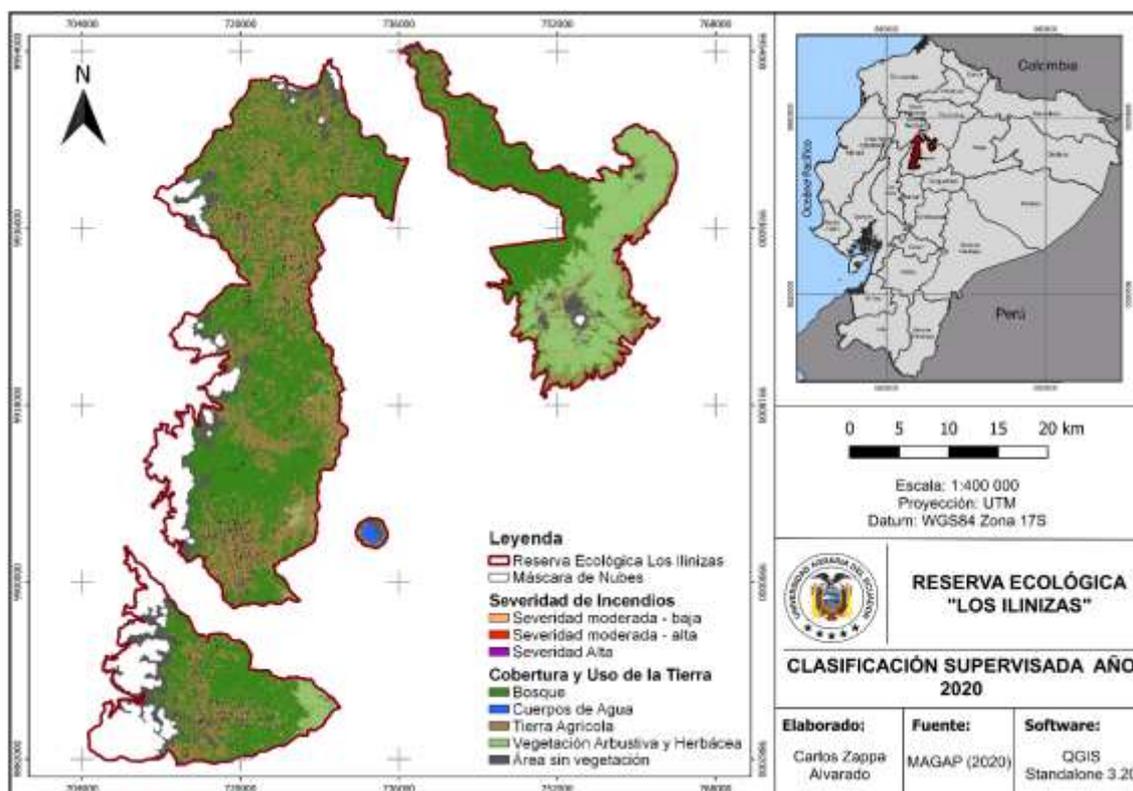


Figura 7. Coberturas y usos de la tierra clasificados y áreas quemadas del año 2020
Zappa, 2021

4.3 Identificar espacialmente las áreas susceptibles a la ocurrencia de incendios forestales empleando mapas temáticos.

En la tabla 18 se muestra el material cartográfico sugerido por la SNGRE para el tratamiento geomático para la generación del mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de incendios forestales.

Tabla 18. Material cartográfico utilizado

Productos Cartográficos	Fuente
Modelo digital de elevación 12.5 m	ALOS PALSAR, 2010
Isotermas Serie 1981-2010	INAMHI, 2017
Isoyetas Serie 1981-2010	INAMHI, 2017
Mosaico Geopedológico 1:25000	IGM, 2015
Mapa de Cobertura y uso de la tierra y Sistemas productivos agropecuarios del Ecuador continental 1:25000	MAGAP, 2020

Zappa, 2021

Las variables establecidas por la metodología fueron ponderadas y reclasificadas, los cuales tienen valoración del 1 al 5 (Ver figura 8).

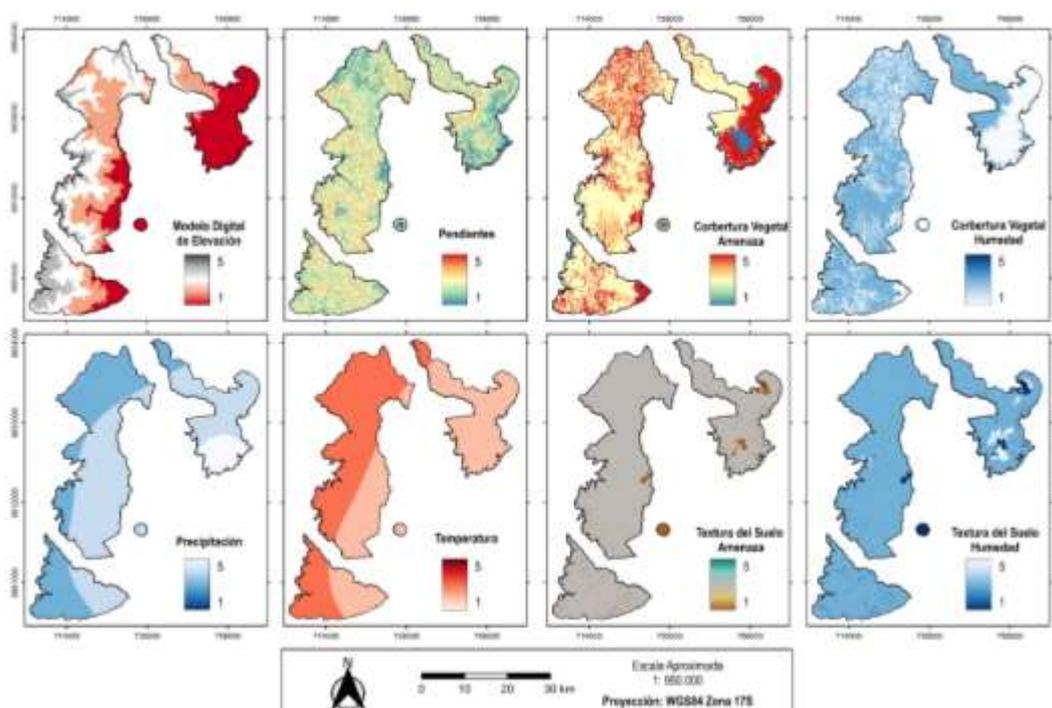


Figura 8. Ponderaciones y reclasificaciones del material cartográfico Zappa, 2021

Una vez aplicada las fórmulas del Índice de susceptibilidad se clasificó el área de estudio en zonas de susceptibilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta, teniendo como resultado el mapa de zonas susceptibles a la ocurrencia de incendios forestales de la RELI como se presenta en la figura 9.

Se evidencia que 57,86% de la superficie de la reserva presenta una susceptibilidad alta, 28,96% muy alta y media con un 10,66% principalmente distribuidas en el norte y sur del área de estudio, mientras que las zonas con susceptibilidad baja ocupan el un porcentaje menor de la superficie con un 2,52% distribuido principalmente el área nororiental de la RELI. En este sentido el área de estudio está dominada por la susceptibilidad alta y muy alta que ocupan el 86,82 % de la superficie.

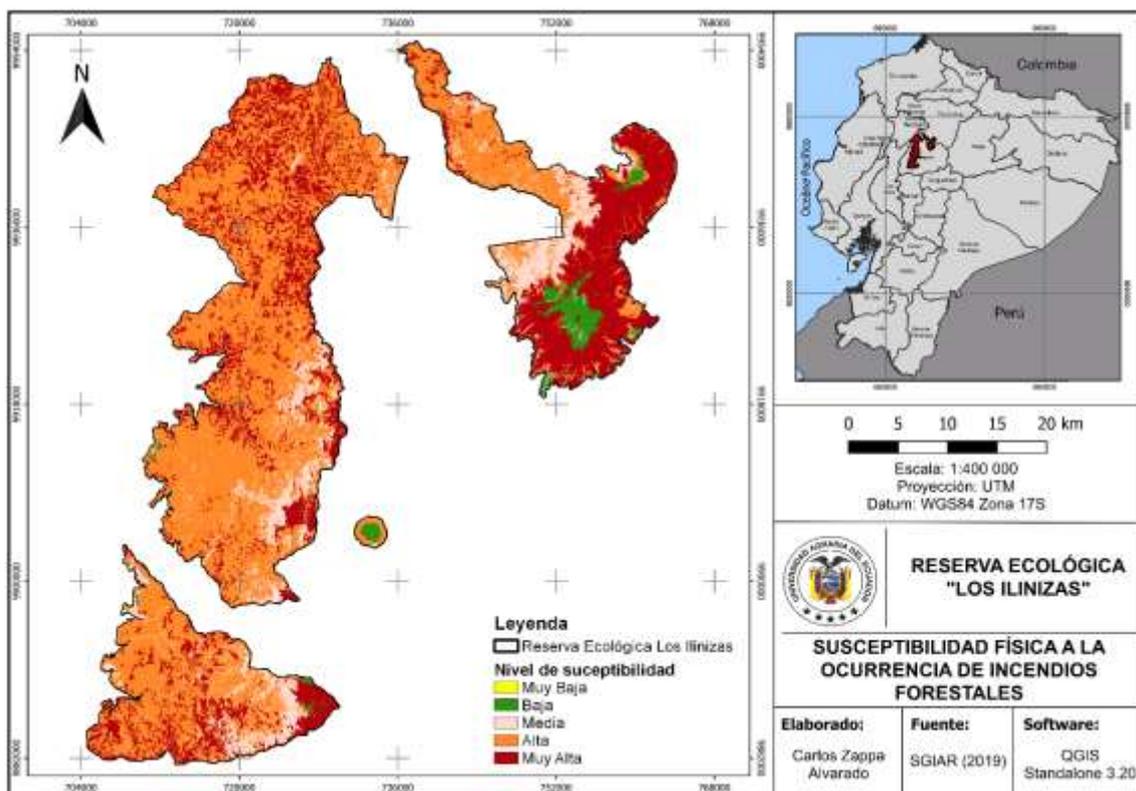


Figura 9. Zonas susceptibles a incendios de la Reserva Ecológica Los Ilinizas Zappa, 2021

En la figura 10 se procede a superponer los incendios suscitados en el periodo 2016-2020 con mapa de zonas susceptibles a la ocurrencia de incendios forestales, lo cual permitió evidenciar que el 95,41% de los incendios coinciden con la susceptibilidad alta y muy alta, mientras para la susceptibilidad media y baja el 4,59% (Ver tabla 19), con esto se puede asegurar que el modelo de susceptibilidad establecido se adaptó a el área de estudio.

Tabla 19. Coincidencia de incendios y niveles de susceptibilidad

Nivel de susceptibilidad	Número de incendios y porcentaje	
Baja	244	1,19
Media	697	3,40
Alta	10132	49,41
Muy Alta	9432	46,00
Total	20505	100,00

Zappa, 2021

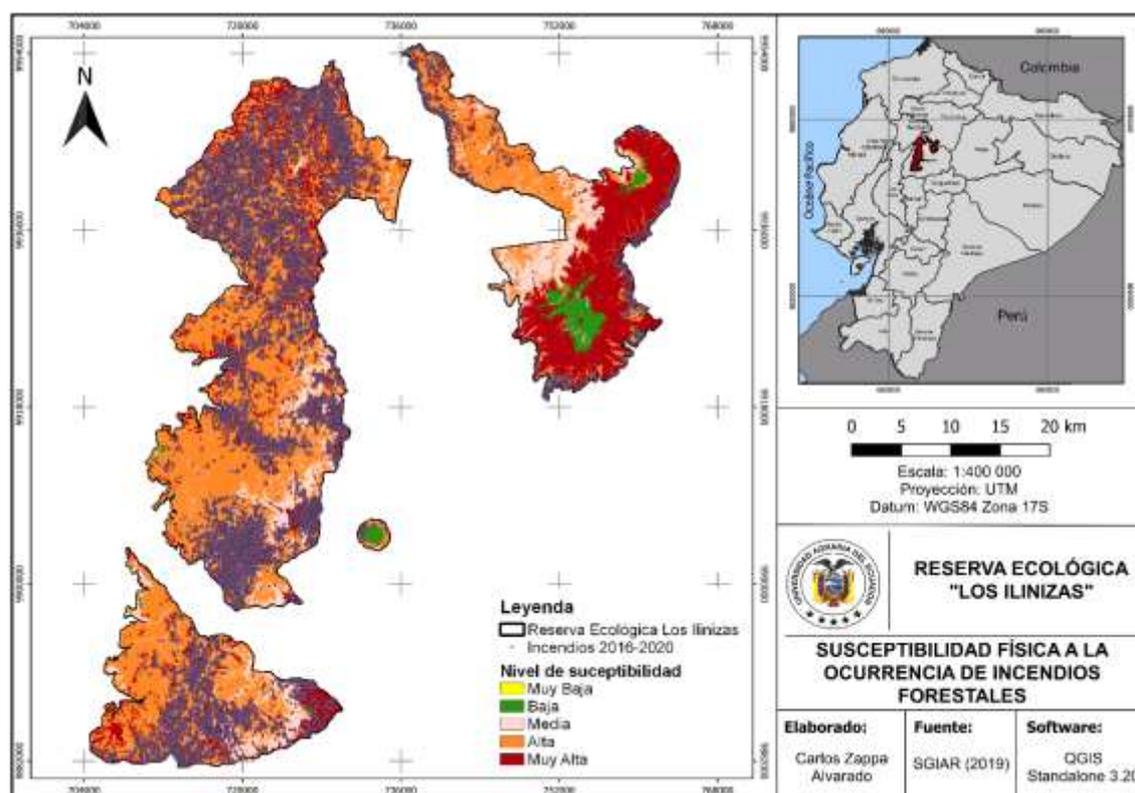


Figura 10. Superposición de las áreas afectadas y las zonas susceptibles a incendios de la RELI.
Zappa, 2021

5. Discusión

Picos, et al. (2019) constataron que la presencia de arroyos es una de las principales causas de la reducción de la gravedad de los incendios en latifoliadas. Y la ocurrencia de incendios está ligada con la severidad de los mismo, dependiendo de la cobertura del suelo. Se coincide en que la ocurrencia de los depende del tipo de cobertura puesto que se evidenció que, en la tierra agrícola, bosque, vegetación arbustiva y herbácea se dieron el 64,14%, 26,77% y 8,5% de los incendios respectivamente debido a que el tipo de cobertura sirve como combustible y puede ser un factor que contribuye a la propagación del fuego, además este trabajo no consideró el papel que juegan los cuerpos de agua en la severidad del fuego.

Saputra, et al. (2017) determinaron que se quemaron alrededor de 42.906,00 ha del bosque de turba, dichas áreas quemadas se clasificaron en cuatro categorías, es decir, sin quemar, baja, extrema y moderadamente extrema. En esta tesis el área quemada es mucho menor, por lo tanto, se reduce la posibilidad a cometer errores, asimismo, se analizaron tres categorías, severidad moderada- baja, severidad moderada- alta y severidad alta debido a que las nubes y su sombra que no fueron enmascaradas en su totalidad eran detectadas como un nuevo rebrote de vegetación y afectaciones de severidad baja.

En la investigación de Campos, et al. (2021) con el índice NBR identificaron las afectaciones de los incendios entre 176 y 307 ha y que el uso de las imágenes Sentinel-2 permiten mapear la severidad de un incendio para unidades mayores o iguales a 400 m². Se discrepa los resultados de este estudio puesto que se identificaron incendios de 0.01 ha (100 m²) hasta 722.23 ha (7'222.300 m²), por ende, se podrían mapear unidades mayores o iguales a 100 m² no obstante, es

necesario señalar que con esta superficie no se alcanzaría a distinguir más de un grado de severidad.

Fornacca, et al. (2018) determinaron que el Normalized Burn Ratio (NBR) y el Normalized Difference Moisture Index (NDMI) están entre los tres con mejor rendimiento para la detección de las cicatrices de incendio a partir de 1 año después del incendio, pero no para la evaluación inmediata después del incendio. Se difiere de los autores ya que en el periodo 2016-2020 se pudieron identificar cicatrices de hasta un día después de haber ocurrido el incendio, es decir, el NBR puede ser utilizado para evaluaciones inmediatas.

Zavala et al. (2019) analizaron el periodo 2013-2017 e identificaron 1260.73 ha de áreas quemadas, de las cuales en 1030,12 ha alteró su cobertura y uso del suelo, el resto permaneció sin cambio, además establecen que, para obtener mejores resultados, es necesario validar con imágenes satelitales de alta resolución. A diferencia de los resultados de los autores, el área identificada fue mayor (12306,03 ha) y de estas se afectaron 11989,40 ha, igualmente se concilia con los investigadores que al utilizar imágenes de calidad se mejora la visualización y delimitación de las zonas afectadas. Cabe aclarar que el índice NBR debe ser complementado con foto interpretación.

6. Conclusiones

La información proporcionada por el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias no coincide con los incendios cartografiados, algo semejante ocurre con la identificación de los incendios puesto que la entidad registró 17 y en este estudio 20505 incendios con un área afectada de 12306,03 ha, de igual manera se comprobó que el NBR es eficiente en la detección de áreas quemadas.

El área de estudio al estar en un terreno montañoso, presentar nubosidad frecuente y una regeneración de la vegetación relativamente rápida, dificultan la extracción sistemática de las áreas quemadas, la evaluación de los impactos y la recuperación. Además, los datos obtenidos del dNBR en el periodo 2016-2020 muestran que en el grado de severidad moderada-baja se afectaron 9243,94 ha, para la severidad moderada-alta 2262,17 ha y severidad alta 799,92 ha. Asimismo, la cobertura vegetal más afectada fue el "Bosque" con 3099,72 ha perdidas.

El 86,82 % del área de la RELI cumple con todas las condiciones estáticas para la ocurrencia de incendios distribuidas principalmente en el bloque nororiental y noroccidental de la reserva, no obstante, la reserva no cuenta con ecosistemas dependientes del fuego, lo cual indica que estos pueden ser desencadenados por actividades antrópicas.

7. Recomendaciones

Se sugiere que, al mapear los incendios, el índice NBR sea complementado con fotointerpretación empleando imágenes de alta resolución, combinación de bandas y probar con los valores de contraste y saturación de la capa y de este modo facilitar el mapeo de los incendios.

Para el análisis de la severidad de incendios con el índice dNBR es esencial contar con imágenes satelitales sin nubes en el área de estudio y antes de aplicar la máscara de nubes se recomienda editar los polígonos, esto con la finalidad de cubrir las sombras de las nubes y evitar falsas detecciones.

Es fundamental que las autoridades pertinentes actualicen el plan de manejo del 2008 de la RELI, e incorporar nuevas tecnologías geoespaciales para el monitoreo de las áreas protegidas, además, tomar en cuenta este tipo de investigaciones para elaborar estrategias para prevenir y proteger la biodiversidad de la reserva y de este modo evitar daños en los ecosistemas.

Es importante socializar los resultados de esta investigación con los dirigentes de las comunidades que se relacionan directa e indirectamente con la RELI para tomar las medidas necesarias para la reducción de los efectos causados por incendios.

Es necesario mejorar diversos aspectos ligados con la resolución espacial de los datos entregados por organismos públicos, de igual manera, ser más rigurosos en la calidad de la información, debido a que muchos de estos datos se encuentran desactualizados puesto que, para la generación de cartografías preventivas de calidad, la información cartográfica debe ser confiable, actualizada y homogénea.

8. Bibliografía

- Adagbasa, G., Adelabu, S., & Okello, T. (2018). Spatio-Temporal Assessment of Fire Severity in a Protected and Mountainous Ecosystem. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. doi:10.1109/IGARSS.2018.8518268
- Alarcón, I. (5 de Noviembre de 2020). Los incendios en el Ecuador amenazan a cóndores, osos andinos, lobos y otras especies del páramo. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/tendencias/ambiente/incendios-ecuador-condores-osos-fauna.html>
- ALOS PALSAR .(2010). *Conjunto de datos: ALPSRP229757160*. NASA. Recuperado el Diciembre de 2021, de https://data.asf.alaska.edu/archive/data/rtc_hi_res/A3/22000/AP_22975_FBD_F7170_RT1.zip
- Altman, D. G. (1991). *Practical statistics for medical research*. New York: Chapman and Hall. Obtenido de <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=v-walRnRxWQC&oi=fnd&pg=PR11&dq=practical+statistics+for+medical+research.+New+York:+Chapman+and+Hall%3B&ots=SyW0Cdsp4k&sig=rZ5xAofAAobWIYb3smZ0v15EqQ0#v=onepage&q=kappa&f=false>
- Armenteras, D., González, T. M., Ríos, O. V., Elizalde, M. C., & Oliveras, I. (2020). *Incendios en ecosistemas del norte de Suramérica: avances en la ecología del fuego tropical en Colombia, Ecuador y Perú*. Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá). Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Bogotá. doi:<https://doi.org/10.15446/caldasia.v42n1.77353>
- ASEFOGA. (2020). *Guía Restauración forestal en terrenos quemados*. Asociación Sectorial Forestal Galega, Galicia. Obtenido de <http://asefoga.org/wp->

content/uploads/2020/07/Gu%C3%ADa-sobre-restauraci%C3%B3n-forestal-en-terrenos-quemados.pdf

- Bengtsson, Z., Torres-Pérez, J. n., & McCullum, A. J. (2021). *Satélites y Sensores para Aplicaciones para Incendios de Vegetación (Post-Incendio)*. NASA, Applied Remote Training Program. Obtenido de https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2021-05/Fire_Part6_Spanish.pdf
- Berger, C., Grand, L., Fitzgerald, S. A., & Leavell, D. (October de 2018). *Oregon State University*. Recuperado el 16 de Agosto de 2021, de <https://catalog.extension.oregonstate.edu/em9222/html>
- Briones, F. A. (2020). *Manual de formación de incendios forestales para cuadrillas*. Gobierno de Aragon, Departamento de Medio Ambiente, Aragon. Obtenido de https://www.aragon.es/documents/20127/674325/MANUAL_INCENDIO_S_CUADRILLAS.pdf/7a477952-318e-3110-a2df-94692725ab98
- CAF. (14 de Mayo de 2020). *Corporación Andina de Fomento*. Obtenido de Banco de Desarrollo de América Latina: <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2020/05/ecuador-fortalecera-la-prevencion-de-incendios-forestales-en-las-zonas-mas-vulnerables/>
- Campos, R. M., Chaves, J. R., & Araya, M. L. (2021). *Application of calcination indexes for wildfires of the 2020 season in the conservation area of Guanacaste, Costa.Rica*. Geosaberes. doi:<https://doi.org/10.26895/geosaberes.v12i0.1094>
- Cervantes, A. (2008). *Manual de procedimientos del Programa de Adopción de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, Coordinación de la Investigación Científica. México :

SEREPSA. Obtenido de http://www.repsa.unam.mx/SEREPSA_2008_Manual_PROREPSA.pdf

CIIFEN. (2014). *Conservación y manejo de recursos naturales*. Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño . Obtenido de https://issuu.com/ciifen/docs/conservacion_y_manejo_de_recursos_n

Combee, A., Delcourt, C. J., Izbicki, B., Mack, M. C., Maximov, T. C., Petrov, R. E., . . . Veraverbeke, S. (2021). Evaluating the differenced Normalized Burn Ratio for assessing fire severity using Sentinel-2 imagery in Northeast Siberian arch forests. *EGU General Assembly 2021*. doi:<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-2518>

Comisión Nacional Federal. (12 de Marzo de 2020). *Gobierno de México*. Recuperado el 16 de Agosto de 2021, de <https://www.gob.mx/conafor/es/articulos/dime-que-ecosistema-eres-y-te-dire-cuanto-fuego-soportas?idiom=es>

CONAF. (2011). *Manual con Medidas para la Prevención de Incendios Forestales*. Corporación Nacional Forestal (CONAF). Obtenido de https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1367248086manual_RMbaja.pdf

Congreso Nacional. (2005). *Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/ley-forestal.pdf>

Constitución de la República del Ecuador. (2015). Obtenido de <https://www.cosede.gob.ec/wp-content/uploads/2019/08/CONSTITUCION-DE-LA-REPUBLICA-DEL-ECUADOR.pdf>

Convención para la Protección de la Flora, de la Fauna y de las Bellezas Escénicas Naturales de los Países de América. (1940). Obtenido de

https://www.conaf.cl/cms/editorweb/normativa/int/convencion_bellezas_america.pdf

Cordero, Z. R. (2009). La investigación aplicada: Una forma de conocer las realidades con evidencia científica. *Revista Educación vol. 33, núm. 1, , 155-165*. Recuperado el 24 de Septiembre de 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/440/44015082010.pdf>

Córdova, J. I., & Bueno, F. R. (2020). *Identificación de áreas susceptibles de incendios forestales en el cantón Loja y propuesta de acciones de prevención y mitigación*. Universidad Técnica Particular de Loja, Proyecto de Vinculación, Loja. Obtenido de <https://smartland.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/12f7bf97252e463aa3108847cc83adcb/data>

Dávalos, N. (5 de Julio de 2021). Las áreas protegidas en Ecuador representan el 20% de territorio nacional. *Primicias*. Obtenido de <https://www.primicias.ec/noticias/tecnologia/areas-protegidas-ecuador-territorio-nacional/>

DellaSala, D. (2018). *Emergence of a New Climate and Human-Caused Wildfire Era for Western USA Forests*. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10999-6>

Díaz, J. T. (28 de Enero de 2015). *Reservas Ecológicas* . Obtenido de <https://sites.google.com/site/reservasecologicasjt/home/reserva-ecologica-los-illinizas>

Dudley, N. (2008). *Directrices para la aplicación de las categorías de gestión de áreas protegidas*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza

- y de los Recursos Naturales, Gland, Suiza. Obtenido de <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/PAPS-016-Es.pdf>
- ECOLAP, & MAE. (2007). *Guía del Patrimonio de Áreas Naturales Protegidas del Ecuador*. Quito, Ecuador: ECOFUND. Obtenido de <https://www.parks-and-tribes.com/national-parks/reserva-ecologica-ilinizas/reserva-ecologica-los-ilinizas.pdf>
- El Universo. (2012 de Septiembre de 2012). Se pide más ayuda por incendios que crecen en Chilla y El Ángel. Obtenido de <https://www.eluniverso.com/2012/09/20/1/1447/pide-mas-ayuda-incendios-crecen-chilla-angel.html>
- EOS. (28 de Septiembre de 2020). *Earth Observing System*. Obtenido de <https://eos.com/es/blog/ndvi-preguntas-frecuentes/>
- Eras, Y. P. (2014). *Evaluación del costo de las alternativas de uso sustentable de los recursos naturales dentro la Reserva Ecológica Los Ilinizas [Tesis de Grado]*. Quito. Obtenido de <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/11861/TRABAJO%20DE%20DISERTACI%C3%93N%20PARA%20MPRIMIR.pdf?sequence=4>
- ESA. (9 de Marzo de 2010). *The European Space Agency*. Obtenido de <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf>
- ESA. (2013). *The European Space Agency*. Obtenido de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- ESA. (17 de Junio de 2015). *The European Space Agency*. Obtenido de https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2
- ESA. (19 de Agosto de 2021). *The European Space Agency*. Obtenido de <https://climate.esa.int/de/news-events/multi-decade-global-fire-dataset-set-support-trend-analysis/>

- Escobar, C. H., & Ordoñez, E. S. (2019). *Diseño de una red de Aspersión con Alimentación Directa a Partir de Unidades Hidrogeológicas Favorables de la Zona Intervenida y de Activación Automática ante Anomalías Físicas Detectadas Mediante Sensores*[Tesis de Grado]. Guayaquil: ESPOL. FICT. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/32244>
- 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*. doi:<https://doi.org/10.3390/rs10081196>
- Gis&Beers. (30 de Abril de 2018). *Gis&Beers*. Obtenido de <http://www.gisandbeers.com/analisis-severidad-incendios-indice-nbr/>
- Hardesty, J., Myers, R., & Fulks, W. (2005). *Fire, Ecosystems and People: A Preliminary Assessment of Fire as a Global Conservation Issue*. The Nature Conservancy (TNC), WWF (World Wide Fund for Nature). Obtenido de <http://www.georgewright.org/224hardesty.pdf>
- IGM. (2015). *Mosaico Geopedológico 1:25000*. Instituto Geográfico Militar. Obtenido de http://www.geoportaligm.gob.ec/p_geoinformacion/wms?service=WFS&version=1.0.0&request=GetFeature&typeName=Geopedologia:M_Geopedologico&outputFormat=SHAPE-ZIP
- IGN. (4 de Diciembre de 2017). *Teledetección*. Instituto Geográfico Nacional, Centro Nacional de Información Geográfica, España. Obtenido de <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf#:~:text=La%20teledetecci%C3%B3n%20es%20la%20t%C3%A9cnica,informaci%C3%B3n%20interpretable%20de%20la%20Tierra.>

- INAMHI. (2017). *Isotermas Serie 1981 – 2010*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Obtenido de http://www.serviciometeorologico.gob.ec/gisweb/SOTERMAS_SERIE_1981_2010/SHP/Isoterma%201981-2010.zip
- INAMHI. (2017). *Isoyetas serie 1981 – 2010*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Obtenido de http://www.serviciometeorologico.gob.ec/gisweb/ISOYETAS_SERIE_1981_2010/SHP/Isoyeta%201981-2010.zip
- INEC. (2010). *CENSO DE POBLACIÓN Y VIVIENDA (CPV-2010)*. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS (INEC). Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=322&force=1>
- INEFAN. (1996). *Creación de la Reserva Ecológica Los Ilinizas*. Ministerio del Ambiente, Instituto Ecuatoriano Forestal y de Areas Naturales. Obtenido de <http://190.152.46.74/documents/10179/241417/30+RESERVA+ECOLOGICA+LOS+ILINIZAS.pdf/769909b7-f643-402d-8d8b-1af5d6a5baab>
- Keeley, J. (2009). *Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage*. California. doi:10.1071/WF07049
- Kim, Y., Jeong, M.-H., Youm, M., Kim, J., & Kim, J. (2021). Recovery of Forest Vegetation in a Burnt Area in the Republic of Korea: A Perspective Based on Sentinel-2 Data. *Applied Sciences* 11, no. 6: 2570. doi:<https://doi.org/10.3390/app11062570>
- La Hora. (4 de Enero de 2019). Alrededor de 500 hectáreas quemadas en la Reserva Ecológica El Ángel. Obtenido de <https://lahora.com.ec/noticia/1102212690/alrededor-de-500-hectareas-quemadas-en-la-reserva-ecologica-el-angel>

- Lentile, L., Holden, Z., Falkowski, M. J., & Smith, A. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 319–345. doi:10.1071/WF05097
- Llovería, R. M., Cabello, F. P., Martín, A. G., Vlassova, L., & Fernández, J. R. (2014). *La severidad del fuego: revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales*. Geografía y Ordenación del Territorio, GEO FORE ST (IUCA), Zaragoza, España. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4854191.pdf>
- Lutes, D. C., Keane, R. E., Caratti, J. F., Key, C. H., Benson, N. C., Sutherland, S., & Gangi, L. J. (2006). *FIREMOM: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins. Obtenido de https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr164.pdf
- MAATE. (2015). *Prevención y control de incendios una prioridad nacional*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/prevencion-y-control-de-incendios-una-prioridad-nacional/>
- MAATE. (2020). *Boletín Sistema Nacional de Áreas Protegidas*. Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica , Coordinación General de Planificación Ambiental. Obtenido de https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/04/2020_03_30-BOLETIN-FINAL.pdf
- MAATE. (2021). *Ministerio impulsa la campaña “Ecuador Sin Incendios Forestales”*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/ministerio-impulsa-la-campana-ecuador-sin-incendios-forestales/>
- MAE. (2007). *Plan Estratégico del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador 2007-2016. Informe Final de Consultoría. Proyecto GEF: Ecuador*

- Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP-GEF)*. Ministerio del Ambiente, REGAL ECOLEX .Obtenido de <http://maetransparente.ambiente.gob.ec/documentacion/WebAPs/PLAN%20ESTRATEGICO%20DEL%20SNAP.pdf>
- MAE. (2008). *Plan de Manejo Reserva Ecológica Los Ilinizas (REI)*. Ministerio de Ambiente y Agua. Obtenido de <http://190.152.46.74/documents/10179/242256/30+PLAN+DE+MANEJO+ILINIZAS.pdf/a4b31f30-95a5-43e9-8875-c51258f08b4d>
- MAE. (4 de Junio de 2014). *Ministerio del Ambiente*. Recuperado el 11 de Agosto de 2021, de <https://www.ambiente.gob.ec/mae-conserva-reserva-ecologica-los-ilinizas-tesoro-natural-de-los-andes-ecuatorianos/>
- MAE. (9 de Noviembre de 2020). *Ministerio de Ambiente y Agua*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/ecosistemas-de-paramo-afectados-tras-incendio-en-el-parque-nacional-cayambe-coca/>
- MAGAP. (2020). *Mapa de Cobertura y uso de la tierra y Sistemas productivos agropecuarios del Ecuador continental* . Ministerio de Agricultura y Ganadería. Obtenido de http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=4f7e118f-0439-42bf-ab62-f0e7c842a379&fname=m_cobertura_tierra_2020.zip&access=public
- Maisanche, F. (17 de Octubre de 2018). El fuego quemó 400 hectáreas de vegetación en la Reserva Ecológica Los Ilinizas, en Cotopaxi. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/fuego-quemo-hectareas-vegetacion-ilinizas.html>
- Mattar, C., Rivera, C., & Alarcón, C. D. (2017). Tendencia de la cobertura vegetal afectada por incendios en el Parque Nacional Torres del Paine.

Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección, ISSN 1133-0953, Nº. 50, 2017,, 71-97.
doi:10.4995/raet.2017.7422

Myers, R. L. (2006). *Convivir con el fuego - Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el Manejo Integral del Fuego*. The Nature Conservancy, Tallahassee, FL 32312. Recuperado el 16 de Agosto de 2021, de https://www.conservationgateway.org/Documents/el_manejo_integral_d_el_fuego.pdf

Naciones Unidas. (1995). *Convenio sobre la Diversidad Biológica*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/12/CONVENIO-SOBRE-DIVERSIDAD-BIOLOGICA.pdf>

NWCG. (2006). *Glossary of Wildland Fire*. National Wilfire Coordinating Group. Obtenido de <https://www.nwcg.gov/term/glossary/burn-severity>

OSBO. (15 de Mayo de 2019). *Observatorio Social El Batefuegos de Oro (OSBO)*. Obtenido de <https://osbodigital.es/2019/05/15/las-imagenes-de-los-satelites-y-su-uso-en-los-incendios-forestales/>

Pastrana, A. A. (2017). *Análisis de los cambios en la estructura del paisaje por incendios forestales mediante teledetección [Tesis Doctoral]*. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Departamento de geología, geografía y medio ambiente , Alcalá de Henares. Obtenido de https://comisiones.ipgh.org/CARTOGRAFIA/Premio/Tesis_PhD_2018/IPGH_Tesis_Completa_Alexander_Ariza.pdf

- Pazmiño, D. (2019). Peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos en Ecuador. *IGEMPA: Investigación Y Desarrollo*, 10-18. doi:<https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1800>
- Peralta, J. C. (2017). EJE 07-13 Impacto de los incendios forestales en las áreas protegidas de Costa Rica. *Memorias Y Boletines De La Universidad Del Azuay*, 1(XVI), 433-440. Obtenido de <http://revistas.uazuay.edu.ec/index.php/memorias/article/view/91>
- Picos, J., Alonso, L., Bastos, G., & Armesto, J. (2019). *Event-Based Integrated Assessment of Environmental Variables and Wildfire Severity through Sentinel-2 Data*. University of Vigo, Forestry Engineering School, Pontevedra, Spain. doi:<https://doi.org/10.3390/f10111021>
- Pinilla, P. J. (2016). *Avances en el estudio de suelos mediterráneos afectados por incendios forestales. [Tesis. Doctoral]*. Universidad Miguel Hernández, Alicante España. Obtenido de <http://dspace.umh.es/bitstream/11000/3035/1/TD%20Jim%C3%A9nez%20Pinilla%2C%20Patricia.pdf>
- Purwar, N., & Chauhan, A. (2020). *Effects of Forest Fire to the Environment*. Sharda University. Obtenido de <http://www.jcreview.com/fulltext/197-1593719021.pdf>
- Rego, C. A., González, A. R., & Pérez, S. A. (2018). *Evaluación y cartografiado de la severidad de los grandes incendios ocurridos en el distrito forestal XIV (Verín-Viana) entre 2006-2016*. Lugo, España: Cuadernos De La Sociedad Española De Ciencias Forestales. doi:<https://doi.org/10.31167/csefv5i44.17547>
- Rivadeneira, A. B. (2019). *Análisis del peligro de incendios forestales mediante el Uso de sensores remotos caso de estudio: bosques protectores del Distrito*

Metropolitano de Quito en los años 2015 y 2016. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito. Obtenido de <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/15998>

Robinne, F. N. (2021). *Impacts of disasters on forests, in particular forest fires*. United Nations Forum on Forests Secretariat. Obtenido de <https://www.un.org/esa/forests/wp-content/uploads/2021/03/UNFF16-Bkgd-paper-disasters-forest-fires.pdf>

Rogers, B., Balch, J., Goetz, S., Lehmann, C., & Turetsky, M. (2020). *Focus on changing fire regimes: interactions with climate, ecosystems, and society*. Environmental Research Letters. doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d3a>

Saavedra, N. S. (1992). Los sistemas de información geográfica (SIG) una herramienta poderosa para la toma de decisiones. *Ingeniería e Investigación* SSN 0120-5609, ISSN-e 2248-8723, N^o. 28, 1992, 31-40. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902930.pdf>

Santos, A. C. (2007). Reserva Ecológica Los Ilinizas. (MAE, Ed.) *Guía del Patrimonio de Áreas Naturales Protegidas del Ecuador*. Obtenido de <https://www.parks-and-tribes.com/national-parks/reserva-ecologica-ilinizas/reserva-ecologica-los-ilinizas.pdf>

Santos, S. M., Gonçalves, A. B., Rocha, W. F., & Baptista, G. (2020). Assessment of Burned Forest Area Severity and Postfire Regrowth in Chapada Diamantina National Park (Bahia, Brazil) Using dNBR and RdNBR Spectral Indices. *Geosciences* 10, no. 3: 106. doi:<https://doi.org/10.3390/geosciences10030106>

- Saputra, A. D., Setiabudidaya, D., Setyawan, D., Khakim, M. Y., & Iskandar, I. (2017). Burnscar analysis using normalized burning ratio (NBR) index during 2015 forest fire at Merang-Kepahyang peat forest, South Sumatra, Indonesia. doi:<https://doi.org/10.1063/1.4987107>
- SGIAR. (2019). *Propuesta Metodológica Preliminar para Generar Mapas de Susceptibilidad Física a la Ocurrencia de Incendios Forestales*. Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, Subsecretaría de Gestión de la Información y Análisis de Riesgos. Obtenido de <https://informacion.gestionderiesgos.gob.ec:8443/centrodedescarga/contenidos/contenidoIncendiosForestales.php>
- Smith, C. W., Panda, S. K., Bhatt, U. S., Meyer, F. J., Badola, A., & Hrobak, J. L. (2021). Assessing Wildfire Burn Severity and Its Relationship with Environmental Factors: A Case Study in Interior Alaska Boreal Forest. *Remote Sensing*. doi:<https://doi.org/10.3390/rs13101966>
- SNAP. (15 de Diciembre de 2016). *Sistema Nacional de Áreas Protegidas*. Obtenido de <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/areas-protegidas/reserva-ecol%C3%B3gica-ilinizas>
- SNFRE. (1 de Noviembre de 2020). *Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias*. Obtenido de <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/incendio-forestal-del-antiana-se-encuentra-totalmente-liquidado/>
- SNGR. (2019). *Informe de Situación - Incendios Forestales a nivel nacional 2019*. Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. Obtenido de <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2019/09/Informe-de-Situaci%C3%B3n-No-18-Incendios-Forestales-09092019.pdf>

- SNGRE. (2020). *Informe de Situación – Incendios Forestales* . Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias . Obtenido de https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2020/11/Informe-de-Situacion-No-005-Incendios-Forestales-08112020_17h00.pdf
- SNGRE. (1 de Noviembre de 2020). *Servicio Nacional de Gestion de Riesgos y Emergencias*. Obtenido de <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/incendio-forestal-del-antiana-se-encuentra-totalmente-liquidado/>
- SNGRE. (2021). *Emisión de información de eventos peligrosos relacionados a la gestión del riesgo de desastres en territorio [Correo electrónico]*. Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias , Gestión de la Información de Riesgos .
- Szpakowski, D. M., & Jensen, J. (2019). *A Review of the Applications of Remote Sensing in Fire Ecology*. Texas State University, Department of Geography, San Marcos - Texas. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/22/2638/htm>
- Tancara, C. (1993). La Investigación Documental . *Temas Sociales no.17 La Paz dic. .*
- MAE. (2018). *Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/01/TEXTO-UNIFICADO-DE-LEGISLACION-SECUNDARIA-DE-MEDIO-AMBIENTE.pdf>
- UICN. (20 de Octubre de 2015). *Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza*. Obtenido de <https://www.iucn.org/es/regiones/am%C3%A9rica-del-sur/nuestro-trabajo/%C3%A1reas-protegidas/%C2%BFqu%C3%A9-es-un-%C3%A1rea-protegida>

- Ulibarry, P. G. (2017). *Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile / BCN, Chile. Obtenido de <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmTIPO=DOCUMENTO COMUNICACIONCUENTA&prmID=39186>
- UM. (2018). *Universidad de Murcia*. Obtenido de <https://www.um.es/geograf/signatur/temariohtml/node74.html>
- UN-SPIDER. (2015). *Forest Fire*. United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response. Recuperado el 9 de Agosto de 2021, de <https://www.un-spider.org/disaster-type/forest-fire>
- UN-SPIDER. (25 de Noviembre de 2018). *Normalized Burn Ratio*. United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response. Obtenido de <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>
- UN-SPIDER. (2020). *Paso a Paso: Mapeo de la Severidad de Incendios Forestales en Google Earth Engine*. United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response. Recuperado el 31 de Enero de 2022, de <https://www.un-spider.org/es/asesoria/practicas-recomendadas/practica-recomendada-mapeo-gravedad-quemaduras/paso-a-paso/google-earth-engine>
- UN-SPIDER. (2020). *Paso a Paso: Mapeo de Severidad de Incendios Forestales en QGIS*. United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response. Obtenido de <https://un->

spider.org/es/asesoria/practicas-recomendadas/practica-recomendada-mapeo-gravedad-quemaduras/paso-a-paso/qgis

Verna, G. C., Puerto, L. A., Castellano, H. M., & Kindgard, A. (2016). *Informe final de evaluación de exactitud temática del mapa de cobertura forestal y cambio de uso de tierra para los años 2011, 2013 y 2015*. República del Paraguay, Secretaría de Ambiente, Paraguay. Obtenido de http://www.infona.gov.py/application/files/9014/7405/3212/Evaluacion_exactitud_Mapas_111315_160516.pdf

Zárate, K. C. (2013). *Manual para la Gestión Operativa de las Áreas Protegidas de Ecuador*. Ministerio del Ambiente. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/02/04-Manual-para-la-Gesti%C3%B3n-Operativa-de-las-%C3%81reas-Protegidas-de-Ecuador.pdf>

Zavala, K. M., Peña, L. C., & Manzo, L. L. (2019). *Áreas quemadas y cambio de uso del suelo en el suroeste de Chihuahua (México) durante el periodo 2013-2017: Identificación con el Índice Normalized Burn Ratio (NBR)*. México. doi:<http://dx.doi.org/10.15174/au.2019.2418>

9. Anexos

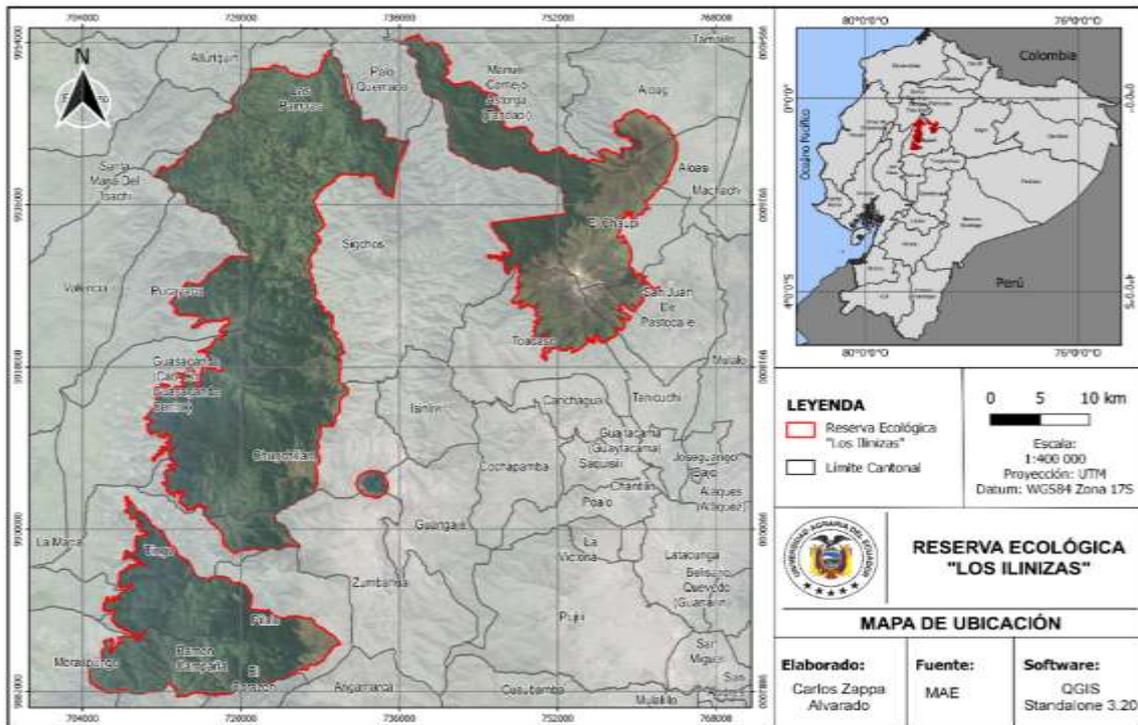


Figura 11. Mapa de Ubicación de la Reserva Ecológica “Los Ilinizas” Zappa, 2021

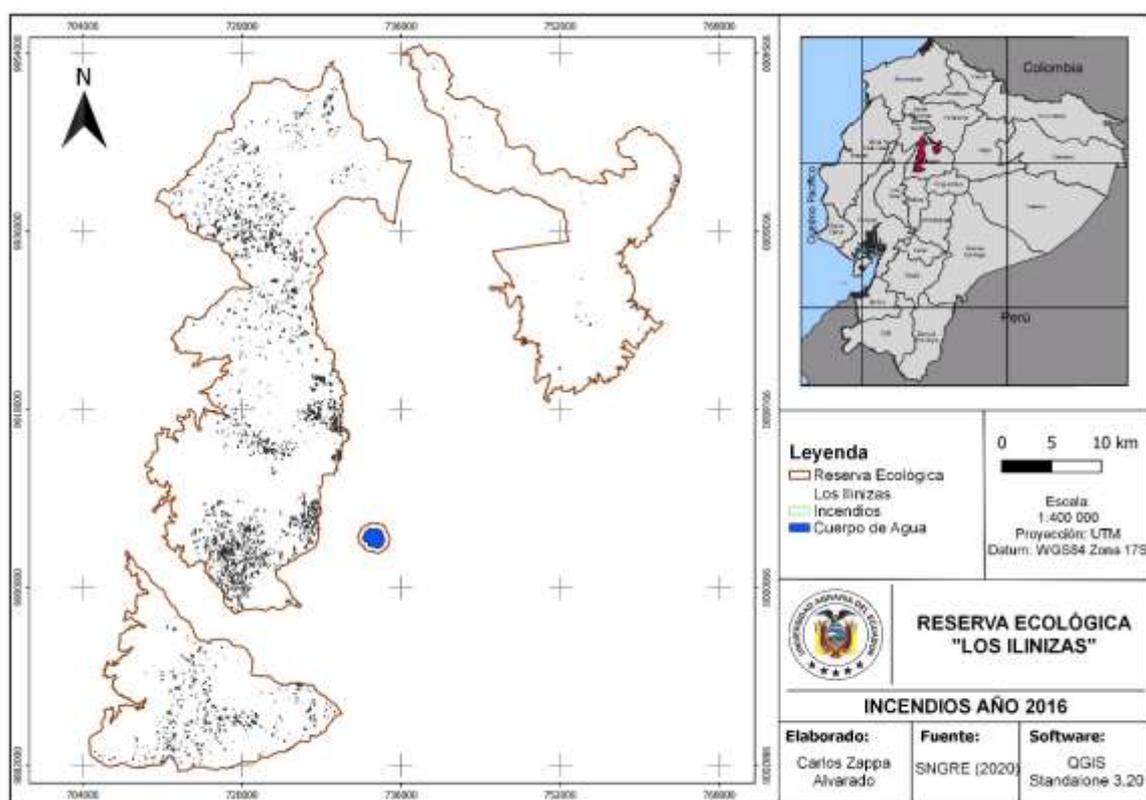


Figura 12. Incendios suscitados en la RELI año 2016 Zappa, 2021

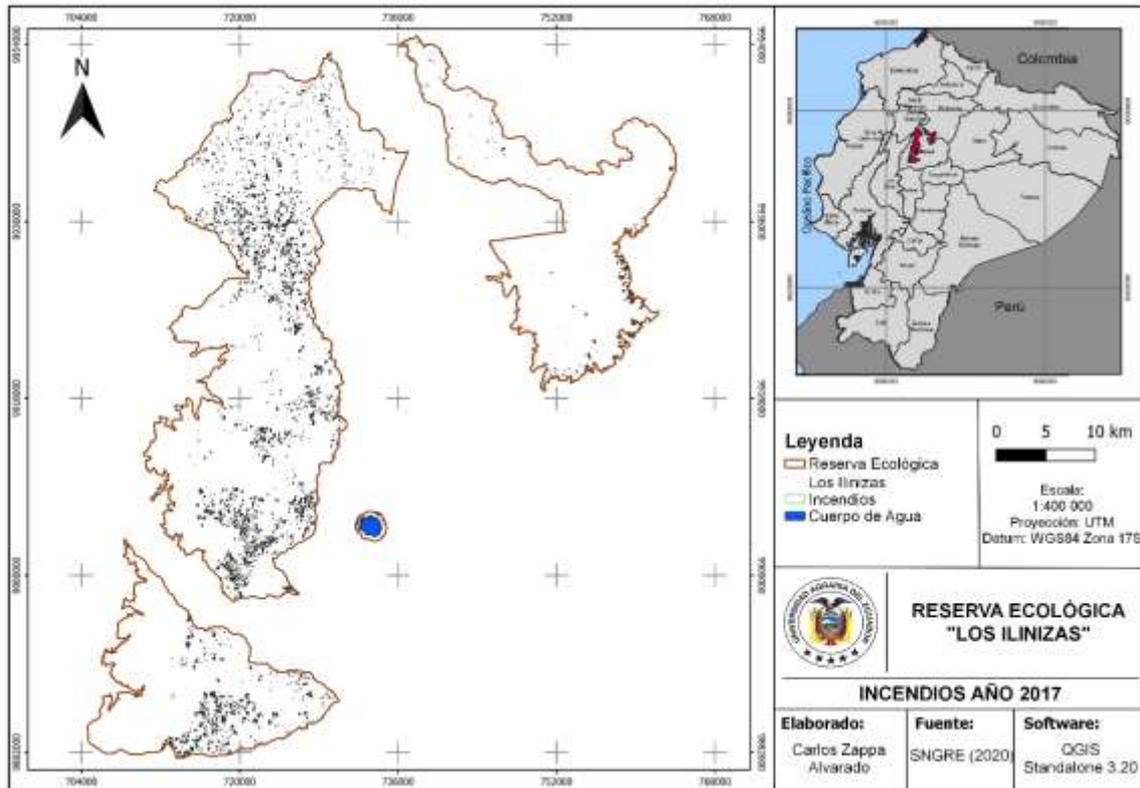


Figura 13. Incendios suscitados en la RELI año 2017
Zappa, 2021

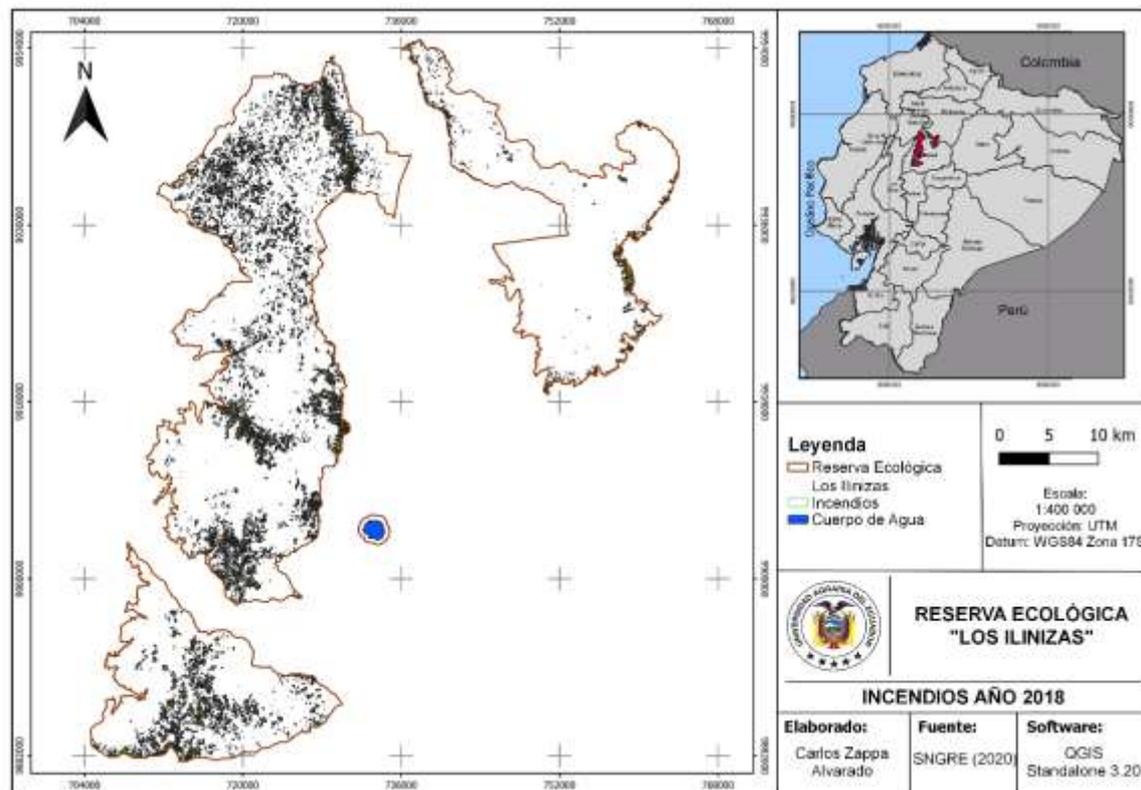


Figura 14. Incendios suscitados en la RELI año 2018
Zappa, 2021

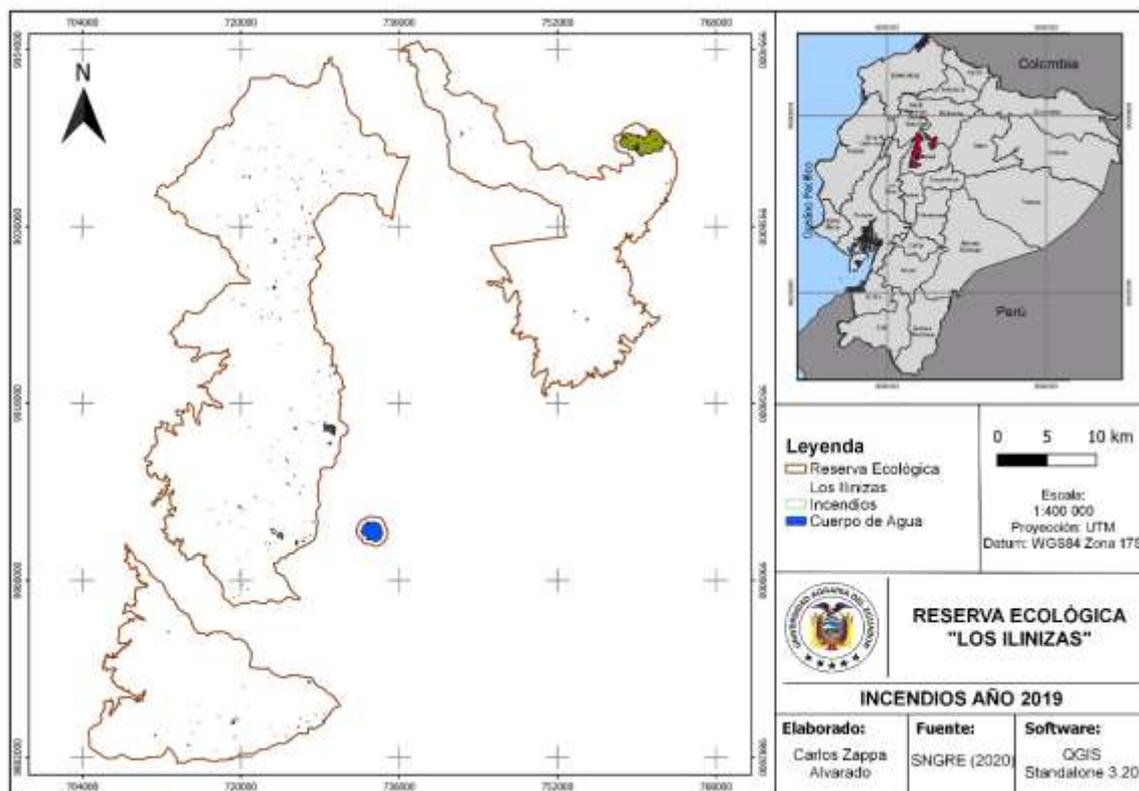


Figura 15. Incendios suscitados en la RELI año 2019 Zappa, 2021

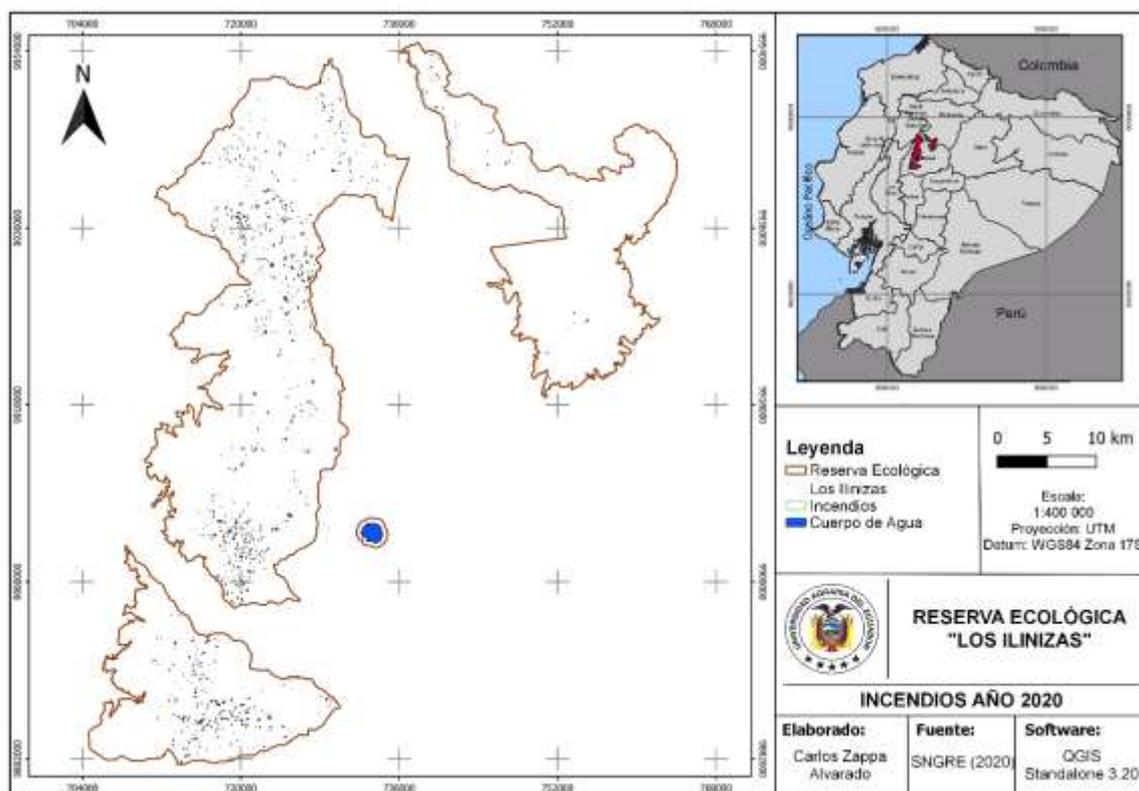


Figura 16. Incendios suscitados en la RELI año 2020 Zappa, 2021

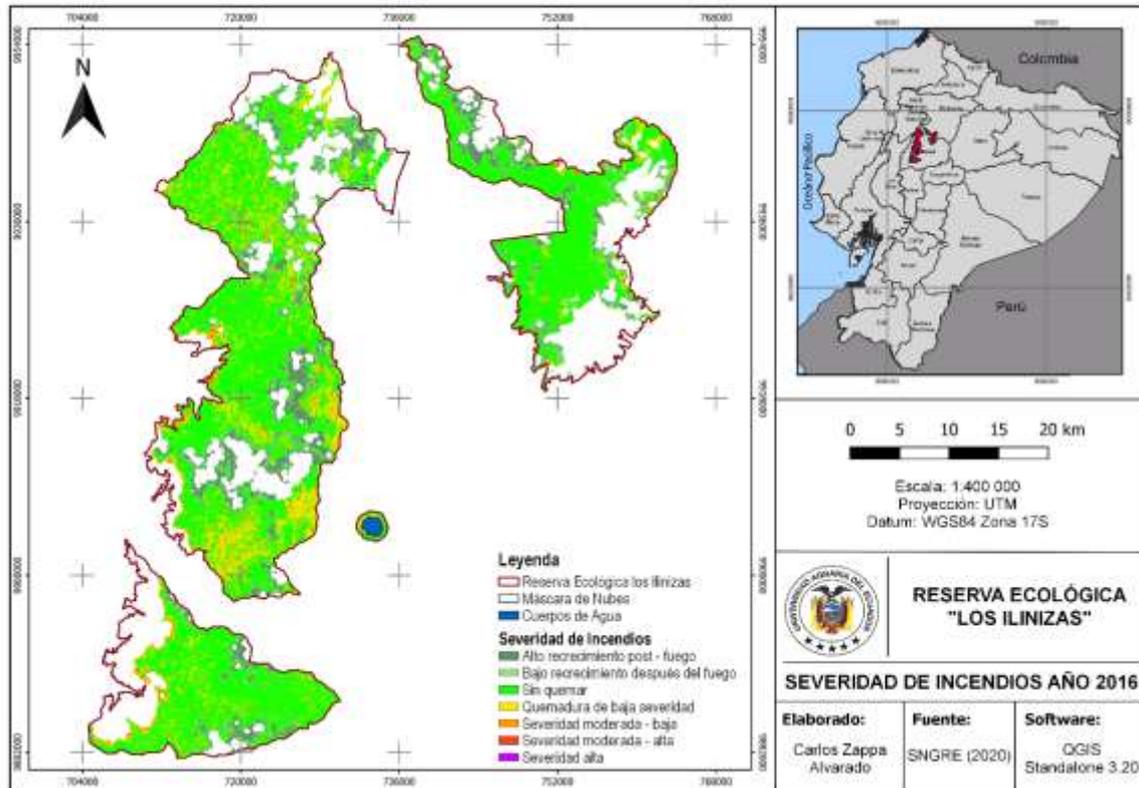


Figura 17. Severidad de incendios año 2016
Zappa, 2021

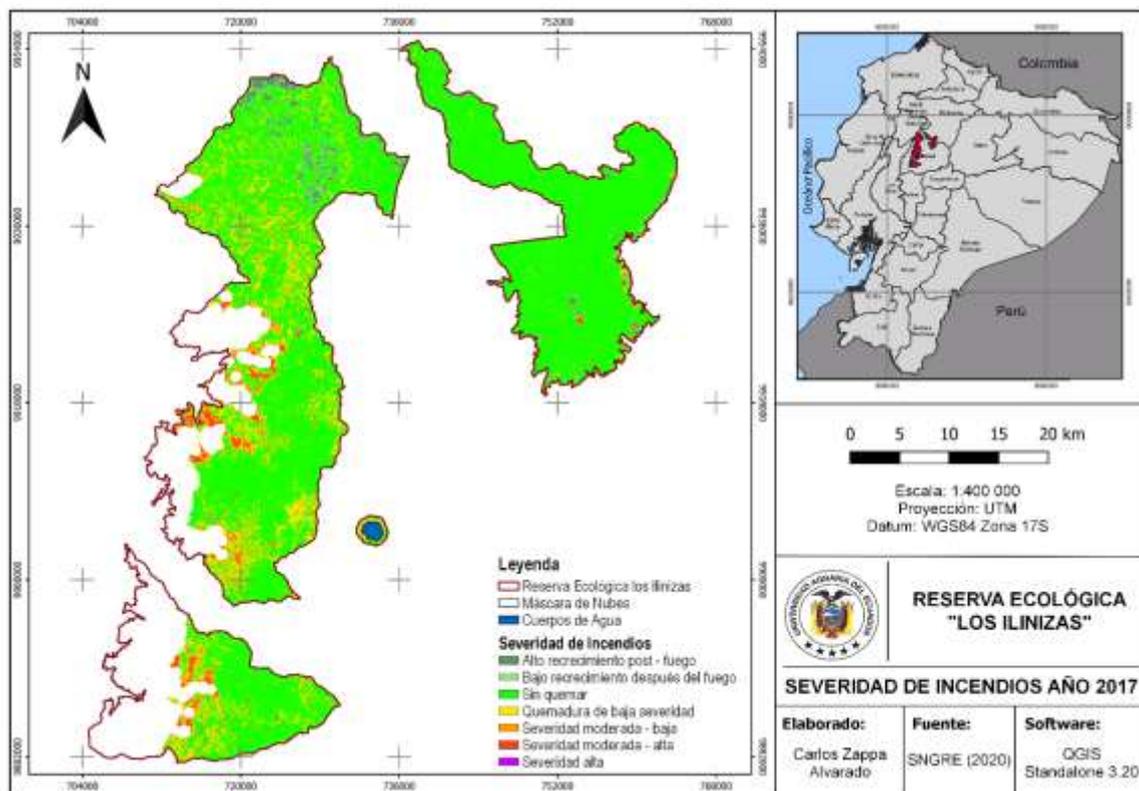


Figura 18. Severidad de incendios año 2017
Zappa, 2021

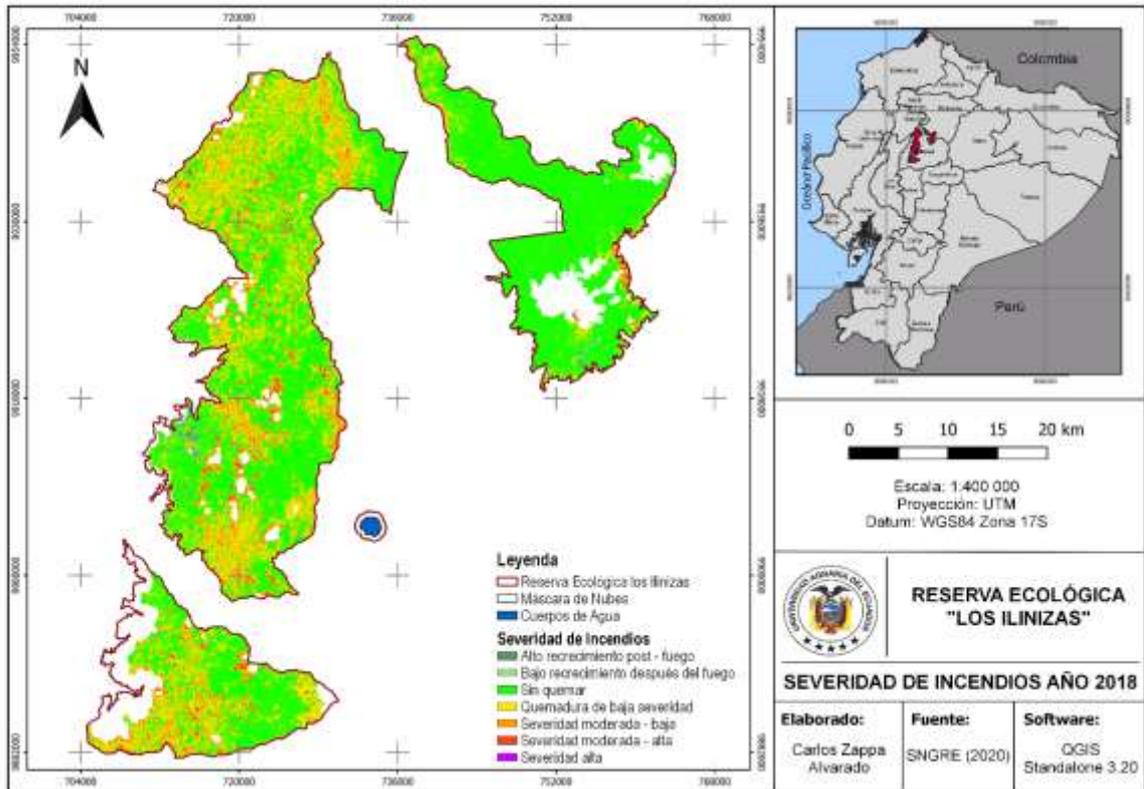


Figura 19. Severidad de incendios año 2018
Zappa, 2021

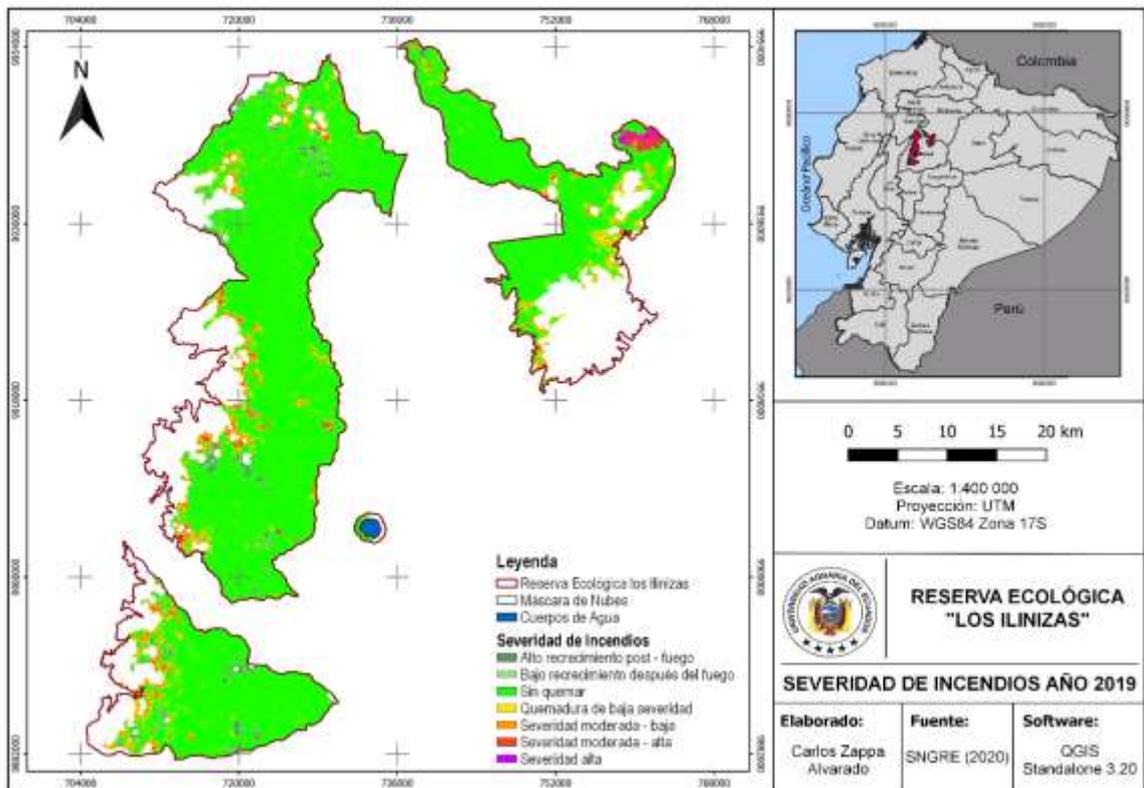


Figura 20. Severidad de incendios año 2019
Zappa, 2021

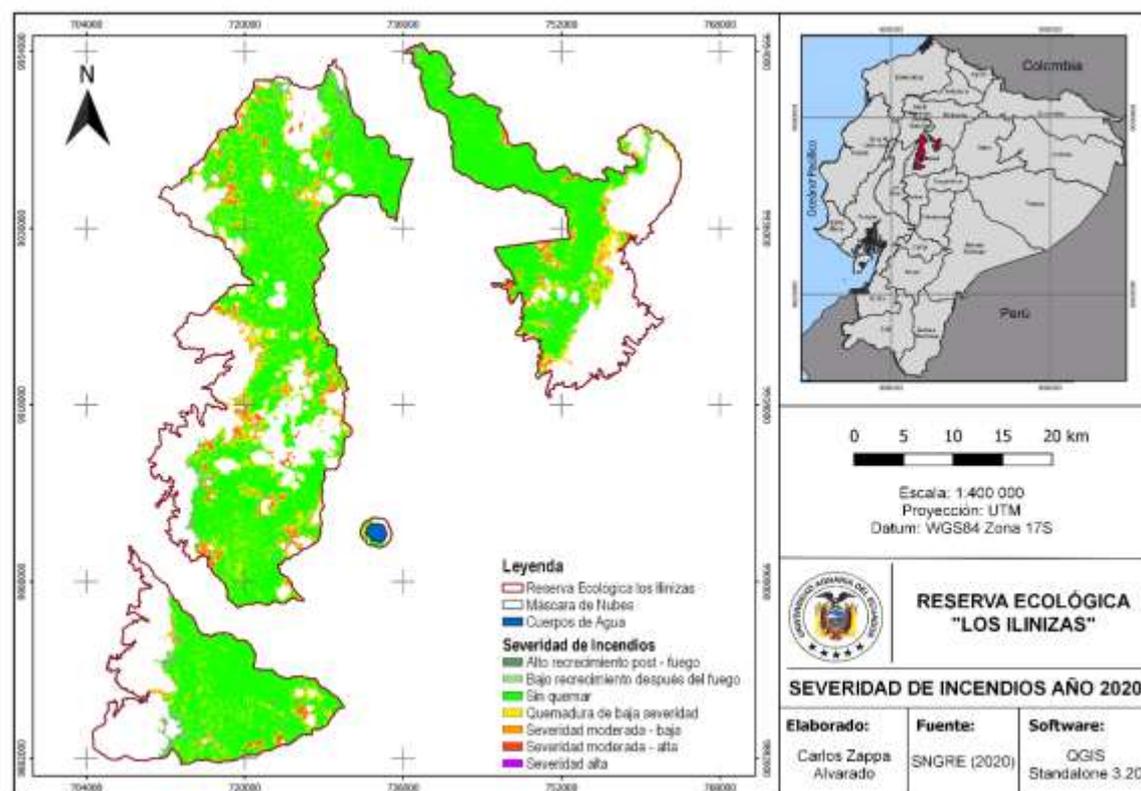


Figura 21. Severidad de incendios año 2020
Zappa, 2021

Tabla 20. Superficie por índice de severidad.

Categoría de Severidad	2016	2017	2018	2019	2020
Máscara de nubes	36372,45	27431,18	18227,87	33778,25	50987,72
Alto recrecimiento o post-fuego	11274,64	1872,27	457,5	1838,99	979,49
Bajo recrecimiento o después del fuego	7667,71	2128,41	1117,18	1925,63	1921,17
Sin quemar	64544,91	85852,13	74566,25	89391,34	68834,4
Quemadura de baja severidad	12892,77	15188,94	32030,88	6404,12	11172,04
Severidad moderada-baja	1145,86	1215,06	6443,60	148,15	291,27
Severidad moderada-alta	264,59	375,84	1169,63	409,33	42,77

Severidad alta	68,34	169,41	220,34	337,44	4,39
Total	134233,25	134233,25	134233,25	134233,25	134233,25

Zappa, 2021

Tabla 21. Matriz de confusión de la clasificación supervisada del año 2016 en pixeles.

Referencia Clasificación	Bosque	Cuerpos de Agua	Área sin Vegetación	Tierra Agrícola	Vegetación Arbustiva y Herbácea	Total
Bosque	107518	0	6	6354	0	113878
Cuerpos de Agua	21	15611	241	4	0	15877
Área sin Vegetación	261	21	8401	482	5	9170
Tierra Agrícola	1482	9	218	40901	1816	44426
Vegetación Arbustiva y Herbácea	841	0	198	2513	16741	20293
Total	110123	15641	9064	50254	18562	203644
Clasificación Kappa						0,87

Zappa, 2021

Tabla 22. Matriz de confusión de la clasificación supervisada del año 2017 en pixeles.

Referencia Clasificación	Bosque	Cuerpos de Agua	Área sin Vegetación	Tierra Agrícola	Vegetación Arbustiva y Herbácea	Total
Bosque	68106	4	1	219	1	68331
Cuerpos de Agua	0	11964	0	0	0	11964
Área sin Vegetación	1	7	8392	6	509	8915
Tierra Agrícola	623	0	420	11543	2300	14886
Vegetación Arbustiva y Herbácea	6	0	21	263	88558	88848
Total	68736	11975	8834	12031	91368	192944
Clasificación Kappa						0,89

Zappa, 2021

Tabla 23. Matriz de confusión de la clasificación supervisada del año 2018 en píxeles.

Referencia Clasificación	Bosque	Cuerpos de Agua	Área sin Vegetación	Tierra Agrícola	Vegetación Arbustiva y Herbácea	Total
Bosque	56950	0	27	1051	102	58130
Cuerpos de Agua	41	19772	11	1	0	19825
Área sin Vegetación	827	0	1349	0	0	2176
Tierra Agrícola	2671	19	1	11106	140	13937
Vegetación Arbustiva y Herbácea	44	0	0	302	16835	17181
Total	60533	19791	1388	12460	17077	111249
Clasificación Kappa						0,86

Zappa, 2021

Tabla 24. Matriz de confusión de la clasificación supervisada del año 2019 en píxeles.

Referencia Clasificación	Bosque	Cuerpos de Agua	Área sin Vegetación	Tierra Agrícola	Vegetación Arbustiva y Herbácea	Total
Bosque	87044	0	0	3908	30	90982
Cuerpos de Agua	0	18141	28	10	8	18187
Área sin Vegetación	111	38	14031	304	409	14893
Tierra Agrícola	2559	0	311	30119	6584	39573
Vegetación Arbustiva y Herbácea	2824	0	99	629	92850	96402
Total	92538	18179	14469	34970	99881	260037
Clasificación Kappa						0,84

Zappa, 2021

Tabla 25. Matriz de confusión de la clasificación supervisada del año 2020 en píxeles.

Referencia Clasificación	Bosque	Cuerpos de Agua	Área sin	Tierra Agrícola	Vegetación Arbustiva y Herbácea	Total
-----------------------------	--------	--------------------	-------------	--------------------	---------------------------------------	-------

	Vegetación					
Bosque	75359	0	0	303	193	75855
Cuerpos de Agua	0	8732	0	0	0	8732
Área sin Vegetación	6	1	11898	115	78	12098
Tierra Agrícola	627	0	249	22579	2636	26091
Vegetación Arbustiva y Herbácea	12	0	39	1798	157770	159619
Total	76004	8733	12186	24795	160677	282395
Clasificación Kappa						0,93

Zappa, 2021

Tabla 26. Total de áreas afectadas por cobertura y año

Uso y Cobertura	2016	2017	2018	2019	2020	Total
Boque	24,79	568,64	2365,83	83,60	56,86	3099,72
Cuerpos de Agua	4,52	0,00	0,11		0,49	5,12
Área sin Vegetación	286,45	0,82	8,30	8,02	7,92	311,51
Tierra Agrícola	774,06	957,16	4847,35	234,66	116,42	6929,66
Vegetación Arbustiva y Herbácea	388,97	233,70	611,98	12,15	713,23	1960,02

Zappa, 2021

Tabla 27. Pesos asignados a clases de cobertura vegetal, según su grado de influencia

Variable	Sierra	
	Peso_Amz	Peso_Hum
Afloramiento rocoso	1	1
Albarrada / reservorio	1	1
Área erosionada	2	2
Barbecho	3	3
Bosque húmedo medianamente alterado	3	3
Bosque húmedo muy alterado	3	3
Bosque húmedo poco alterado	3	3
Cacao	2	4
Caña de azúcar artesanal	3	3
Cebada	3	3
Centro poblado	3	3
Eucalipto	3	3
Infraestructura	3	3
Lago / laguna	1	1

Maíz	3	3
Matorral húmedo medianamente alterado	4	2
Matorral húmedo muy alterado	4	2
Matorral húmedo poco alterado	4	2
Misceláneo de ciclo corto	1	5
Nieve y hielo	1	1
Papa	1	5
Paramo	5	1
Paramo arbustivo medianamente alterado	5	1
Paramo arbustivo poco alterado	5	1
Paramo herbáceo medianamente alterado	5	1
Paramo herbáceo poco alterado	5	1
Pasto cultivado	5	1
Pasto cultivado con presencia de arboles	3	3
Pino	3	3
Plátano	2	2
Rio doble	1	1
Vegetación arbustiva	4	2
Vegetación herbácea	5	1
Vegetación herbácea húmeda medianamente alterada	4	2
Vegetación herbácea humedad muy alterada	4	2
Vegetación herbácea seca poco alterada	5	1

Escobar y Ordoñez, 2019

Tabla 28. Nivel de susceptibilidad de acuerdo con la superficie que ocupan

Nivel de susceptibilidad	Superficie en hectáreas total y porcentaje	
	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Baja	3377,11	2,52
Media	14314,44	10,66
Alta	77667,50	57,86
Muy Alta	38874,20	28,96
Total	134233,25	100

Zappa, 2021

Tabla 29. Pesos asignados a clases de textura del suelo, en base al análisis del complejo cobertura-suelo

Variable Textura	Sierra	
	Peso_Amz	Peso_Hum
Arcilloso	2	1
Arena	3	5
Areno francoso	3	3
Franco	3	3
Franco arcillo-arenoso	3	3

Franco arcilloso	3	3
Franco arenoso	3	3
Franco limoso	3	3
Sin suelo	1	1

SGIAR, 2019

Tabla 30. Pesos asignados a rangos de precipitación

Rangos	Peso_Hum
0 a 800	5
800 a 1600	4
1600 a 2400	3
2400 a 3200	2
> 3200	1

SGIAR, 2019

Tabla 31. Pesos asignados a rangos de temperatura

Rangos	Peso
0 a 8	1
8 a 16	2
16 a 24	3
24 a 32	4
> 32	5

SGIAR, 2019

Tabla 32. Pesos asignados a rangos de radiación

Rangos	Peso_Amz
0 a 2	1
2 a 4	2
4 a 6	3
6 a 8	4
> 8	5

SGIAR, 2019

Tabla 33. Pesos asignados a rangos del modelo Digital de Elevación / DEM

Rangos	Peso_Amz
0 a 500	5
500 a 1500	4
1500 a 2200	3
2200 a 3000	2
> 3000	1

SGIAR, 2019

Tabla 34. Pesos asignados a rangos del raster de pendiente (slope)

Rangos	Peso
0 - 12	1
12 - 25	2
25 - 40	3
40 - 70	4
> 70	5

SGIAR, 2019

Tabla 35. Nivel de susceptibilidad con relación al área que ocupan en la RELI

Nivel de susceptibilidad	Superficie en hectáreas total y porcentaje	
Baja	3377,11	2,52
Media	14314,44	10,66
Alta	77667,50	57,86
Muy Alta	38874,20	28,96
Total	134233,25	100

Zappa, 2021