



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y

AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

**ZONIFICACIÓN DE COBERTURA VEGETAL PROPENSA A INCENDIOS
EN EL CANTÓN COTACACHI PROVINCIA DE IMBABURA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN
RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

AUTORES:

LUIS PAÚL CHUMA POMASQUI

PABLO DAVID CORONADO CACUANGO

DIRECTOR:

ING. DARÍO PAÚL ARIAS MUÑOZ MSc.

JULIO, 2022



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES

CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE
TITULACIÓN

Ibarra, 08 julio del 2022

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: “ZONIFICACIÓN DE COBERTURA VEGETAL PROPENSA A INCENDIOS EN EL CANTÓN COTACACHI PROVINCIA DE IMBABURA”, de autoría de los señores LUIS PAÚL CHUMA POMASQUI y PABLO DAVID CORONADO CACUANGO estudiantes de la Carrera de **INGENIERÍA RECURSOS NATURALES RENOVABLES** el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que los autores han procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

FIRMA

MSc. Paúl Arias Muñoz
DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN

MSc. Gabriel Jácome
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

MSc. Oscar Rosales
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN NRO. 001-073-CEAACES-2013-13
Ibarra-Ecuador

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte de manera digital para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA :	1003694153
NOMBRES Y APELLIDOS:	Chuma Pomasqui Luis Paúl
DIRECCIÓN:	Chaltura – Atuntaqui – Imbabura
EMAIL:	lpchumap@utn.edu.ec
TELEFONO FIJO Y MOVIL:	2-533-567 0979806007

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA :	1004172928
NOMBRES Y APELLIDOS:	Pablo David Coronado Cacuango
DIRECCIÓN:	Piava San Pedro – Cotacachi – Imbabura
EMAIL:	pdcoronadoc@utn.edu.ec
TELEFONO FIJO Y MOVIL:	2-916-734 0983313803

MISIÓN INSTITUCIONAL: Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar profesionales críticos, humanistas y éticos comprometidos con el cambio social.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN NRO. 001-073-CEAACES-2013-13
Ibarra-Ecuador

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ZONIFICACIÓN DE COBERTURA VEGETAL PROPENSA A INCENDIOS EN EL CANTÓN COTACACHI PROVINCIA DE IMBABURA
AUTORES:	Chuma Pomasqui Luis Paúl Coronado Cacuango Pablo David
FECHA:	11 de julio de 2022
SOLO PARA TRABAJO DE TITULACIÓN	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PRESGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Recursos Naturales Renovables
DIRECTOR:	Ing. Paúl Arias Muñoz MSc.

2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y son titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumimos la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldremos en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 11 días del mes de Julio de 2022

Chuma Pomasqui Luis Paúl
CI:1003694153

Coronado Cacuango Pablo David
CI:1004172928

MISIÓN INSTITUCIONAL: Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar profesionales críticos, humanistas y éticos comprometidos con el cambio social.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser nuestro guía, por darnos la vida, salud, fortaleza y sabiduría día tras día para superar obstáculos y permitirnos alcanzar nuestros sueños.

A nuestras familias por acompañarnos en los buenos y sobre todo malos momentos. Su amor, paciencia y confianza en nosotros ha sido fundamental para que este logro sea posible.

A la Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales por abrirnos las puertas de su prestigiosa institución y darnos la oportunidad de culminar una nueva etapa.

A nuestro director de tesis MSc. Paúl Arias por su tiempo, paciencia y conocimiento brindado en cada etapa de esta investigación. Igualmente, a nuestros asesores MSc. Oscar Rosales y MSc. Gabriel Jácome por compartir sus conocimientos y experiencias para alcanzar este estudio.

Asimismo, al Ing. Saúl Anrango por valiosa ayuda, Dios le pague.

El camino hasta aquí no ha sido fácil, pero gracias a su apoyo nos dio la fuerza necesaria para no decaer, esto sólo acaba de comenzar. Gracias infinitas a cada uno de ustedes.

***Luis Paúl Chuma Pomasqui
Pablo David Coronado Cacuango***

DEDICATORIA

Principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme la fuerza suficiente para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados de mi formación profesional.

A mis padres, Luis Chuma y Marlene Pomasqui, los dos seres que más amo, admiro y respeto, por su trabajo y sacrificio diario en estos años para verme triunfar, gracias papitos por brindarme todo su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos y ser el pilar más importante en esta etapa. Gracias por confiar en mí, y no ser un estorbo en sus vidas. Todo fue posible gracias a ustedes y sé que la vida no me alcanzará para agradecerles por tanto y formarme como un ser humano de bien.

¡Los amo!

A mi hermana Anita y a mi hermano Felipe por estar siempre presentes, acompañándome y apoyándome moralmente en esta etapa. Gracias por su amor incondicional.

A mi abuelita Amelia, mis tías Martha y Rosa, mis primos Joel y Leonel quienes me motivan a seguir adelante, son mi segunda familia.

A mi compañero de investigación y a quien considero hermano de otra madre Pablo C, gracias por tu perseverancia, apoyo y comprensión en esta vida universitaria que a pesar de los obstáculos presentados siempre salimos adelante y nuestra amistad prevalecerá de por vida. ¡Lo logramos!

A cada uno de mis amigos que estuvieron presentes durante todo este camino para alcanzar un logro más en nuestras vidas. En especial a mi mejor amiga Belén C, con quien tuve el gusto de compartir los primeros niveles de carrera.

¡Esto es por y para cada uno de ustedes!

Luis Paúl Chuma Pomasqui

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a mi querida madre Elena C, mi más grande tesoro que Dios pudo brindarme en esta vida, estoy eternamente agradecido por su gran sacrificio, lucha y constante perseverancia. Durante la infancia superamos valientemente bastantes y difíciles momentos en el camino, y alcanzar y cumplir todos y cada uno de nuestros sueños. Donde me inculcó muchos principios y valores éticos y morales con gran persistencia para cambiar al mundo a uno mejor, siempre serás mi motor y mi inspiración, te amo mucho.

A mi hermano René, quién siempre amaré porque ambos conocemos la humildad y esfuerzo de nuestra madre, por eso ahora, luchamos por un futuro brillante.

Asimismo, agradezco a mi abuelito, tíos, primos quienes me motivan a continuar a cumplir más logros. En especial, a mi querida abuelita Marianita C, quién extraño mucho y ahora descansa en paz en el regocijo de nuestro Señor Dios y allá en el cielo estará contenta y orgullosa de mí, te amaré eternamente por criarme y brindarme tu esencia y sabiduría para no darme por vencido y alcanzar mis sueños, con mucho amor eres mi angelito, mi guía, luz y esperanza.

A mi hermano de corazón Paúl Ch, quién apreció bastante y tuvimos la oportunidad de incursionar y culminar esta última aventura universitaria, que nos llenó de gratas experiencias, divertidos momentos, apoyo incondicional y una inmensa alegría de conocer a toda su familia, en especial a la Sra. Marlene P, quién estimó mucho.

A la Universidad Técnica del Norte y a todos mis mejores amigos, vivirán en mi corazón y espero que cada uno continúe superándose y así lo será, Dios les bendiga.

Pablo David Coronado Cacuango

ÍNDICE DE CONTENIDO

CONTENIDO	Páginas
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Revisión de antecedentes o estado del arte	1
1.2 Problema de investigación y justificación.....	3
1.3 Objetivos	5
<i>1.3.1 Objetivo General.....</i>	<i>5</i>
<i>1.3.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>6</i>
1.4 Preguntas directrices de la investigación	6
1.5 Hipótesis	6
CAPÍTULO II	7
REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
2.1 Incendios en la cobertura vegetal.....	7
<i>2.1.1 Causas que inciden a la ocurrencia de un incendio</i>	<i>7</i>
<i>2.1.2 Alteraciones al entorno biofísico por incendios de cobertura vegetal .</i>	<i>8</i>
<i>2.1.3 Dimensión espacial y magnitud de las perturbaciones por incendios en la cobertura vegetal</i>	<i>10</i>
<i>2.1.4 Probabilidad de incidencia y propagación del fuego.....</i>	<i>11</i>
2.1.4.1 Variables meteorológicas o climáticas	11
2.1.4.2 Variables topográficas o físicas.....	12
<i>2.1.5 Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica en la determinación a riesgo de incendios</i>	<i>13</i>
2.1.5.1 Zonificación de áreas propensas a incendios.....	13
2.1.5.2 Niveles de susceptibilidad a incendios	14
<i>2.1.6 Métodos analíticos para la estimación y categorización a riesgo de incendios</i>	<i>14</i>

2.1.6.1	Análisis multicriterio para la zonificación de incendios	14
2.1.6.2	Análisis de sensibilidad del proceso analítico jerárquico	15
2.1.6.3	Radiofrecuencia.....	16
2.1.6.4	Validación y ponderación estadística	16
2.1.7	<i>Gestión de riesgo</i>	19
2.1.7.1	Gestión a riesgo de incendios	20
2.1.7.2	Planeación estratégica de gestión a riesgos	20
2.2	Marco legal	21
	CAPITULO III.....	23
	METODOLOGÍA	23
3.1	Descripción del área de estudio	23
3.1.1	<i>Población</i>	26
3.1.2	<i>Cambio de uso del suelo</i>	27
3.1.3	<i>Situación actual del cantón Cotacachi</i>	27
3.2	Métodos.....	28
3.2.1	<i>Modelos de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal mediante la combinación de variables biofísicas y sociales</i>	28
3.2.1.1	Variables topográficas o físicas.....	29
3.2.1.2	Variables meteorológicas	33
3.2.1.3	Variables sociales	42
3.2.1.4	Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ).....	44
3.2.1.5	Radiofrecuencia (RF)	45
3.2.2	<i>Zonificación de los diferentes niveles de susceptibilidad a incendios en las categorías de cobertura vegetal</i>	46
3.2.2.1	Validación de datos	47
3.2.3	<i>Definición estrategias de prevención de incendios para la cobertura vegetal en el cantón Cotacachi</i>	48

3.2.3.1 Matriz FODA.....	48
3.3 Materiales y equipos	49
CAPÍTULO IV	50
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1 Modelos de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal	50
4.1.1 <i>Variables topográficas o físicas</i>	50
4.1.1.1 Altitud.....	50
4.1.1.2 Pendiente del terreno	52
4.1.1.3 Orientación del terreno	53
4.1.1.4 Cobertura y uso del suelo	55
4.1.2 <i>Factores climáticos o meteorológicas</i>	57
4.1.2.1 Precipitación media anual.....	57
4.1.2.2. Temperatura media anual	59
4.1.2.3. Evapotranspiración potencial	62
4.1.2.4. Déficit hídrico.....	64
4.1.2.5. Velocidad del viento.....	66
4.1.3. <i>Variables sociales</i>	67
4.1.3.1. Proximidad a carreteras	67
4.1.3.2 Proximidad a espacios agrícolas.....	69
4.1.4 <i>Proceso de análisis jerárquico (PAJ)</i>	71
4.1.5 <i>Radiofrecuencia (RF)</i>	73
4.2 Zonificación de los diferentes niveles de susceptibilidad a incendios en las categorías de cobertura vegetal.....	77
4.2.1 <i>Categorización de los diferentes niveles de susceptibilidad</i>	77
4.2.1.1 Modelo de susceptibilidad PAJ	78
4.2.1.2 Modelo de susceptibilidad RF.....	80
4.2.2 <i>Validación de datos</i>	83

4.2.2.1 Chi Cuadrado.....	83
4.2.2.2 Curva ROC	84
4.3 Diseño de estrategias de gestión de incendios de cobertura vegetal.....	86
4.3.1 Matriz FODA	86
4.3.1.1 Identificación de estrategias	87
CAPÍTULO V.....	104
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	104
5.1 Conclusiones	104
5.2 Recomendaciones	105
REFERENCIAS	106
ANEXOS.....	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Causas de incendios forestales	8
Tabla 2. Impactos ambientales sobre el medio físico.....	8
Tabla 3. Impactos ambientales sobre la flora.....	9
Tabla 4. Impactos ambientales sobre la fauna.....	10
Tabla 5. Variables meteorológicas o climáticas.....	11
Tabla 6. Variables topográficas o físicas	12
Tabla 7. Niveles de susceptibilidad.....	14
Tabla 8. Escala fundamental de comparación por pares	16
Tabla 9. Matriz de confusión, categorías diagnosticadas para la exactitud	18
Tabla 10. Método de análisis de problemas	21
Tabla 11. Ecosistemas presentes en el cantón Cotacachi.....	25
Tabla 12. Población del cantón por parroquias y genero	26
Tabla 13. Clasificación de la altitud y el peso asignado al riesgo a incendio	29
Tabla 14. Clasificación de pendientes y el peso asignado al riesgo a incendio	30
Tabla 15. Orientación del terreno.....	30
Tabla 16. Tipos de cobertura para el cantón Cotacachi para el año 2020.....	32
Tabla 17. Coeficiente de Kappa	32
Tabla 18. Estaciones meteorológicas para precipitación media anual proyección WGS84 UTM 17S.....	33
Tabla 19. Clasificación de la precipitación media anual y el peso asignado al riesgo a incendio en el cantón Cotacachi.....	35
Tabla 20. Estaciones meteorológicas para temperatura media anual proyección WGS84 UTM 17S.....	36
Tabla 21. Clasificación de temperatura y el peso asignado al riesgo a incendio	38
Tabla 22. Factor de corrección.....	40
Tabla 23. Clasificación de la ETP y el peso asignado al riesgo a incendio	40
Tabla 24. Clasificación del déficit hídrico y el peso asignado al riesgo a incendio...	41

Tabla 25. Clasificación de la proximidad a carreteras y el peso asignado al riesgo a incendio.....	43
Tabla 26. Clasificación de la proximidad a espacios agrícolas y peso de riesgo a incendio.....	43
Tabla 27. Escalas de jerarquía del método Saaty.....	44
Tabla 28. Materiales utilizados en la investigación.....	49
Tabla 29. Comparaciones pareadas.....	71
Tabla 30. Ponderaciones de factores según Saaty.....	72
Tabla 31. Ponderaciones de factores reclasificadas según Radiofrecuencia (RF).....	75
Tabla 32. Tasa de predicción de RF y predicción de comparación por pares.....	75
Tabla 33. Prueba estadística Chi Cuadrado de Pearson para modelamiento de incendios PAJ y RF.....	84
Tabla 34. Área bajo la curva para los modelos a incendios.....	85
Tabla 35. Análisis FODA cantón Cotacachi.....	86
Tabla 36. Cruce de variables del FODA.....	87
Tabla 37. Programa de Sistema de Alerta Temprana.....	90
Tabla 38. Área visible y coordenadas de las torres de vigilancia proyección WGS84 UTM 17S.....	93
Tabla 39. Programa de implementación de torres de vigilancia.....	94
Tabla 40. Ubicación de brechas y franjas cortafuegos proyección WGS84 UTM 17S.....	96
Tabla 41. Programa de implementación de brechas y franjas cortafuegos.....	97
Tabla 42. Programa de formación y cooperación de brigadas comunitarias.....	99
Tabla 43. Programa de educación ambiental.....	101
Tabla 44. Programa monitoreo mediante drones.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Normativa legal vigente de la república del Ecuador, vinculados al estudio	22
Figura 2. Ubicación del cantón Cotacachi	23
Figura 3. Tipos de ecosistemas en el cantón Cotacachi	25
Figura 4. A. Altitud del cantón Cotacachi; B. Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la altitud del cantón de Cotacachi.....	51
Figura 5. A. Pendientes del terreno del cantón Cotacachi; B. Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la altitud del cantón de Cotacachi.....	53
Figura 6. A. Orientación de terreno del cantón Cotacachi; B. Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la orientación del terreno del cantón de Cotacachi.....	54
Figura 7. A. Cobertura y uso del suelo del cantón Cotacachi; B. Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la cobertura y uso del suelo del cantón de Cotacachi.....	56
Figura 8. A. Precipitación media anual del periodo 1986-2015 del cantón de Cotacachi; B. Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la precipitación del cantón de Cotacachi.....	58
Figura 9. A. Temperatura media anual del periodo 1986-2015 del cantón de Cotacachi; B. Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la temperatura del cantón de Cotacachi.....	60
Figura 10. Diagrama ombrotérmico del cantón Cotacachi del periodo 1986-2015...	61
Figura 11. Relación entre precipitación y número de incendios del cantón Cotacachi	62
Figura 12. A. Evapotranspiración potencial del cantón de Cotacachi; B. Rangos de susceptibilidad a incendios con base en la ETP del cantón de Cotacachi.....	64
Figura 13. A. Déficit hídrico del cantón de Cotacachi; B. Rangos de susceptibilidad a incendios con base al déficit hídrico del cantón de Cotacachi.....	65

Figura 14. A. Velocidad del viento para el cantón de Cotacachi; B. Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la velocidad del viento del cantón de Cotacachi	67
Figura 15. A. Proximidad a carreteras del cantón de Cotacachi; B. Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la proximidad a carreteras del cantón de	69
Figura 16. A. Proximidad a espacios agrícolas del cantón de Cotacachi; B. Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la proximidad a espacios agrícolas del cantón de Cotacachi.....	70
Figura 17. Modelo de zonificación de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal por el proceso de análisis jerárquico	73
Figura 18. Reclasificación de los factores causales mediante la ponderación SA.....	74
Figura 19. Modelo de zonificación de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal por el método radiofrecuencia.....	77
Figura 20. Modelo de susceptibilidad a incendios para el cantón Cotacachi, metodología proceso de análisis jerárquico	78
Figura 21. Niveles de susceptibilidad para la zona Andina y Tropical, Modelo PAJ	79
Figura 22. Gráfico de barras 100% apiladas de la susceptibilidad sobre las coberturas vegetales, Modelo PAJ.....	80
Figura 23. Modelo de susceptibilidad a incendios para el cantón Cotacachi, metodología radiofrecuencia.....	81
Figura 24. Niveles de susceptibilidad para la zona Andina y Tropical, Modelo RF .	82
Figura 25. Gráfico de barras 100% apiladas de la susceptibilidad sobre las coberturas vegetales, Modelo RF.....	83
Figura 26. Curva ROC	84
Figura 27. Sistema de Alerta Temprana.....	89
Figura 28. Torres de vigilancia en el cantón Cotacachi.....	91
Figura 29. Ubicación de apertura de brechas y franjas cortafuegos	95

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ZONIFICACIÓN DE COBERTURA VEGETAL PROPENSA A INCENDIOS
EN EL CANTÓN COTACACHI PROVINCIA DE IMBABURA

Luis Paúl Chuma Pomasqui
Pablo David Coronado Cacuango

RESUMEN

En los últimos años los incendios forestales han sido cada vez más intensos, mismos que han provocado daños irreversibles en los ecosistemas, al alterar y eliminar la cobertura vegetal, reducir los servicios ecosistémicos y su capacidad de resiliencia natural. En la presente investigación se determinaron áreas susceptibles a incendios forestales para el cantón Cotacachi, debido al creciente registro de incendios y la pérdida de cobertura vegetal principalmente en su cabecera cantonal entre 15 y 300 hectáreas por año. Para evaluar la susceptibilidad se establecieron 11 factores, clasificados en factores topográficos (altitud, pendiente del terreno, orientación del terreno y cobertura y uso del suelo); factores meteorológicos (precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, déficit hídrico y velocidad del viento) y sociales (cercanía a caminos y proximidad a espacios agrícolas) que fueron categorizadas mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y ponderadas a través del Proceso de Análisis Jerárquico y de Radiofrecuencia. Los resultados evidenciaron que la metodología de radiofrecuencia presentó una mejor calidad de análisis según sus pruebas estadísticas de Chi-cuadrado y curva ROC (0.000002 y 0.897). El cantón Cotacachi presentó cinco niveles de susceptibilidad a incendios en su territorio: muy baja (0.09%); baja (16.41%); moderada (33.86%); alta (33.67%) y extrema (15.97%). El tipo de cobertura vegetal más propensa a incendios es el páramo andino. Finalmente, se utilizó la metodología FODA para implementar estrategias asociadas a un sistema de alerta temprana para solucionar problemas a corto, mediano y largo plazo en sectores con mayor vulnerabilidad en el cantón Cotacachi.

Palabras clave: Incendios, Zonificación, Frecuencia relativa, Susceptibilidad, SIG.

ABSTRACT

In recent years, forest fires have been more intense, causing irreversible damage to ecosystems, altering, and eliminating vegetation cover, reducing ecosystem services and their capacity for natural resilience. In this research, areas susceptible to forest fires were determined for the canton of Cotacachi, due to the increasing registration of fires and the loss of vegetation cover mainly in its cantonal seat between 15 and 300 hectares per year. To assess susceptibility, 11 factors were established, classified in topographic factors (altitude, terrain slope, terrain orientation and land cover and use); meteorological factors (precipitation, temperature, potential evapotranspiration, water deficit and wind speed) and social (proximity to roads and proximity to agricultural spaces) that were categorized by Geographic Information Systems (GIS) and weighted through the Hierarchical and Radio Frequency Analysis. The results showed that the radiofrequency methodology presented a better quality of analysis according to its statistical tests of Chi-square and ROC curve (0.000002 and 0.897, respectively). Cotacachi canton had five levels of susceptibility to fires in its territory: very low (0.09%); low (16.41%); moderate (33.86%); high (33.67%); and extreme (15.97%). The most fire-prone type of vegetation cover is the wasteland. Finally, the SWOT methodology was used to implement strategies associated with an early warning system to solve short-, medium- and long-term problems in sectors with greater vulnerability in the canton of Cotacachi.

Key words: Fires, Zoning, Relative frequency, Susceptibility, GIS.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Revisión de antecedentes o estado del arte

En el transcurso del tiempo se ha evidenciado distintas alteraciones sobre los ecosistemas y sus componentes. Estas perturbaciones son de origen abiótico como: incendios, deslizamientos, temblores, tormentas eléctricas y otros. Mientras que, las perturbaciones de origen biótico se deben a la presencia de plagas o enfermedades que amenazan al número de especies, poblaciones y comunidades, donde su intensidad puede aumentar sino existe un control apropiado (Gurrutxaga y Lozano, 2008). Sin embargo, Hoang et al., (2020) mencionan que “dichas alteraciones han moldeado la composición y estructura de los ecosistemas, donde el fuego es el principal factor que impacta sobre su dinámica y sus procesos naturales”.

Moya et al., (2021) afirman que los incendios forestales son caracterizados como disturbios o perturbaciones, debido a que tienen la capacidad de propagarse sin control y consumir todo el material vegetal a su paso (Santacruz y Palacio, 2018). Asimismo, ocasionan pérdidas de cobertura vegetal o de biomasa, que se originan de forma súbita (imprevista) o episódica (accidental) (Tadesse et al., 2017). Otros efectos adicionales que ocasionan los incendios forestales son la pérdida de hábitats y fauna (Ramírez et al., 2018; Guil et al., 2018), alteraciones edáficas, hídricas y cambios en el paisaje (Butler et al., 2018; Capador et al., 2021). Sin embargo, el efecto directo se centra en la pérdida de toda la cobertura vegetal por donde se propagó el fuego. En consecuencia, a este tipo de incendios, en el idioma español, se los debería definir como incendios de cobertura vegetal, y no únicamente como forestales. De esta manera no se reduce ni se sesga el análisis únicamente a la cobertura bosque.

El riesgo, la susceptibilidad y la vulnerabilidad a incendios se zonifican actualmente mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Donde varios métodos

han sido aplicados a fin de desarrollar modelos espacialmente explícitos de incendios forestales y cobertura vegetal (Suryabhadgavan et al., 2016; Abedi et al., 2019), a partir de enfoques como regresión logística (Rodríguez et al., 2018), Proceso Jerárquico Analítico (Coelho et al., 2016), Redes neurales (Naderpour et al., 2021) e incluso Radiofrecuencia (Jaafari y Gholami, 2017).

En general, a nivel mundial se ha identificado que los incendios de cobertura vegetal se originan y se propagan por factores ambientales, geomorfológicos y humanos. Un estudio en los bosques del Medio Oriente, Irán, al analizar la eficiencia sobre el mapeo de riesgos a incendios forestales basado en SIG después de utilizar métodos de red analítica y lógica difusa. Establecieron que los factores relacionados con el clima, topografía y tipo de combustible inciden a la ocurrencia de incendios, de modo, que permitió a los investigadores predecir “cuándo y dónde”, es probable la generación y propagación a incendios forestales con la finalidad de planificar alertas tempranas a su extinción en zonas vulnerables (Abedi et al., 2019).

En Bosnia y Herzegovina, al ejecutar la misma metodología lograron identificar que el riesgo a incendios de cobertura vegetal se encuentra relacionado específicamente a los factores socioeconómicos como, distancia a carreteras y distancia de asentamientos humanos (Gigović et al., 2018). Por consiguiente, ayudó a los municipios a aumentar la conciencia y responsabilidad ambiental para la elaboración de un plan de mitigación al riesgo de incendios en su localidad (Jahdi et al., 2020).

Un estudio similar realizado en España determinó que estos incendios están relacionados a factores topográficos como, los modelos de combustible y el riesgo causado por el hombre al ser una amenaza a la probabilidad de ignición del fuego (Yago et al., 2019). Los factores que normalmente se han identificado con mayor incidencia son los topográficos (pendiente del terreno, altitud y coberturas vegetales) y meteorológicos (evapotranspiración y precipitación) (Coelho et al., 2016; Nikhil et al., 2021).

En Latinoamérica, estudios realizados en Costa Rica, Colombia y Brasil han identificado que los factores con mayor incidencia en la generación de incendios son el brillo solar, insolación, altitud sobre el nivel del mar, uso y cobertura de tierra y proximidad a carreteras; los cuales fueron modeladas mediante Técnicas de Evaluación Multicriterio en SIG (Vargas y Campos, 2018; Tebbutt et al., 2021; De Andrade et al., 2020).

En Ecuador, se han realizado pocas investigaciones que aborden esta temática (Estacio y Narváez, 2012). Sin embargo, en la provincia de Imbabura, son algunos los estudios que consideran que las propagaciones de este tipo de incendios en el país generan incendios de cobertura vegetal (Monjarás et al., 2020). De acuerdo con Arias et al., (2020) comprobaron que el factor principal de ignición es la cobertura vegetal, mientras que los secundarios son la temperatura, precipitación y orientación del terreno que inciden en la velocidad y propagación de los incendios de cobertura vegetal en el cantón Pimampiro, con una susceptibilidad muy alta de 40.42%, donde las áreas más vulnerables son los pastos, bosques y vegetación arbustiva.

Asimismo, Anrango et al., (2020) en su estudio realizado para el cantón Ibarra “determinaron que los factores con mayor ponderación es la cobertura vegetal y uso del suelo como combustible para la propagación de los incendios”, donde las áreas con mayor riesgo son los cultivos, pastizales, vegetación arbustiva y bosque. Mismos que presentaron una susceptibilidad extrema en su territorio que corresponde al 14.55% de su extensión.

1.2 Problema de investigación y justificación

Los incendios forestales han generado varias perturbaciones ecológicas a grandes escalas espaciales y temporales muy variadas. Los cuales afectan sobre la estructura y el funcionamiento en los ecosistemas terrestres, comunidades y población al disminuir la disponibilidad de los recursos naturales (Vásquez, 2016; Moreno, 2005). Son

considerados como un factor determinante en la distribución, modelamiento de espacios forestales y el tipo de cubiertas vegetales (Vázquez y Rodríguez, 2008).

Según la (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020) estima que, el área de la cobertura de los bosques a nivel internacional corresponde a 4 060 millones de hectáreas, al ser el 31% de la superficie total de la tierra. Sin embargo, desde 1990 existe una reducción de 1 780 millones de hectáreas producidas por diversos factores naturales y antropogénicos. Los cuales perturban negativamente la sanidad, vitalidad, la relación entre los componentes bióticos y abióticos, y la reducción de la capacidad de proveer bienes y servicios ecosistémicos del medio natural.

De acuerdo con Ustin et al., (2009) los incendios forestales son uno de los factores ambientales críticos que afectan directamente a los ecosistemas con una alta incidencia durante el verano, después de la sequía estacional, prácticas tradicionales del uso de la tierra y recientemente por el cambio climático. No obstante, la utilización de tecnologías de SIG proporciona información relevante para la toma de decisiones (pp.41-53). Como afirman Monjarás et al., (2020) existe una escasa información en estudios que analizan los patrones espaciales de ocurrencia a incendios, densidad, estacionariedad espacial a múltiples escalas.

En 2015 se reportó una pérdida de 98 millones de hectáreas de bosque producto de los incendios de cobertura vegetal. Mientras que, en 2019 se registraron los peores casos de incendios forestales en la cuenca de la Amazonía, en Indonesia, en Australia y otros (Guamán et al., 2020; FAO, 2020). Como expresa Gonzales et al., (2013) cada año se emite una media anual de 2 013 teragramo de C proveniente de la quema de vegetación de 2.5 y 4.0 millones de km² a nivel mundial.

Asimismo, en Ecuador durante el año 2020 se produjo una pérdida de 27 904.91 hectáreas de cobertura vegetal en todo su territorio producto de la propagación a incendios de 2 332 eventos registrados. En la provincia de Imbabura, se cuantificó un

total de 165 número de incendios forestales con una cobertura vegetal quemada de 1 662.16 hectáreas (Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencia [SNGRE], 2020). Los bosques de Ecuador alojan a varias poblaciones indígenas, colonias y tribus, donde algunas tienen una fuente de ingresos monetarios por medio de los recursos maderables, al existir una regulación de aprovechamiento forestal con relación a una sostenibilidad del bosque como bien público y dominio del estado (De la Fuente, 2017).

Uno de los principales efectos ocasionados por el cambio climático es la propagación de la época seca. En los últimos años se ha evidenciado esta situación de manera drástica sobre la región sierra norte del Ecuador al provocar incendios forestales naturales y por acción del hombre, en su gran mayoría con una propagación sin control. Según la Secretaria Nacional de Planificación, en su (Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025, pp. 83) en el Eje de Transición Ecológica, de acuerdo con el objetivo 11: Enfatiza y promueve las condiciones legales, económicas y de protección ambiental necesarias para lograr el funcionamiento de actividades humanas en el marco de la transición ecológica, que permita la conservación de los hábitats, la gestión eficiente de los recursos naturales y la reparación de los ecosistemas. Por ello, el presente tema de investigación pretende contrarrestar los efectos irreversibles de los incendios de cobertura vegetal mediante la determinación de zonas susceptibles ocasionados en gran parte de la vegetación natural en los ecosistemas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar las áreas susceptibles a incendios de cobertura vegetal con la finalidad proponer estrategias de gestión de riesgo en el cantón Cotacachi de la provincia de Imbabura.

1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer dos modelos de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal mediante la combinación de variables bio físicas y sociales.
- Zonificar los diferentes niveles de susceptibilidad a incendios en las categorías de cobertura vegetal.
- Definir estrategias de prevención de incendios para la cobertura vegetal en el cantón Cotacachi.

1.4 Preguntas directrices de la investigación

¿Cuáles son los factores biofísicos y sociales que construyen los modelos de susceptibilidad de incendios en la cobertura vegetal del cantón Cotacachi?

¿Cuáles son las categorías de cobertura vegetal más susceptibles a incendios en el cantón Cotacachi?

1.5 Hipótesis

Ho: Los modelos de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal no se relacionan con el peligro histórico de incendio en el territorio.

Ha: Los modelos de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal sí se relacionan con el peligro histórico de incendio en el territorio.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Incendios en la cobertura vegetal

Desde la antigüedad, el fuego es considerado parte del proceso ecológico en los ecosistemas terrestres, debido a que el hombre en tiempos ancestrales evidenció su rol ecológico, al ser un regulador en los procesos de evolución de la tierra, principalmente si proviene de un origen natural (Vásquez, 2016). Por lo tanto, existen diferentes escalas de afectaciones, como: incendios de copa, que afectan directamente sobre la vegetación alta; superficiales, que consumen todo el contenido de depósito del horizonte 0 del suelo; y subterráneos, considerados aquellos que devastan las raíces ubicadas en el horizonte A (Ruiz y Blanco, 2004).

No obstante, al ser incontrolables, los incendios pueden ser catalogados mediante su régimen. Por ende, cuando los regímenes son modificados ya sean de forma natural o antrópica, favorecen a la contaminación ambiental al generar emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera (D'Annunzio, 2012). Sin embargo, a nivel mundial se considera que la variabilidad a incendios es recurrente, debido a que su acción no solo se limita a devastar la vegetación presente, sino que ocasiona impactos irreversibles, por lo que causa pérdidas de vidas humanas, daños ambientales y especialmente la degradación lenta del suelo (Aguado et al., 2004).

2.1.1 Causas que inciden a la ocurrencia de un incendio

La ocurrencia y propagación de un incendio se relaciona con la existencia de tres factores: la disponibilidad de los combustibles, la existencia de fuentes de inflamación y las condiciones meteorológicas presentes en el mantillo superficial (Carrasco, 2016). Estos componentes facilitan a la propagación del fuego en distintas direcciones y escalas. Su perturbación y continuidad varía de acuerdo con el tipo de bioma al que

pertenece, por lo tanto, los incendios de cobertura vegetal pueden originarse por diversos factores, como se representa en la Tabla 1.

Tabla 1. Causas de incendios forestales

Nro.	Causas	Definición	Factores
1	Causas Naturales	Resultado de los diferentes cambios en el ambiente	Clima: Temperatura, Humedad, Vientos y Tormentas. Vegetación: Densidad. Topografía: Laderas y Orientación del terreno. Población: Densidad, Estacional y Niveles de explotación agrícola. Infraestructura: Conexiones eléctricas.
2	Causas Antrópicas	Resultado de actividades humanas	Actos vandálicos: Pirómanos. Quemas agrícolas: Rastrojos, Pastizales y Basura. Usos lúdicos: Fogatas, Hogueras y Parrilladas.

Fuente: Pérez (2016). *Dirección técnica en extinción de incendios forestales*, 57.

2.1.2 Alteraciones al entorno biofísico por incendios de cobertura vegetal

Existen distintas modificaciones sobre el medio físico natural a causa de los incendios, los cuales alteran las variables químicas, físicas del ambiente (humedad, temperatura, composición química, entre otras) y a los ciclos naturales en los que intervienen, como se evidencia en la Tabla 2.

Tabla 2. Impactos ambientales sobre el medio físico

Impactos	Descripción
Atmósfera	Relacionada a la producción de gases y partículas resultantes de la combustión de biomasa y su liberación a la atmósfera. Principalmente estos son (CO ₂ y HCO), (CH ₄), (N ₂ O), (NOx) y (HCa). Además, liberan material particulado, como: Los PM _{2,5} , que son los más dañinos. La mezcla de estos gases y el material particulado incide negativamente sobre la actividad fotosintética de las plantas, al disminuir su productividad (Ackerman et al., 2000).
Suelo	Una de las consecuencias más relevantes es la afectación directa sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y provoca condiciones óptimas para la erosión

del suelo, mismos que eliminan sustancialmente la carga orgánica de su capa superficial (Giovannini y Luchéis, 1988).

Origina diversas perturbaciones sobre los ecosistemas acuáticos. Por lo cual, generan impactos indirectos sobre el recurso hídrico, como: la contaminación química del agua, incremento de turbiedad por solidos disueltos, degradación del hábitat acuático, alteraciones de abastecimiento, disminución del potencial de pesca principalmente a la cadena alimenticia (Del Campo, 2011).

Fuente: Parra et al., (2011). *Incendios de la cobertura vegetal en Colombia*, 24-29.

En contexto, la Tabla 3 describe los impactos más sobresalientes de los incendios sobre la biodiversidad autóctona.

Tabla 3. Impactos ambientales sobre la flora

Impactos	Descripción
Mortalidad de árboles	El exterminio de áreas forestales está directamente relacionado con la ocurrencia de incendios, según diversos autores el rango de mortalidad en los árboles se encuentra entre el 33 y 66% (Cochrane et al., 1999).
Interrupción de los procesos reproductivos	Desaparición temporal o parcial de diferentes especies de polinizadores y dispersores de semillas, al ocasionar una interrupción temporal sobre la capacidad de reproducción sexual en los árboles, a su estrés fisiológico productivo e incapacidad de producción de semillas durante 3 años (Del Campo y Bernal, 2010).
Disminución de la capacidad de regeneración vegetativa	Afectación sobre los tejidos meristemáticos que poseen algunas especies vegetativas localizados en sus ramas, troncos y sistema radicular. Por ende, esta capacidad tarda muchos años en desarrollarse especialmente sobre especies de flora (Rodríguez et al., 2004).
Incremento de plagas y enfermedades	Los incendios en áreas especialmente templadas estimulan la invasión de plagas y enfermedades sobre especies arbóreas, es decir, dependen del grado de resistencia o susceptibilidad de la vegetación afectados por el fuego (Billings y Espino, 2005).
Efectos sobre grupos sensibles	Algunas especies provenientes de las familias Orchidaceae, Araceae y Bromeliaceae, también como los helechos y musgos son vulnerable frente al cambio de los ecosistemas, ocasionado por la reducción y eliminación de árboles longevos, al ser hospederos de éstos (Del Campo et al., 2010).

Fuente: Parra et al., (2010). *Incendios de cobertura vegetal y biodiversidad: una mirada a los impactos y efectos ecológicos potenciales sobre la diversidad vegetal*, 9-11.

La relación de la fauna ante los incendios depende en gran medida al tipo de especie y a su localización geográfica a las cuáles pertenecen. Como en algunos casos, las especies pertenecientes a los reptiles, anfibios y ciertos mamíferos son beneficiados y a su vez, incrementa su abundancia y su diversidad. A diferencia de otras especies, donde su población disminuye (Tabla 4).

Tabla 4. Impactos ambientales sobre la fauna

Impactos	Descripción
Mortalidad directa	En función a la exposición directa en los incendios al generar alteraciones fisiológicas e inhalación de gases.
Mortalidad diferida	Producto de la secuencia de la mortalidad directa, debido a que el fuego altera los diferentes componentes y procesos del ecosistema que sirven de soporte a los animales en sus procesos vitales.
Mortalidad ex situ	Como consecuencia de la emigración no exitosa a ecosistemas aledaños que realizan ciertos individuos para huir de los impactos directos del fuego, donde deben enfrentar desventajas por alimento y evitar ser depredados.

Fuente: Parra et al., (2011). *Incendios de la cobertura vegetal en Colombia*, 36-37.

2.1.3 Dimensión espacial y magnitud de las perturbaciones por incendios en la cobertura vegetal

Los incendios de cobertura vegetal cuya quema no estaba prevista están determinados por la magnitud de sus efectos, sobre la vegetación y los procesos ecosistémicos. No obstante, su baja intensidad ocasiona pequeños impactos sobre la flora y su diversidad, debido a que los incendios pueden ser determinados a escala local, regional o global (Rodríguez et al., 2014). Locales donde el fuego y humo causan daños directos sobre: personas, animales y plantas, al favorecer a la degradación y destrucción en áreas naturales y al recurso suelo (Mielnicki et al., 2005), y regionales o globales al ser los precursores de las emisiones de gases de efecto invernadero, material particulado y elementos metálicos altamente nocivos hacia la atmosfera (Vázquez, 2016).

2.1.4 Probabilidad de incidencia y propagación del fuego

La creciente preocupación de las consecuencias originadas por los incendios en la cobertura vegetal motiva a diversos investigadores a desarrollar técnicas y procesos para comprender las causas y los factores que intervienen en su ocurrencia, principalmente están condicionados a variables que influyen en la ignición Aguado et al., (2004), por ejemplo: variables meteorológicas o climáticas, como; la evapotranspiración potencial, déficit hídrico, precipitación y temperatura. También las variables topográficas o físicas, como: la altitud y la proximidad a carreteras, la orientación del terreno, las pendientes, la cobertura y uso del suelo (Pérez, 2016).

2.1.4.1 Variables meteorológicas o climáticas

La periodicidad y distribución de los incendios están determinados y asociados a distintas condiciones y elementos climáticos, en las cuales presentan un efecto sobre el comportamiento del fuego, como se ilustra en la Tabla 5.

Tabla 5. Variables meteorológicas o climáticas

Variable	Descripción
Evapotranspiración potencial	Cantidad máxima del recurso agua que puede evaporarse hacia la atmosfera en un clima que es determinado por la cubierta vegetal. Así, restringe la necesidad de transpiración y evaporación del suelo (Camargo, 2010).
Déficit hídrico	De acuerdo con Medina et al., (2000) los incendios y su ocurrencia se efectúan principalmente en época seca que concuerda con el periodo de mayor déficit hídrico, en el cual se da una mayor acumulación de material combustible.
Precipitación	Según Pérez et al., (2013) la precipitación es uno de los factores que tiene mayor influencia para determinar el número de incendios, debido a que la humedad de la cobertura vegetal define el grado de inflamabilidad, la cual está dada por las lluvias presentes en cada zona.
Temperatura	Se ha comprobado que la disminución progresiva de humedad del combustible vivo es un buen indicador del riesgo a incendio, a causa de

los periodos largos con altas temperaturas que son originados por el cambio climático (Viegas, 2001; Lloret, 2004).

Fuente: National Wildfire Coordinating (2005). *Manual para la Determinación del Origen y la Causa del Incendio Forestal*, 105-114.

2.1.4.2 Variables topográficas o físicas

El comportamiento del fuego se complementa mediante factores topográficos, por ejemplo: el relieve del terreno y la pendiente del terreno, condicionan a la propagación de los incendios, debido a la cantidad de combustible de origen vegetal (hoja rasca) presente en un área determinada como se representa en la Tabla 6. Asimismo, la variable proximidades a carreteras condiciona los incendios de origen antrópico (Batista et al., 2007).

Tabla 6. Variables topográficas o físicas

Variable	Descripción
Altitud	De acuerdo con Serra y Badia, (2008) la altitud influye como un factor condicionante del tipo de vegetación existente dentro de un área geográfica. Puesto a que en las bajas elevaciones tienden a presentar estaciones de riesgo a incendios más largos que en las altas elevaciones.
Proximidad a carreteras	Un estudio realizado por Pérez et al., (2013), demuestra que las zonas con menor distancia respecto a las áreas urbanizadas varían en su red vial, al presentar probabilidades de ignición de acuerdo con la orientación del terreno.
Pendiente del terreno	La velocidad con la que se propagan los incendios aumenta debido al crecimiento de las pendientes, de modo que en terrenos escarpados la propagación será mayor (Batista, 2007).
Cobertura y uso del suelo	Según Aguado et al., (2004) el condicionante principal que determina la intensidad y propagación del fuego para cada zona será con base al tipo de vegetación, ya que determinan cierto grado de probabilidad a incendiarse, propagarse.

Fuente: Lozano (2011). *Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgo a incendios de cobertura vegetal*, 55-59.

2.1.5 Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica en la determinación a riesgo de incendios

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son un conjunto de componentes específicos que permiten analizar, modelar, almacenar, relacionar y representar información gráfica y alfanumérica georreferenciada, que es de gran ayuda a solucionar, gestionar y planificar el territorio (Quesada, 2019). Estas técnicas priorizan a una o varias delimitaciones de espacios de terreno recurrentes ante una problemática con una finalidad de evitar reducciones sobre las poblaciones vegetativas, dado a que en casos extremos su propagación genera una connotación territorial, vinculadas a condiciones o variables climáticas, topográficas, geográficas y sociales acorde a la irregularidad de incendios, por medio de la aplicación de los SIG. Esta información y metodologías se basa en algoritmos iguales y estructurales necesarios para la representación gráfica (Álvarez, 2000; Castillo et al., 2002; Anrango et al., 2020).

2.1.5.1 Zonificación de áreas propensas a incendios

La zonificación radica en delimitar espacios territoriales con un manejo o una aplicación homogénea para cumplir diversos objetivos establecidos dentro del área. Su desarrollo implica la recopilación, uso y análisis de variables para una homogenización de los datos que componen un modelo matricial y la ejecución en programas de modelamiento al emplear un análisis multicriterio (Centros de Estudios Agrarios y Ambientales [CEA], 2013). Su utilización es variada. No obstante, la aplicación en la zonificación de amenaza y riesgo de incendios se basa en distribuir e identificar áreas homogéneas acorde a su rango potencial o real para la estimación relativa (amenaza o riesgo) a ocurrencia y propagación de incendios. Estas investigaciones se emplean para la toma de decisiones vinculándose dentro del ordenamiento territorial (Suárez, 2009).

La generación de modelos se basa en la utilización de diversos factores biofísicos que influyen a la ocurrencia de incendios, los cuales ayudan a identificar áreas sensibles por medio de plataformas y tecnologías avanzadas, donde en muchas ocasiones los

investigadores han optado en la utilización de los SIG (Ustin, 2009; Gonzales, 2013; Arias et al., 2020; Monjarás et al., 2020).

2.1.5.2 Niveles de susceptibilidad a incendios

Aché et al., (2008) mencionan que la susceptibilidad se origina a través de la síntesis en la interrelación de los parámetros físico-natural (cobertura vegetal, pendiente, precipitación, temperatura, cobertura entre otros) y socioeconómico (cultivos, vías entre otros) que inciden en la generación y propagación a incendios, como se representa en la Tabla 7.

Tabla 7. Niveles de susceptibilidad

Niveles	Descripción
Poca probabilidad	Con base a la cobertura vegetal y ocurrencias a incendios, mismos que albergan una poca prioridad en la prevención y extinción a incendios.
Moderada susceptibilidad	La interrelación entre la masa vegetal y la presencia moderada a fuerte intervención promueve a la implementación de acciones de vigilancia en el área.
Extrema susceptibilidad	Zonas con una alta predominancia de vegetación muy inflamable con una intervención severa, que demanda una máxima prioridad de prevención y extinción de incendios.

Fuente: Arias et al., (2020). *Zonificación de Áreas Propensas a Incendios de Cobertura Vegetal en la Subcuenca del río Mataquí ubicada en la Provincia Imbabura.*

2.1.6 Métodos analíticos para la estimación y categorización a riesgo de incendios

A continuación, se describen los métodos analíticos con base a diferentes autores.

2.1.6.1 Análisis multicriterio para la zonificación a riesgo de incendios

Se conoce como una metodología proveniente del área de la investigación de operaciones para la toma de decisiones. Al ser un mecanismo para el análisis de variables o alternativas de decisión que a su vez cumplen con los objetivos en relación con criterios cuantitativos o cualitativos para alcanzar una evaluación acertada

Degioaani et al., (2017), que proporciona una clasificación metodológica para los tratamientos de problemas relacionados a decisiones complejas con varios criterios en conflicto (Leyva, 2011).

2.1.6.2 Análisis de sensibilidad del proceso analítico jerárquico

La aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (Analytical Hierarchy Process, AHP, por sus siglas en inglés), elaborado por Saaty (1980), es una técnica de análisis multicriterio que permite al individuo trasladar la realidad percibida a una escala de razón. Además, utiliza los conglomerados producto de una modelización jerárquica y uso de comparaciones pareadas para incorporar las preferencias (Celemín, 2014). Basándose en la construcción de categorías y establecimiento de prioridades para previamente ejecutar un análisis matemático de la consistencia lógica de las ponderaciones (Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2011). Se toma en cuenta la experiencia y conocimiento de los actores frente a las categorías a utilizarse, donde se agregará una ponderación (Osorio y Orejuela, 2008).

Básicamente, se crea una matriz cuadrada sobre las cuales alberga un número determinado de filas y columnas con base al número de criterios considerados a evaluar. Se establece valores de importancia del uno al nueve, que a su vez contiene el auto vector principal de la matriz. No obstante, a través del autovalor máximo se puede generar una medida cuantitativa de la fiabilidad de los valores asignados en la comparación entre pares de factores, como es la razón de consistencia (RC). Si este valor es menor o igual a 0.10, representa que los valores asignados son satisfactorios, de lo contrario, deben ser ejecutados y evaluados nuevamente (Hervás et al., 2002; Celemín 2014).

Tabla 8. Escala fundamental de comparación por pares

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen un elemento frente al otro.
5	Fuertemente más importante un elemento que en otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica.
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.

Fuente: Osorio, J. y Orejuela, J. (2008). *El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación*, 249.

2.1.6.3 Radiofrecuencia

La radiofrecuencia (RF) es un enfoque estadístico que busca predecir los eventos de riesgos de origen natural y antrópico, se basa en la ocurrencia del evento mediante la asociación de los factores causales, donde la próxima aparición de dichos eventos ocurrirán en las mismas condiciones de los eventos pasados (Lee y Talib, 2005; Althuwaynee et al., 2014). La agrupación entre los SIG y RF construye un mapa de predicción óptima, esta zonificación calculada se relaciona entre el área total de estudio, y la relación entre las probabilidades de que ocurra y no la ocurrencia del evento. Para su cálculo se relaciona la frecuencia de cada rango y tipo de factor, estas frecuencias se suman para calcular un índice de susceptibilidad o predicción (Bonham, 1994; Lee y Talib, 2005; Yilmaz, 2009). Finalmente, los modelos obtenidos se relacionan con la densidad de puntos de ocurrencia del evento en el área de estudio.

2.1.6.4 Validación y ponderación estadística

Alberga un método empírico, a través de la experimentación que construye un ambiente de pruebas donde ocurre el fenómeno. Se mide las variables implicadas en el

procesamiento y análisis estadístico de los datos, finalmente se evalúa para determinar su fiabilidad (Césari, 2006). Entonces, la validación se considera fundamental para la aceptación del modelo, donde la elección de la técnica y prueba estadística a tratarse debe ser única (Mayer y Mayordomo, 1993).

- **Chi-cuadrado**

La prueba Chi-cuadrado (X^2) de Pearson es una técnica estadística no paramétrica, cuyo propósito es determinar o medir si existe o no, una relación sobre las frecuencias de sus variables o categorías seleccionadas, en la cual engloban valores entre cero e infinito, a excepción de los números negativos (Mendivelso, 2018). Se evalúan estos conteos y comparan su distribución, principalmente dentro de los análisis de tablas de contingencia, según la distribución teórica supuesta (McHugh, 2013). Posee tres aplicaciones relevantes, como: Prueba de Bondad de Ajuste (una variable), Prueba de Independencia (dos variables) y Prueba de Homogeneidad (dos variables), como se expresa en la Ecuación 1.

$$\sum x_{i-j}^2 = \frac{(O-E)^2}{E} \quad (1)$$

Dónde:

O: Datos observados.

E: Datos esperados.

X^2 : El valor de chi-cuadrado de la celda.

i-j: *i-j* es la notación correcta para representar todas las celdas, desde la primera celda (i) hasta la última celda (j); en este caso, desde la celda 1 (i) hasta la celda 6 (j).

- **Distribución normal**

La distribución normal o la campana de Gauss se basa en la distribución de probabilidad y el valor de las variables aleatorias, presentándose con relevancia en

fenómenos reales a diferencia de otros tipos de distribución (asimétricas o exponencial). Asimismo, presenta una distribución simétrica, donde el centro de la curva se encuentra en la media, mediana y la moda, y es descrita plenamente por sus dos parámetros, que son la media y la varianza. Donde el área total de la curva representa el 100% de los casos (Argote, 2009; Quevedo, 2011; Dagnino, 2014).

- **Curva ROC**

El análisis de curvas ROC (Receiver Operating Characteristic Curve, por sus siglas en inglés) fue desarrollada en los años 50. Al inicio fue aplicada en problemas prácticos para la detección de señales por radares. Básicamente, se emplea para determinar el punto de corte de una escala continua, al alcanzar la sensibilidad y especificidad más alta (cuyos resultados son interpretados como positivos y negativo). Evalúa, clasifica y compara la capacidad discriminante de una prueba diagnóstica dicotómica. Además, aporta información precisa para la selección de un umbral apropiado y minimiza los falsos positivos y falsos negativos (Cerde y Cifuentes, 2012). No obstante, provee una representación de la sensibilidad y especificidad para cada valor del umbral (Valle, 2017).

Tabla 9. Matriz de confusión, categorías diagnosticadas para la exactitud

		Predicción	
		Positivo	Negativo
Actual	Positivo	Verdadero Positivo	Falsos Negativas
	Negativo	Falsos Positivos	Verdaderos Negativos

Sensibilidad = $\frac{VP}{VP+FN}$; Especificidad = $\frac{VN}{FP+VN}$

Fuente: Cerda y Cifuentes (2012). *Uso de curvas ROC en investigación clínica: Aspectos teóricos-prácticos*, 139.

- **Sensibilidad**

Es la probabilidad de la correcta clasificación de un elemento, individuos o evento cuyo estado real se denomina como positivo asociándose directamente a la condición que estudia, por consecuencia también se le conoce como Fracción de Verdaderos Positivos (FVP), expresado en la Ecuación 2.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{NV}{NV+FP} \quad (2)$$

- **Especificidad**

Es la probabilidad de la correcta clasificación a un elemento, individuo o evento cuyo estado real sea denominado como negativo, al ser igual al resultado de restar a uno la Fracción de Falsos Positivos (FFP), expresado en la Ecuación 3.

$$\text{Especificidad} = \frac{NV}{NV+FP} \quad (3)$$

- **Área bajo la curva (AUC)**

Mide y refleja la exactitud de la prueba para discriminar la prevalencia en la proporción de los verdaderos positivos versus la proporción de los falsos positivos para cada posible umbral o punto de corte de una prueba diagnóstica cuya escala de medición es continua (Valle, 2017).

2.1.7 Gestión de riesgo

Según la FAO (2004), establece que el análisis de riesgo comprende tres etapas, como: la evaluación de riesgo, que aplica métodos científicos y cuantitativos para identificar un peligro determinado; la gestión de riesgo, elección de estrategias mediante la integración de objetivos sociales con la ciencia; y la comunicación de riesgo, ejecución de las alternativas en sectores estratégicos o vulnerables. Sin embargo, la gestión de

riesgos tiene como finalidad disminuir la vulnerabilidad de la sociedad y la naturaleza frente a las amenazas de origen natural y antrópico, que potencializa la resiliencia individual y colectiva para enfrentarlos de manera efectiva a nivel institucional, mismos que garanticen un modelo de gestión que mitigue las consecuencias producto de los riesgos naturales y antrópicos (Secretaría de Gestión de Riesgos y Emergencias, 2014).

2.1.7.1 Gestión a riesgo de incendios

En el Ecuador tras los últimos eventos ocurridos como sismos, inundaciones y deslizamientos provocados por el Fenómeno El Niño y distintas temporadas invernales, y erupciones volcánicas en el país. Se han ejecutado metodologías para la construcción de agendas sectoriales, al ser un instrumento para la planificación del sector. A partir de conocimientos de riesgos de origen natural mediante la participación de actores y responsables para generar acciones claves orientadas al mejoramiento institucional y sectorial (Fondo Mundial para la Reducción de los Desastres y la Recuperación [GFDRR], 2018).

2.1.7.2 Planeación estratégica de gestión a riesgos

La planeación estratégica son herramientas de gestión y esfuerzos sistemáticos que tienen como finalidad formular propósitos, objetivos, políticas y estrategias para su ejecución de planes. Estas alternativas se vinculan a la solución de una situación actual, que toma en cuenta los cambios y demandas a un tiempo, y espacio determinado. Generalmente, contiene una visión a futuro y objetivos de largo plazo (Alumiñas y Galarza, 2016).

El propósito es alcanzar la mayor eficiencia, eficacia, calidad en bienes y servicios en el cumplimiento de sus decisiones y lineamientos establecidos. Su procedimiento se sustenta en la formulación, establecimiento, desarrollo y control de objetivos de

carácter prioritario como las metas organizacionales mediante acciones, estrategias y políticas para asegurar los logros y fines esperados ante un problema (Armijo, 2006).

La gestión de riesgos es el proceso de la planificación estratégica que presenta una alta importancia, donde su desempeño se basa en disminuir las vulnerabilidades, el incremento de las resiliencias y calidad del proceso que se refleja en sus resultados. Sin embargo, debido a la variedad, complejidad y naturaleza de los riesgos, ésta condiciona a los objetivos de forma concreta, en contexto, estructura, cultura y servicios (López y Almuíñas, 2015). En la cual, para conocer el grado y categorización del problema, se aplica el siguiente método (Tabla 10).

Tabla 10. Método de análisis de problemas

Método	Descripción
Matriz de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA)	Se sustenta en la ejecución y evaluación en conjunto de factores fuertes y débiles a través de un cuadro de situación actual, ya sea interna y externa de un estudio (organización, evento, empresa u otro); conociéndose como oportunidades y amenazas. En función de ellos, sirve a la toma de decisiones en relación con los objetivos y políticas, al enfatizar una correcta búsqueda y análisis metodológicos de las variables que intervienen para una óptima toma de decisiones (Ponce, 2007; Sarli et al., 2015).

2.2 Marco legal

Referente al Art. 425 establece el orden jerárquico de aplicación de las normas jurídicas (Constitución de la República del Ecuador, 2008, pp. 202), donde la presente investigación está relacionada a la gestión de riesgo a incendios mediante la zonificación de áreas vulnerables que se vincula a la Constitución de la Republica del Ecuador, Convenio de la Diversidad Biológica; Marco de Sendai; Leyes Orgánicas; Leyes Ordinarias; Leyes Provinciales y Ordenanzas Municipales (Figura 1).

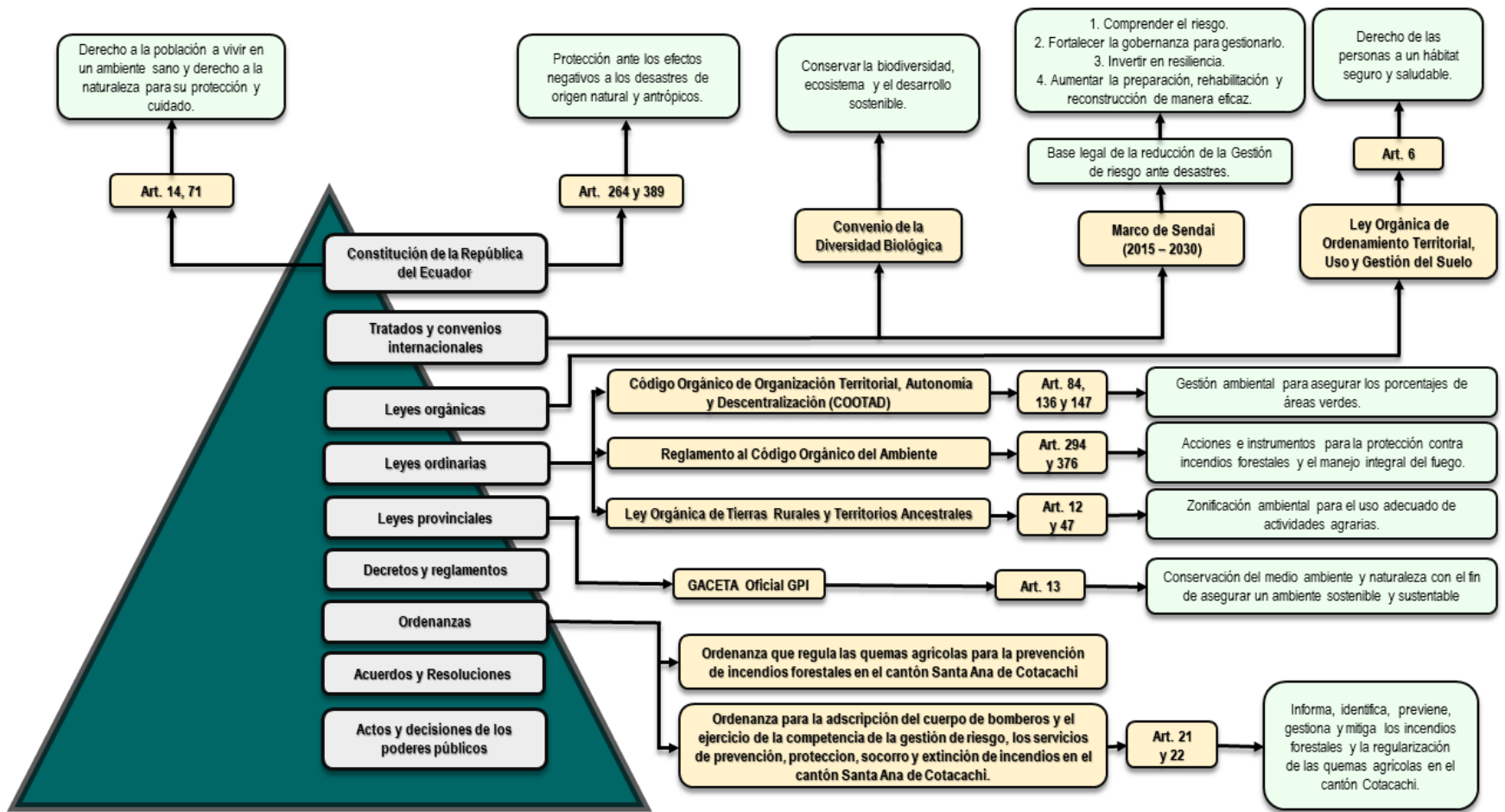


Figura 1. Normativa legal vigente de la república del Ecuador, vinculados al estudio

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 Descripción del área de estudio

El cantón Santa Ana de Cotacachi situado al norte de la república del Ecuador forma parte de la provincia de Imbabura. Sus límites son al Norte: el cantón San Miguel de Urququí; Sur: el cantón Otavalo y la provincia de Pichincha; Este: el cantón Antonio Ante; y Oeste: con la provincia de Esmeraldas, como se representa en la Figura 2. Posee una extensión de 1 815.09 km² y sus altitudes son muy variadas que van desde los 200 m.s.n.m. en la parte occidental, que corresponde al recinto El Progreso hasta los 4 939 m.s.n.m. correspondiente a la cima del volcán Cotacachi (Gobierno Autónomo Descentralizado Santa Ana de Cotacachi, 2015, pp. 20).

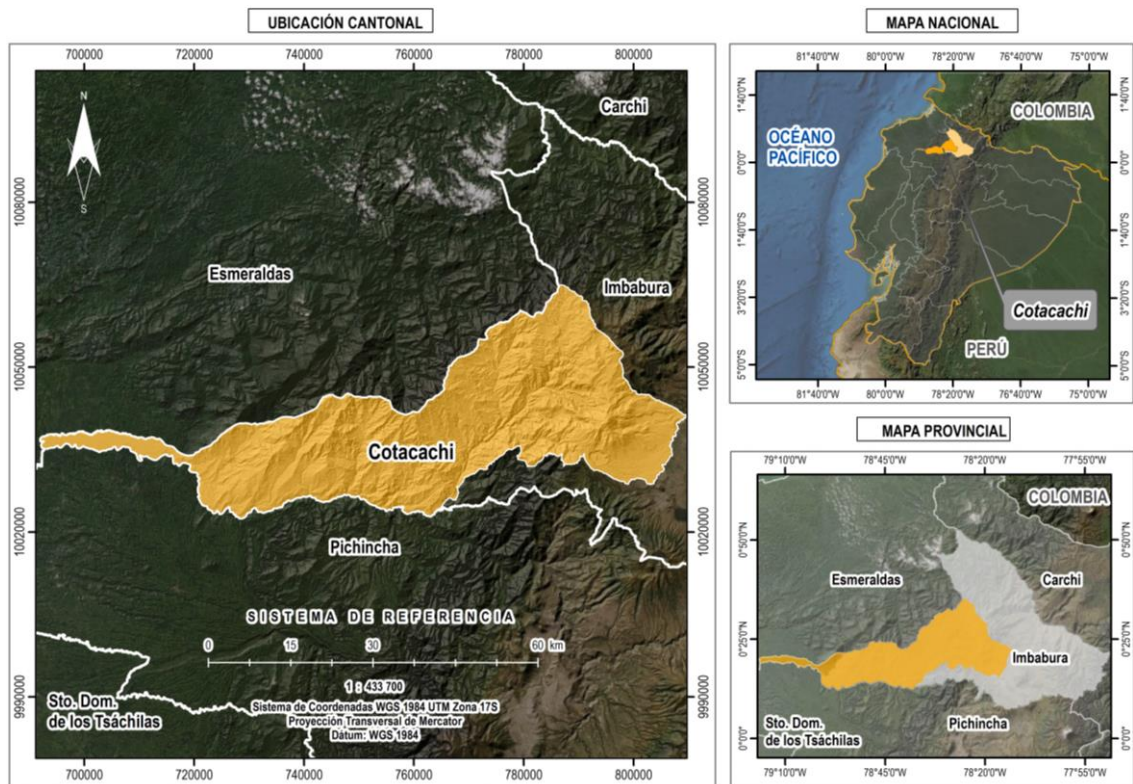


Figura 2. Ubicación del cantón Cotacachi

El cantón Cotacachi posee una variedad de climas debido a que alberga diferentes pisos climáticos, que determinan las temperaturas y precipitaciones. Por lo tanto, existe la presencia de dos zonas las cuales se encuentran bien marcadas como son la zona de Tropical o Intag (parroquias 6 de Julio de Cuellaje, Apuela, García Moreno, Las Golondrinas, Peñaherrera, Plaza Gutiérrez y Vacas Galindo) y zona Andina (parroquia Cotacachi, Imantag y Quiroga), donde el promedio de temperatura en la zona Andina oscila entre los 14-22 °C, mientras que la zona de Tropical posee temperaturas entre los 16-32 °C. A su vez, el promedio de las precipitaciones varía, de acuerdo con las zonas antes mencionadas, que posee un promedio de 500–1 000 mm/año y 3 000 mm/año respectivamente, debido al nivel de cobertura vegetal que aún existe en la zona.

Por otra parte, las altas precipitaciones en los meses de julio, agosto y septiembre ocasionan derrumbes y deslaves de gran magnitud, mientras que, las altas temperaturas promueven la pérdida de cobertura de hielo en el volcán. Por esta razón, el cantón presenta tres tipos de climas como: el Tropical Megatérmico Húmedo con 735.26 km², el Ecuatorial Mesotérmico Semi-Húmedo con 596.15 km², Ecuatorial de Alta Montaña con 280.03 km² y el Mega térmico Lluvioso con una extensión menor de 79.42 km² (GAD Municipal de Cotacachi, 2015, pp. 40-44), vinculándose a una de las zonas más importantes del país por su riqueza biológica. Situándose en dos ecorregiones denominadas Tumbes-Chocó-Magdalena y Andes Tropicales con una diversidad de ecosistemas naturales (Figura 3).

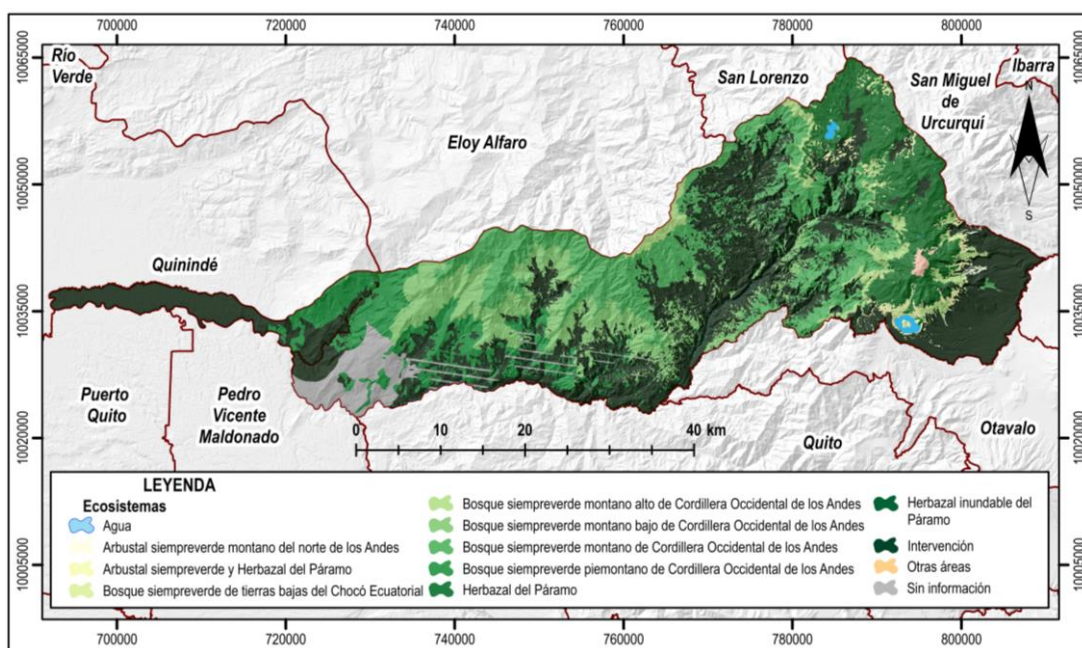


Figura 3. Tipos de ecosistemas en el cantón Cotacachi

Además, posee el complejo volcánico Cotacachi-Cuicocha que forma parte de la cordillera occidental, “aloja cuatro domos Cuicocha, Muyurcu, Loma Negra y Peribuela; y, una caldera volcánica, la laguna de Cuicocha en su territorio” (Jácome et al., 2020). A su vez, consta de ocho formaciones ecológicas basadas en la clasificación de Holdridge, donde existe una mayor prevalencia en las zonas intervenidas con un área de 739.43 km²; 40.74%, considerada como áreas urbanas o zonas agrícolas (Tabla 11).

Tabla 11. Ecosistemas presentes en el cantón Cotacachi

Ecosistemas formaciones vegetales	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Agua	7.38	0.41
Arbustal siempreverde montano del norte de los Andes	2.54	0.14
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo	25.14	1.39
Bosque siempreverde de tierras bajas del Chocó Ecuatorial	0.01	0.001
Bosque siempreverde montano alto de Cordillera Occidental de los Andes	63.03	3.47
Bosque siempreverde montano bajo de Cordillera Occidental de los Andes	199.32	10.98
Bosque siempreverde montano de Cordillera Occidental de los Andes	335.09	18.46

Bosque siempreverde piemontano de Cordillera Occidental de los Andes	159.36	8.78
Herbazal del Páramo	199.37	10.98
Herbazal inundable del Páramo	0.07	0.004
Intervención	739.43	40.74
Otras áreas	4.73	0.26
Sin información	79.61	4.39
Total	1 815.08	100.00

3.1.1 Población

Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Cantón Santa Ana de Cotacachi (2015) tiene una población de 40 036 habitantes en todo su territorio. En la cual, el 50.18% son hombres y el restante 49.92% son mujeres, donde el 77.90% de la población reside en la zona rural, el 22.10% en la zona urbana y en menor porcentaje en la parroquia de Plaza Gutiérrez, como se observa en la Tabla 12.

Tabla 12. Población del cantón por parroquias y genero

Parroquias /Cantón	Hombres	Mujeres	Total
6 de Julio de Cuellaje	936	844	1 780
Apuela	942	882	1 824
Cotacachi	8 398	8 741	17 139
García Moreno	2 675	2 385	5 060
Imantag	2 424	2 517	4 941
Peñaherrera	850	794	1 644
Plaza Gutiérrez	260	236	496
Quiroga	3 210	3 244	6 454
Vacas Galindo (El Churo)	395	303	698
Cantón	20 090	19 946	40 036

Fuente: Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Santa Ana de Cotacachi (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*, 92.

Nota: La parroquia de Las Golondrinas también consta dentro del territorio del cantón, sin embargo, dentro del PDOT de Cotacachi no menciona el número de la población.

3.1.2 Cambio de uso del suelo

A partir de la década de los años 60, diferentes actividades fueron apoyadas por el Estado, mediante el Instituto Ecuatoriano de Reforma Agraria y Colonización (IERAC), actualmente Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), los cuales otorgaron alrededor de 450 000 hectáreas de bosque para actividades agrícolas a diferentes beneficiarios. Por lo tanto, tiempo después se identificó como un problema el avance de la frontera agrícola en forma extensiva, al asumir que, en pocos años, esta actividad llegará a los límites del Parque Nacional Cotacachi Cayapas. Para el año 2015 existe un incremento del 16.26% de conservación y protección, mientras en el año 2002 a 2010 la cobertura y protección se reduce en 22.03%, debido a las razones mencionadas anteriormente (GAD Municipal de Cotacachi, 2015, pp. 38).

3.1.3 Situación actual del cantón Cotacachi

El cantón Cotacachi posee una alta peligrosidad (amenazas naturales) en un 46.13% de su territorio, aproximadamente. Su centro cantonal y Parque Nacional Cotacachi Cayapas (PNCC) son las más afectadas por: deslizamientos, inundaciones y factores antropogénicos como el avance de la frontera agrícola e incendios forestales (GAD Municipal de Cotacachi, 2015, pp. 70). Según el Servicio Integrado de Seguridad ECU 911 en coordinación con el Ministerio del Ambiente en el año 2014, atendieron un incendio en la comunidad de San Pedro, mediante la cooperación de los comuneros fue controlado rápidamente, que afectó una cobertura arbórea de 15 hectáreas.

Años más tarde, en julio del año 2019, alrededor de 80 personas entre comuneros, guardaparques y bomberos en la comunidad de Morocho aledaña al PNCC, controlaron en su totalidad un incendio que consumió una alta área del pajonal del sector. Al respecto conviene decir que, para septiembre del mismo año, el cerro Cotacachi perdió alrededor de 80 hectáreas extendidas entre las comunidades de El Batán, San Pedro y parte del PNCC (Estrada, 2019). Durante el año 2020 alrededor de 300 hectáreas (cifra preliminar) de pajonales fueron consumidas en la zona de la laguna de Piñán. Según

especialistas del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, el 99% de los registros de incendios son provocados, debido al difícil acceso por su complicada topografía en las comunidades cercanas hacia los focos de incendios (Zamora, 2020).

3.2 Métodos

Se desarrolló con base a los objetivos del presente estudio, los mismos que fueron establecidos por etapas para cumplirlos consecutivamente. Además, su estructura jerárquica permitió definir los criterios y subcriterios de aplicación para facilitar la obtención de los resultados esperados en el desarrollo óptimo de la metodología.

La presente metodología replicó algunos de los conocimientos ejecutados en un caso de estudio realizado en Brasil por Coelho et al., (2016) para la determinación a riesgo de incendios a través de variables divididas en dos grupos: variables topográficas (altitud, pendiente del terreno, orientación del terreno, y cobertura y uso del suelo); variables meteorológicas (precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial y déficit hídrico). Sin embargo, el presente estudio incluyó variables sociales (proximidad a carreteras y proximidad a espacios agrícolas) y meteorológicas como (velocidad del viento) con la finalidad de mejorar la metodología propuesta. Además, se adopta la metodología de Radiofrecuencia propuesta por Althuwaynee et al., (2014) basado en un enfoque estadístico bivariado para categorizar la susceptibilidad con base a los puntos de ocurrencia del evento.

3.2.1 Modelos de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal mediante la combinación de variables biofísicas y sociales

Para cada variable se desarrolló cartografía temática y de acuerdo con sus características se estableció cinco niveles o rangos de susceptibilidad: muy baja, baja, moderada, alta y extrema; a excepción de las coberturas de cuerpos de agua y suelo sin cobertura vegetal, a los cuales se asignó una categoría nula. La clasificación de las 11 variables se detalla a continuación:

3.2.1.1 Variables topográficas o físicas

Para establecer los datos de altitud, pendientes y orientación del terreno para el cantón Cotacachi, se utilizó información de un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés), el cual fue obtenido de la plataforma Open Topography a una resolución espacial de 30 metros de píxel, mismo que fue procesado en el software ArcGIS en su versión 10.8.

- **Altitud**

Se reclasificó el DEM para asignar la susceptibilidad con base a los cinco rangos utilizados en la metodología de Coelho et al., (2016) adaptándola al estudio (Tabla 13). Se estableció cinco categorías mediante el uso del valor promedio (2 124.04 m.s.n.m.) y la desviación estándar (987.66 m.s.n.m.), conocida como *regla práctica del intervalo*, donde la suma y resta de una desviación estándar en la media, determinó los rangos máximo y mínimo, mientras que los valores intermedios se obtuvieron mediante intervalos.

Tabla 13. Clasificación de la altitud y el peso asignado al riesgo a incendio

Regla práctica del intervalo	Rangos de altitud (m.s.n.m.)	Riesgo	Ponderación
Media - dos desviaciones estándar	>3111.7	Muy Baja	1
Media - una desviación estándar	2124.04 - 3111.7	Baja	2
Media	1136.38 - 2124.04	Moderada	3
Media + una desviación estándar	148.72 - 1136.38	Alta	4
Media + dos desviaciones estándar	0-148.72	Extrema	5

Fuente: Triola (2009) *Distribuciones de probabilidad*, 225. y Coelho et al. (2016). *Applying GIS to develop a model for forest fire risk*, 69.

- **Pendiente del terreno**

A través de la herramienta *Slope* del software ArcGIS, se calculó y representó el grado de inclinación de cada celda o superficie del DEM. En efecto, las ponderaciones para

las unidades de porcentajes fueron aplicadas mediante una reclasificación con el objetivo de asignar los cinco rangos de susceptibilidad que van desde 5% y 45% (Tabla 14). Los rangos del área de estudio ascienden al igual que los porcentajes de las pendientes desde muy baja hasta extrema susceptibilidad, como lo ejecutado por Coelho et al., (2016).

Tabla 14. Clasificación de pendientes y el peso asignado al riesgo a incendio

Rangos pendientes (%)	Riesgo	Ponderación
<5	Muy Baja	1
5 – 15	Baja	2
15 – 25	Moderada	3
25 – 45	Alta	4
>45	Extrema	5

Fuente: Coelho et al. (2016). *Applying GIS to develop a model for forest fire risk*, 69.

- **Orientación del terreno**

Mediante el uso del DEM y la herramienta *Aspect*, se calculó la orientación del terreno, cuyos resultados sirvieron para obtener la dirección de pendiente en relación con la dirección de la brújula, es decir, la orientación del terreno se midió en el sentido de las agujas del reloj de 0 a 360 grados. La susceptibilidad se determinó en cinco rangos al combinar información histórica de registros de incendios de la Secretaria Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias de Ecuador para los años 2018-2020 (Tabla 15).

Tabla 15. Orientación del terreno

Orientación	Grados (°)
Plano	-1
Norte – Noroeste	0-45
Noroeste – Oeste	45-90
Oeste – Suroeste	90-135
Suroeste – Sur	135-180

Sur – Sureste	180-225
Sureste – Este	225-270
Este – Noreste	270-315
Noreste – Norte	315-160

Fuente: Coehlo (2016). *Applying GIS to develop a model for forest fire risk*, 69.

- **Cobertura y uso del suelo**

Se utilizó una capa de información de uso de la tierra y cobertura terrestre global para el año 2020 con una resolución de 10 metros de píxel de la plataforma Esri Land Cover (<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=fc92d38533d440078f17678ebc20e8e2>), la cual se deriva de imágenes Sentinel-2. De acuerdo con Kontgis et al., (2021) los mapas globales de uso de tierra y cobertura terrestre global brindan información de planificación para conservar la biodiversidad, seguridad alimentaria y modelos hidrológicos. Estos datos fueron georreferenciados al sistema de coordenadas UTM, Zona 17 Sur y luego recortados para el área de estudio. La aplicación de esta información fue electa debido a la alta cobertura de nubosidad para la extensa área de estudio registradas en la plataforma USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos, por sus siglas en inglés) y COPERNICUS ESA. Sin embargo, la plataforma unifica áreas nativas como los páramos dentro de la cobertura de vegetación herbácea y arbustiva al ser una capa a nivel mundial, de modo que, se interceptaron cotas desde los 2 820 hasta 4 690 m.s.n.m. para su identificación y delimitación.

- a. Georreferenciar coberturas en campo

Se determinó un tamaño de muestra con un margen de confiabilidad al 97% y un margen de error del 5% para el cantón Cotacachi, donde su resultado fue de 385 puntos. Los cuales fueron georreferenciados mediante salidas de campo con ayuda del equipo GPS (Sistema de Posicionamiento Global) para los ocho tipos de cobertura vegetal (Tabla 16) a fin de concordar con los puntos de referencia.

Tabla 16. Tipos de cobertura para el cantón Cotacachi para el año 2020

Categorías de uso de suelo y cobertura vegetal	Puntos de referencia
Bosque nativo	48
Cuerpos de agua	49
Cultivos	48
Páramo	48
Suelo sin cobertura vegetal	48
Vegetación arbustiva	48
Vegetación herbácea	48
Zona poblada	48
Total	385

b. Validación de la clasificación de coberturas

Se validó a través de la ejecución de la matriz de confusión con los datos obtenidos de las salidas de campo, según François et al., (2003) la diagonal de la matriz de confusión muestra los números y sitios de exactitud entre los datos de referencia y el mapa, mientras que los datos marginales expresan errores de coincidencia. Por lo tanto, se aplicó el índice Kappa, cuyo resultado fue de 0.8 y según las categorías de fuerzas de concordancia utilizadas por Landis y Koch, (1997) la clasificación es “considerable” (Tabla 17). Finalmente, los rangos de susceptibilidad a incendios se asignaron con referencia a los estudios realizados en la provincia de Imbabura por (Arias et al., 2020).

Tabla 17. Coeficiente de Kappa

<i>K</i>	Grado 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	Casi perfecta

Fuente: Landis y Koch. (1997). *The measurement of observer agreement for biometric categorical data*, 163.

3.2.1.2 Variables meteorológicas

El IDEAM (2018) argumenta que en los estudios de climatología se debe utilizar valores promedios de una serie continua de observaciones de un parámetro climatológico o índices bioclimáticos, durante un periodo como mínimo de 30 años.

- **Precipitación media anual**

Se ejecutó mediante datos de 11 estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) (Tabla 18), las cuales presentaban un mayor registro de datos disponibles, mismas que se encontraban cercanas y cubrían el área de estudio. En tal sentido, se utilizó datos para el periodo de años 1986–2015.

Tabla 18. Estaciones meteorológicas para precipitación media anual proyección WGS84 UTM 17S

Código	Estación	Coordenada Y UTM	Coordenada X UTM	Altitud (m.s.n.m.)
M0001	Inguincho	10028798	789103	3185
M0003	Izobamba	9959896	772362	3058
M0025	La Concordia	10002949	681248	360
M0103	San Gabriel	10066860	854156	2860
M0105	Otavalo	10026312	805039	2556
M0308	Tufiño	10089027	850271	3418
M0312	Pablo Arenas	10055578	812487	2340
M0315	Pimampiro	10044762	841829	2090
M0325	García Moreno	10025874	764136	1950
M0326	Selva Alegre	10027780	770106	1800
M0337	San José de Minas	10019424	788485	2417

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, INAMHI (1986-2015).

a. Relleno de datos

Según Carrera et al., (2016) menciona que, debido a la instrumentación utilizada en las estaciones meteorológicas a lo largo del tiempo, es probable que existan instalaciones con ausencia de datos en los registros. El INAMHI al ser la única institución que proporciona registros climatológicos para el Ecuador, es necesario la complementación de la información faltante, homogenizarlo y validarlo. Inicialmente, se rellenó un total de 67 datos de diferentes años para 10 de las 11 estaciones totales, donde la estación de García Moreno presentó un mayor relleno con un alrededor de 15 datos (Anexo 1). Al asociar los datos de estaciones cercanas, las cuales presentan registros completos, sin superar el 30% de datos faltantes. Se empleó el método de la regresión lineal simple con la ecuación de la recta a través de la aplicación del Software ArcGIS en su versión 10.8 y Excel 2016, expresado en la Ecuación 4.

$$y = ax + b \quad (4)$$

Donde:

y = Precipitación estimada.

x = Precipitación patrón.

a y b = Constante de regresión.

b. Correlación de datos

A través del uso de la prueba estadística de Pearson se conoció el coeficiente de correlación mediante la gráfica R^2 , mismo que representa el grado de covarianza entre variables, al ser positivo o negativo dentro del diagrama de dispersión (Anexo 2). El R^2 presenta valores entre -1 a 1, mientras más se acerque a la unidad se comprueba que existe una relación lineal entre las variables (Martínez et al., 2009).

c. Interpolación de precipitación media anual

La interpolación genera una superficie continua en un espacio geográfico a través de una serie de puntos situados en distintas superficies geográficas (Johnston et al., 2001). El método *IDW* (Inverse Distance Weight), el cual estima valores de las celdas al calcular de manera efectiva los promedios de los valores de puntos de datos vecinos de cada celda, especialmente en áreas con insuficientes registros históricos de datos como lo realizado por (Johnston et al., 2001).

d. Validación de los datos

Para validar los datos previamente rellenados, se descargó un ráster de precipitación media del periodo de años 1986 -2015 de la plataforma WorldClim. Luego mediante geoprocesamientos en el software ArcGIS en su versión 10.8, fueron proyectados a la Zona WGS 1984 17S, recortados para el área de estudio y con la herramienta *Resample* se aplicó una resolución espacial de 30 metros de píxel. Posteriormente, se validó los datos completos de las 11 estaciones con los valores extraídos del ráster del WorldClim para las mismas estaciones. Se calculó un promedio multianual mensual y al realizar la regresión lineal se obtuvo un valor R^2 de 0.80 (Anexo 3) óptimo para el estudio. Por último, una vez obtenida la precipitación para el cantón Cotacachi, se efectuó la *regla práctica del intervalo*, donde las áreas con menor precipitación tendrán mayor probabilidad de incendios (Tabla 19).

Tabla 19. Clasificación de la precipitación media anual y el peso asignado al riesgo a incendio en el cantón Cotacachi

Precipitación (mm)	Riesgo	Ponderación
>1 730.47	Muy baja	1
1 502.53 – 1 730.47	Baja	2
1 274.60 – 1 502.53	Moderada	3
1 046.67 - 1 274.60	Alta	4
<1 046.67	Extrema	5

Fuente: Coelho et al., (2016). *Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil*, 67.

- **Temperatura media anual**

Se desarrolló mediante el uso de datos de temperatura media mensual de 13 estaciones meteorológicas proporcionadas por el INAMHI para el periodo de años 1986-2015, (Tabla 20). Su selección fue debido a la disponibilidad de datos, sin superar el 30% de datos faltantes y su cercanía al área de estudio.

Tabla 20. Estaciones meteorológicas para temperatura media anual proyección WGS84 UTM 17S

Código	Estación	Coordenada Y UTM	Coordenada X UTM	Altitud (m.s.n.m.)
M0001	Inguincho	10028798	789103	3185
M0002	La Tola	9974613	793126	2480
M0003	Izobamba	9959896	772362	3058
M0004	Rumipamba-Salcedo	9887374	767963	2628
M0024	Quito INAMHI-Innaquito	9980700	779884	2812
M0025	La Concordia	10002949	681248	360
M0102	El Ángel	10069327	840293	3055
M0103	San Gabriel	10066860	854156	2860
M0105	Otavalo	10026312	805039	2556
M0107	Cahuasqui - Fao	10057329	810444	2335
M0153	Muisne	10068570	609729	6
M0154	Cayapas	10108571	724418	75
M1094	Tomalon-Tabacundo	10003689	807981	2790

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, INAMHI (1986-2015).

a. Relleno de datos

La temperatura media mensual de las 13 estaciones con datos faltantes se completó mediante 25 estaciones meteorológicas, las cuales albergaban registros completos para el mes y año faltante (Anexo 4 y 5). Donde sus datos fueron procesados mediante el software Excel 2016 y ArcGIS versión 10.8 para la generación de imágenes matriciales mediante el método *IDW*, debido a la zonalidad climática. Es decir, en similitud a las condiciones climáticas del factor y con relación a los puntos de observación o estaciones más cercanas, como lo recomienda (Chávez y Moreano, 2013).

b. Correlación de datos de temperatura mensual de cada estación y la altura

Se utilizó la regresión lineal simple, misma que correlaciona las variables independientes y dependientes que corresponde a la altitud de las estaciones meteorológicas y temperatura mensual. A su vez, se utilizó los datos faltantes provenientes de las estaciones meteorológicas, se tuvo en cuenta que el valor de la correlación generada del gráfico de dispersión de los datos, R^2 debe ser cercano a 1, para validar el cálculo (Pizarro et al., 1993; Corral, 2009).

c. Interpolación de datos de temperatura

Al obtener los valores faltantes a través de la regresión simple, se realizó la Ecuación 5 para determinar la temperatura faltante correspondiente para cada estación meteorológica, por medio del software Excel 2016.

$$T_{Det} = T_{mensual} + (r(Z_{Det} - Z_{estación})) \quad (5)$$

Donde:

T_{Det} : Temperatura a determinar.

$T_{mensual}$: Temperatura mensual de la estación.

r : Valor de r en la ecuación o constante de la correlación.

Z_{Det} : Altitud referencial.

$Z_{estación}$: Altitud de la estación.

Al calcular el valor de r del gráfico de dispersión y la altitud referencial o valor de homologación de 2 186 m.s.n.m., se determinó de la temperatura faltante. Por consiguiente, para la generación de la temperatura real del cantón Cotacachi se utilizó la Ecuación 6. Este procedimiento utilizó como referencia el DEM del área de estudio a una resolución espacial de 30 m por píxel.

$$T_{x,y} = T_{Det} + (r(Z^{DEM} - Z_{Det})) \quad (6)$$

Donde:

$T_{x,y}$: Temperatura real.

T_{Det} : Temperatura determinada.

r : Valor de n_x en la ecuación o constante de la correlación.

Z^{DEM} : Modelo digital del terreno (DEM) del área de estudio.

Z_{Det} : Valor de altitud referencial.

d. Validación de los datos

Se procedió a validar la información de la temperatura multianual con base a datos del periodo 1986 a 2015 proporcionados por el INAMHI, con respecto a los datos obtenidos de la plataforma WorldClim versión 2.1 del periodo 1970 a 2000. Los cuales mostraron una confiabilidad de datos mediante el coeficiente de correlación generado por el gráfico de dispersión (Anexo 6).

e. Establecer rangos de susceptibilidad

A través de la imagen matricial de temperatura media anual del periodo 1986-2015, se aplicó una reclasificación en cinco clases, se asignó un peso a cada nivel de susceptibilidad (Coelho et al., 2016). Se tuvo como referencia que, en las zonas con una temperatura alta, son más propensos a la ocurrencia y propagación de incendios (Tabla 21).

Tabla 21. Clasificación de temperatura y el peso asignado al riesgo a incendio

Temperatura (°C)	Riesgo	Ponderación
<7.38	Muy baja	1
7.38 – 11.89	Baja	2
11.89 – 16.41	Moderada	3
16.41 – 20.93	Alta	4
>20.93	Extrema	5

Fuente: Coelho et al., (2016). *Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil*, 69.

- **Evapotranspiración potencial (ETP)**

Según Thornthwaite (1948) considera la temperatura media y el índice de calor para la generación del presente parámetro. Se define como la máxima evapotranspiración que se produce en condiciones óptimas, es decir, una alta concentración de agua o capacidad de campo y cubierta vegetal denso (Almorox, 2003). Como se representa con la Ecuación 7.

$$e = 16 * (10 * tm/I)^a \quad (7)$$

Donde:

e: Evapotranspiración mensual sin ajustar (mm/mes).

tm: Temperatura media mensual (°C).

I: Índice de calor anual.

a: Variable establecida.

Es necesario el cálculo del índice de calor mensual (I) por medio de la Ecuación 8. Con base al uso de los ráster de la temperatura media (tm) mediante el uso del software ArcGIS en su versión 10.8.

$$ij = \left(\frac{tm}{5}\right)^{1.514} \quad (8)$$

Donde:

ij: Índice de calor mensual.

tm: Temperatura mensual en °C.

Por consiguiente, se determinó el cálculo de la variable *a* con la aplicación de la Ecuación 11 en función al índice de calor anual.

$$a = 0.000000675 * I^3 - 0.0000771 * I^2 + 0.001792 * I + 0.49239 \quad (9)$$

Además, se calculó la Evapotranspiración Potencial de Thornthwaite al multiplicar el factor de corrección para cada mes mediante el uso de la Ecuación 10.

$$ETP_{THO} = e * L \quad (10)$$

Donde:

e : evapotranspiración mensual.

L : factor de corrección, establecido para la latitud 0° (Tabla 22).

Tabla 22. Factor de corrección

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Latitud 0°	1.03	0.93	1.03	1.00	1.03	1.00	1.03	1.03	1.00	1.03	1.00	1.03

Fuente: Thornthwaite (1948).

a. Cálculo del ráster y establecimiento de rangos de susceptibilidad

Inicialmente, se sumaron los 12 ráster correspondientes a la ETP mensual, con el propósito de obtener el ráster anual del área de estudio. Más adelante, se llevó a cabo la reclasificación a partir de la imagen matricial que contiene cinco clases (Tabla 23) con un peso asignado (Coelho et al., 2016), donde se utilizó la *regla práctica de intervalo*.

Tabla 23. Clasificación de la ETP y el peso asignado al riesgo a incendio

ETP (mm)	Riesgo	Ponderación
<393.46	Muy baja*	1
393.46 – 593.32	Baja	2
593.32 – 793.18	Moderada	3
793.18 – 933.05	Alta	4
>933.05	Extrema	5

Fuente: Coelho et al., (2016). *Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil*, 67.

Nota: * La categoría 1 no sería considerado por redundar en valores menores o iguales a cero.

- **Déficit hídrico**

Se empleó el método de Balance Hídrico Climático (BHC) establecido por Thornthwaite y Mather (1995), al utilizar la Precipitación Media Anual como la entrada de agua y como salida la Evapotranspiración Potencial, en la cual deben de ser iguales. Mediante la Ecuación 11.

$$DH = P - PET \quad (11)$$

Donde:

DH: Déficit hídrico.

P: Precipitación media.

PET: Evapotranspiración potencial.

- a. Establecimiento de rangos de susceptibilidad

Se reclasificó con relación al déficit hídrico del área de estudio. Como menciona Prudente (2010) el riesgo a incendio está relacionado al periodo continuo o transitorio de sequía, al tener mayor deficiencia hídrica. El DH fue reclasificado y finalmente, la susceptibilidad se estableció a través del uso de la *regla práctica del intervalo* de Coelho, (2016) y se determinaron cinco categorías, como se visualiza en la Tabla 24.

Tabla 24. Clasificación del déficit hídrico y el peso asignado al riesgo a incendio

Déficit hídrico (mm)	Riesgo	Ponderación
>819.33	Muy baja	1
706.10 – 819.33	Baja	2
592.87 – 706.10	Moderada	3
479.63 – 592.87	Alta	4
<479.63	Extrema	5

Fuente: Coelho et al., (2016). *Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil*, 68.

- **Velocidad del viento**

La construcción de la variable eólica se ejecutó mediante un conjunto de datos proporcionados por 18 estaciones meteorológicas del INAMHI para el periodo 1990 a 2020. Para ello, se generó a partir de la información del flujo (grados) y velocidad (m/s) registrados de un conjunto de datos de estaciones meteorológicas.

Seguidamente, se empleó la técnica de interpolación *IDW* como lo recomiendan (Gonzales y Bosque, 2008; Hernández et al., 2011) en sus estudios, al utilizar los valores de las estaciones meteorológicas con datos de viento más alejadas del punto de cálculo, que estima una gradación espacial de los valores y la distribución de la velocidad del viento. La información se validó mediante un geodata tipo ráster obtenido de la plataforma WorldClim para el periodo 1970-2000. Los datos fueron proyectados a la Zona 17 Sur, delimitados para el área de estudio y se realizaron resamplings con el propósito de alcanzar 30 metros de píxel (Anexo 7).

Finalmente, se estableció los rangos de susceptibilidad en función a los resultados, clasificados en 5 categorías según el nivel de riesgo y su peso correspondiente donde a mayores velocidades, presenta una vulnerabilidad extrema.

3.2.1.3 Variables sociales

Uno de los factores determinantes para la ocurrencia e ignición de los incendios es la sociedad por las interacciones de sus actividades vinculadas en estos territorios. Por lo tanto, en función a ello se seleccionó las siguientes variables que a continuación se detalla:

- **Proximidad a carreteras**

Se desarrolló a través de la red vial, descargada de la plataforma Geoportal Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:50.000 y los límites del cantón Cotacachi. Se determinó mediante la herramienta de geoprociamiento *Near* para obtener las

distancias correspondientes entre las carreteras y los límites del cantón. Finalmente, se calculó los rangos de susceptibilidad a través de la *regla práctica del intervalo* (Tabla 25). Puesto que, a menor distancias de carreteras, mayor será la probabilidad de ocurrencia a incendios tal como menciona (Flores et al., 2016).

Tabla 25. Clasificación de la proximidad a carreteras y el peso asignado al riesgo a incendio

Rangos proximidad a carreteras (m)	Riesgo	Ponderación
>3 000	Muy baja	1
2 000 – 3 000	Baja	2
1 000 – 2 000	Moderada	3
<1 000	Alta	4
<1 000	Extrema*	5

Fuente: Coehlo (2016). *Applying GIS to develop a model for forest fire risk*, 68.

Nota: * La categoría 5 no sería considerado por redundar en valores menores o iguales a 1 000 metros.

- **Proximidad a espacios agrícolas**

Se exportaron las áreas pertenecientes a cultivos a partir de la variable cobertura y uso del suelo del año 2020 obtenida de la plataforma Esri Land Cover. Se aplicó la herramienta de geoprocésamiento *Near* para calcular la distancia entre las capas de áreas de producción agrícola y el territorio del cantón Cotacachi, se rasterizó la información y se asignaron cinco categorías de niveles de susceptibilidad al emplearse la *regla práctica del intervalo* para finalmente establecer ponderaciones (Tabla 26).

Tabla 26. Clasificación de la proximidad a espacios agrícolas y peso de riesgo a incendio

Rangos proximidad a espacios agrícolas (m)	Susceptibilidad	Ponderación
>3 000	Muy baja	1
2 000 – 3 000	Baja	2
1 000 – 2 000	Moderada	3
<1 000	Alta	4

Fuente: Coehlo (2016). *Applying GIS to develop a model for forest fire risk*, 68.

Nota: La categoría 5 no sería considerado por redundar en valores menores o iguales a 1 000 metros.

3.2.1.4 Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ)

Técnica desarrollada por Saaty (1980), el cual se basa en técnicas multicriterio para clasificar las diferentes categorías que influyen en la ocurrencia de incendios. En la cual, se enumeró las principales causas de incendios en el área de estudio, donde los niveles de importancia de los respectivos criterios se estimaron a través de comparaciones pareadas entre ellos. Para así, establecer una escala de importancia (Tabla 27) para las diferentes ponderaciones de los factores que tienen mayor influencia en la generación de incendios.

Tabla 27. Escalas de jerarquía del método Saaty

Importancia	Definición	Esclarecimiento
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen idénticamente al objetivo.
3	Débil dominancia	La experiencia manifiesta que existe una débil dominancia de un elemento sobre otro.
5	Fuerte dominancia	La experiencia manifiesta que existe una fuerte dominancia de un elemento sobre otro.

Fuente: Saaty (1980). *Escalas de importancia*, 56.

Para validar las ponderaciones respectivas, se ejecutó la razón de consistencia (RC), donde se obtuvo un valor menor o igual a 0.10, mismo que representó un valor satisfactorio, tal como lo desarrollado por (Hervás et al., 2002; Celemín 2014).

$$RC = \frac{Ci}{Rci} \quad (12)$$

Donde:

Ci: Índice de consistencia.

Rci: Índice de consistencia aleatoria.

La comparación pareada se desarrolló mediante una matriz de doble entrada en relación con las variables seleccionadas anteriormente. Luego, se obtuvo la ponderación, al dividir cada valor con su respectiva sumatoria total en dirección vertical, para

finalmente calcular el promedio de los valores horizontales, para obtener los pesos ponderados para cada variable.

3.2.1.5 Radiofrecuencia (RF)

Posee un enfoque estadístico, que utiliza la frecuencia estadística para el mapeo de susceptibilidad, basándose en una asociación cuantificada entre los datos de entrenamiento y factores causales o independientes (Althuwaynee et al., 2014). Cada factor causal espacial conlleva un diferente grado de influencia positiva o negativa en la ocurrencia del evento. Es preciso mencionar que, los modelos de riesgos naturales a partir de la metodología PAJ se encuentra relacionado en el conocimiento del experto que implica una importancia del grado de incertidumbre, debido a la subjetividad de la decisión, en este caso, las variables ya categorizadas por su grado de influencia utilizadas en PAJ, sirven como datos de entrada para el análisis por pares a diferencia de la valorización proporcionada por expertos (Ghost et al., 2011; Althuwaynee et al., 2014).

Se utilizó como referencia los focos de calor de la plataforma del Instituto de Investigaciones Espaciales de Brasil (INPE) para el periodo de años 2000-2020, donde se obtuvo 874 puntos de ocurrencias del evento, clasificándose en datos de entrenamiento y prueba (75 y 25 %, respectivamente) y las variables categorizadas con base a su relación a los incendios utilizadas en PAJ. La Ecuación 13 sirvió para preparar la nueva clasificación para cada factor causal, es decir, el índice de la asociación espacial de factores causales (SA, por sus siglas en inglés) con el conjunto de datos de entrenamiento.

$$SA = \frac{Npix(1)/Npix(2)}{\sum Npix(3)/ \sum Npix(4)}$$

Es decir,

$$SA = \frac{\% \text{ ocurrencia del evento en cada subcategoría o nivel de susceptibilidad}}{\% \text{ categoría de un factor independiente}} * 100 \quad (13)$$

Donde:

$Npix_{(1)}$: La cantidad de píxeles que contienen los datos de entrenamiento en una clase.

$Npix_{(2)}$: Número total de píxeles de cada clase en toda el área.

$\sum Npix_{(3)}$: Número total de píxeles que contienen los datos de entrenamiento.

$\sum Npix_{(4)}$: Número total de píxeles del área de estudio.

Para conocer la Tasa de Predicción (PR, por sus siglas en inglés) es la diferencia absoluta calculada entre los valores SA máximo y mínimo dividido por la diferencia absoluta más baja de todos los factores. Se aplicó la ponderación de cada factor espacial con el conjunto de datos de entrenamiento, mediante la Ecuación 14.

$$PR = \frac{(SA_{max} - SA_{min})}{(SA_{max} - SA_{min})_{min}} \quad (14)$$

Además, se generó las ponderaciones por pares normalizada que se basa en el resultado por pares para cada columna de los valores de PR de los predictores de incendios, conocido como PW, por sus siglas en inglés. Cada tasa de importancia por pares en una columna se dividió por la suma de las tasas de importancia por pares de una columna específica al derivar el valor propio (Althuwaynee et al., 2014). Al promediar los vectores propios en una fila de matriz generó resultados del predictor fraccionario. Es preciso mencionar que, las ponderaciones obtenidas de PR y PW muestran un peso relativo real entre los factores que se refiere a la densidad real.

3.2.2 Zonificación de los diferentes niveles de susceptibilidad a incendios en las categorías de cobertura vegetal

A continuación, se describe como se realizó la validación para los modelos obtenidos.

3.2.2.1 Validación de datos

Proporciona una confiabilidad y valides del modelo, al determinar la aceptación y coherencia de sus componentes. Por consiguiente, se utilizó como referencia los focos de calor para el periodo de años 2000-2020 de la plataforma del INPE que para Ecuador dispone con información de los satélites AQUA, GOES, NOAA, TERRA, ASTR y TRMM. La finalidad fue comprobar que exista una coincidencia con el modelo más adecuado del área de estudio en concordancia con las zonas de susceptibilidad del territorio a través de las siguientes pruebas estadísticas.

- **Chi cuadrado**

Se determinó la relación entre las variables (focos de calor y modelo obtenido) mediante la aplicación del software *IBM SPSS Statistics* en su versión 26 con el propósito de elaborar las tablas de contingencias y la prueba de chi-cuadrado (Arias et al., 2020; Anrango et al., 2020). Por lo tanto, se planteó la Hipótesis nula (H_0) y una Hipótesis alterna (H_a), como se muestra a continuación.

H_0 : Los modelos de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal no se relacionan con el peligro histórico de incendio en el territorio.

H_a : Los modelos de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal si se relacionan con el peligro histórico de incendio en el territorio.

A continuación, para la aceptación o rechazo de las hipótesis se basó en el nivel de significancia que se calcula en el Chi cuadrado de Pearson, al considerar que sí el dato obtenido es menor a 5% (0,05) se acepta la hipótesis alterna, que representa una asociación entre las variables (focos de calor y modelo obtenido). En cambio, sí supera el nivel de significancia de 5%, se acepta la hipótesis nula.

- **Curva ROC**

Se validó el modelo mediante el cálculo de la curva ROC a través del software *IBM SPSS Statistics*, en la cual, se utilizó los focos de calor para el periodo de años 2000–2020 como referencia a la discriminante. Considerándose que se obtuvo una exactitud global de la prueba cuando su valor sea próximo a 1 (Arias et al., 2020; Anrango et al., 2020; Burgueño et al, 1995). Simultáneamente, para establecer la relación de los focos de calor se planteó las mismas hipótesis utilizadas en Chi cuadrado. En concordancia al resultado obtenido de la curva ROC, se acepta o rechaza la hipótesis. Si el valor del área bajo la curva excede el 0,5 se acepta la hipótesis alterna.

3.2.3 Definición estrategias de prevención de incendios para la cobertura vegetal en el cantón Cotacachi

Para la formulación, elección y ejecución de acciones y estrategias ante la presente situación, es necesario el análisis y la priorización de los problemas con respecto al potencial relativo, la experiencia de profesionales, los criterios de sostenibilidad y la competitividad que desarrolla el grupo de investigación (Chaparro, 1994).

El correcto análisis proporciona proyecciones eficientes en la ejecución de las alternativas para minimizar y mitigar impactos. En la presente investigación se utilizó la matriz FODA con la finalidad de comprender los impactos y generar alternativas para prevenir los incendios sobre la cobertura vegetal en el cantón de Cotacachi.

3.2.3.1 Matriz FODA

Se empleó para la identificación de las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del área de estudio vinculándose a las actividades antropogénicas que influyen significativamente en la probabilidad de ignición, a fin de conocer la situación real y actual que presenta el cantón Cotacachi. Estas características son necesarias para evaluar su potencialidad.

3.3 Materiales y equipos

La Tabla 28 muestra los materiales y equipos que se utilizó en la investigación.

Tabla 28. Materiales utilizados en la investigación

Materiales de Campo	Materiales de Oficina
GPS (Sistema de Posicionamiento Terrestre)	Laptop DELL
Cámara fotográfica	Excel 2018
	IBM SPSS Statistics version 26
	ArcGIS 10.8
	(INPE)
	(SNGR)
	(IGM, 2013)
	WorldClim 2.1
	Open Topography
	Esri Land Cover

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se describen los resultados obtenidos de cada uno de los objetivos específicos, luego de haber ejecutado los métodos.

4.1 Modelos de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal

La combinación de variables bio físicas y sociales son quienes condicionan a la generación de ignición y propagación a incendios como: el clima, las características del combustible (cobertura y uso del suelo), la topografía y velocidad del viento (Chuvieco et al., 1998).

4.1.1 Variables topográficas o físicas

Se obtuvieron los resultados de las cuatro variables topográficas para el cantón Cotacachi.

4.1.1.1 Altitud

La variable topográfica para el cantón Cotacachi, posee altitudes bien marcadas que van desde los 145 m.s.n.m. hasta los 4 920 m.s.n.m. en su territorio, como se visualiza en la Figura 4A. Según Molen (2011) afirma que su clasificación se ejecutó acorde a sus condiciones climáticas, debido a que las altas elevaciones presentan climas fríos y húmedos, a diferencia de las altitudes bajas donde la temperatura aumenta y las precipitaciones disminuyen. Por lo tanto, el área de estudio presentó una susceptibilidad alta de 18.81% y extrema de 0.0002% para su territorio, como se representa en la Figura 4B. A juicio de López et al., (2017) la altitud promueve fuertes precipitaciones, mientras que las masas de agua de mar amortiguan esa tendencia, es decir, la altitud sobre el nivel del mar regula las condiciones climáticas del territorio y a la vegetación existente.

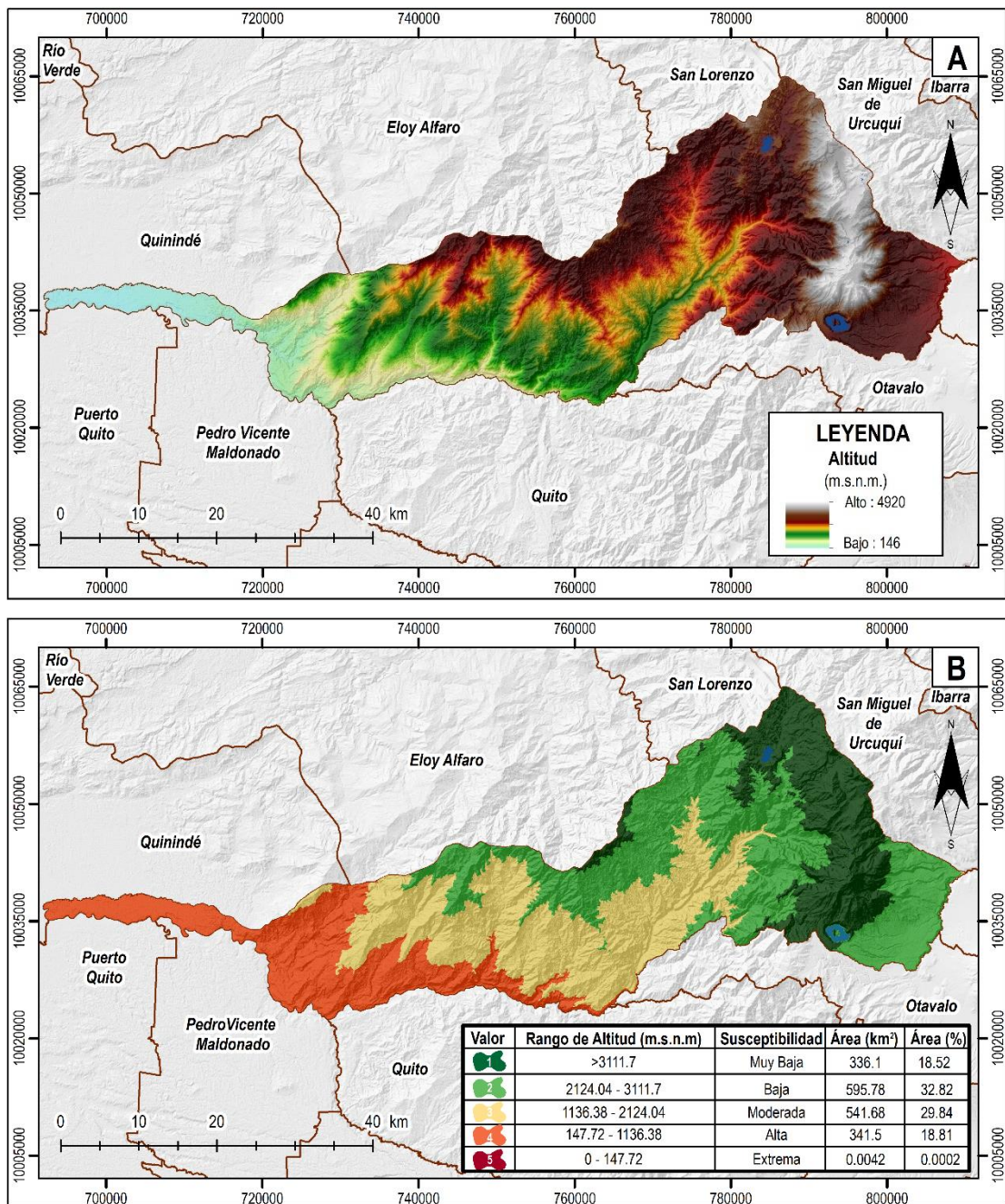
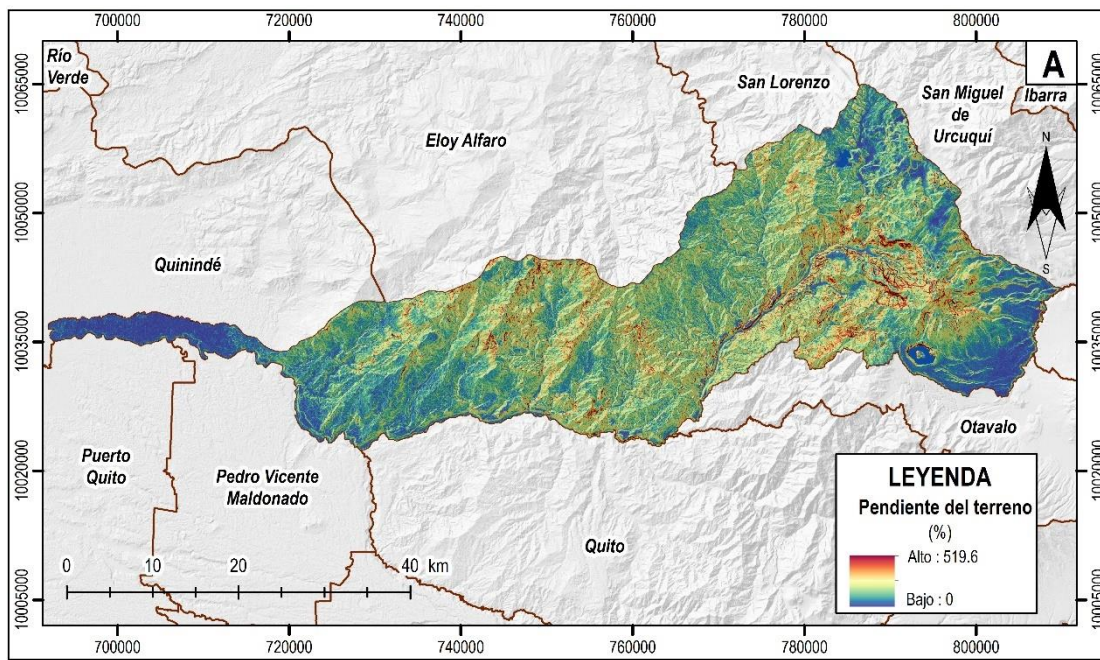


Figura 4. A. Altitud del cantón Cotacachi; **B.** Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la altitud del cantón de Cotacachi

4.1.1.2 Pendiente del terreno

El cantón Cotacachi evidenció pendientes con valores de inclinación de 0 a 15 % y >45%, respectivamente (Figura 5A). Debido a que el área de estudio posee varias formas de relieve comprendidas en rangos de 0-5 % con pendientes planas o casi planas, hasta pendientes >70% que corresponden a pendientes fuertes, abruptas y montañosas (GAD Municipal de Cotacachi, 2015, pp. 23). Jiménez et al., (2016) mencionan que, la topografía influye a la ocurrencia de incendios, dado que el fuego se propaga rápidamente hacia arriba que cuesta abajo en altas pendientes. El área de estudio presentó una susceptibilidad muy baja de 17.11% y susceptibilidad extrema de 31.78% de su territorio, en relación a que, a mayor rango de pendientes, más alta es la susceptibilidad para la propagación de incendios de cobertura vegetal (Figura 5B). Así mismo, Bermúdez et al., (2007) afirman que un incendio se acelera en un terreno escarpado gracias a la cantidad de calor que recibe la parte alta. Además, Coelho et al., (2016) mencionan que, las pendientes son un factor determinante en la tasa de propagación del fuego “debido a que la columna de convección y la transmisión del calor en las pendientes es más lenta en una superficie plana”.



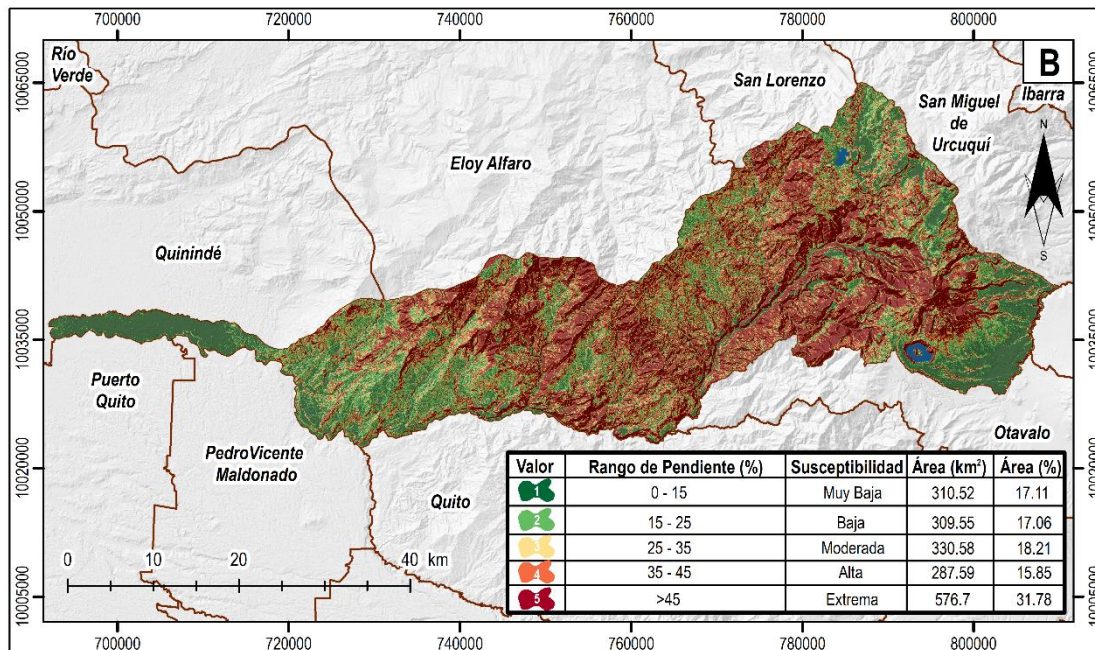


Figura 5. A. Pendientes del terreno del cantón Cotacachi; **B.** Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la altitud del cantón de Cotacachi

4.1.1.3 Orientación del terreno

En el área de estudio presentó dominancia de orientación del terreno al SE, S, SO, O. Como se representa en la Figura 6A. La presente variable para el área de estudio demostró una susceptibilidad muy baja de 0.0001% y extrema de 36.48% de su territorio, mismas que corresponden a las orientaciones este, noreste y sureste, como se observa en la Figura 6B. Según Ricci (2021) considera que las superficies con orientaciones sureste y noreste son más propensas a recibir grandes cantidades de luz solar. Así mismo, Coelho et al., (2016) determinan que, las orientaciones este, norte y sur son más vulnerables y óptimas para la ignición de incendios como lo determinado en su estudio desarrollado en Brasil. Además, la dominancia de la orientación del terreno tiene notable importancia sobre las condiciones micro climáticas al alterar la humedad del suelo y la evapotranspiración (Alanís et al., 2012; Abedi et al., 2019).

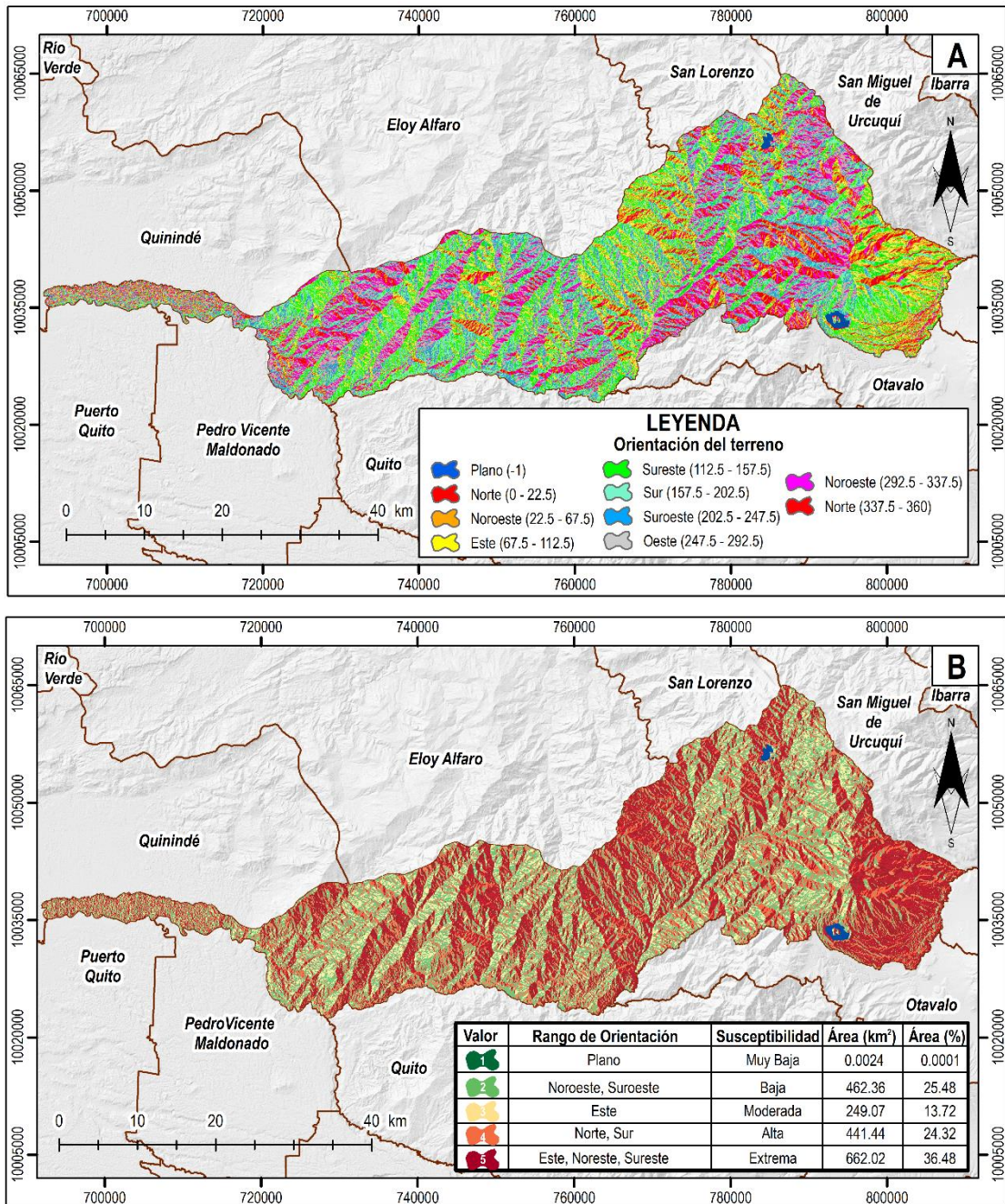


Figura 6. A. Orientación de terreno del cantón Cotacachi; **B.** Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la orientación del terreno del cantón de Cotacachi

4.1.1.4 Cobertura y uso del suelo

Al generar una clasificación de cobertura vegetal para el año 2020, se validó el resultado mediante el coeficiente de Kappa con un valor de 0.8, es decir, “considerable” (Anexo 8), y se obtuvo los ocho tipos de cobertura para el área de estudio, como se visualiza en la Figura 7A. El cantón Cotacachi mostró que, las coberturas correspondientes a bosque nativo, vegetación arbustiva y vegetación herbácea se encuentran en una susceptibilidad alta de 82.77% y susceptibilidad extrema de 14.38% pertenecientes a las coberturas de cultivos y páramo (Figura 7B). Mientras que, a las coberturas cuerpos de agua, se consideró asignar un valor de cero con susceptibilidad muy baja, debido a que no inciden a la ignición a incendios de cobertura vegetal.

La ocurrencia y propagación de incendios está caracterizada por la cobertura vegetal, la combustibilidad de las especies y sus características (Jiménez et al., 2016; Muñoz et al., 2018). Además, Penniman (2018) en su estudio deduce que, las condiciones climáticas modifican y controlan la inflamabilidad, debido a los diversos mecanismos de retención de agua y humedad de la vegetación. De este modo, Andrango y Romero (2021) postulan que, el material seco u hojarasca es el responsable de propagar este tipo de incendios, puesto que son más vulnerables. Asimismo, Rosero (2021) enfatiza que los cambios de uso de suelo corresponden principalmente a dos actividades antrópicas: la agricultura y ganadería, mismos que resultan de la ocurrencia de incendios forestales (Capador et al., 2021).

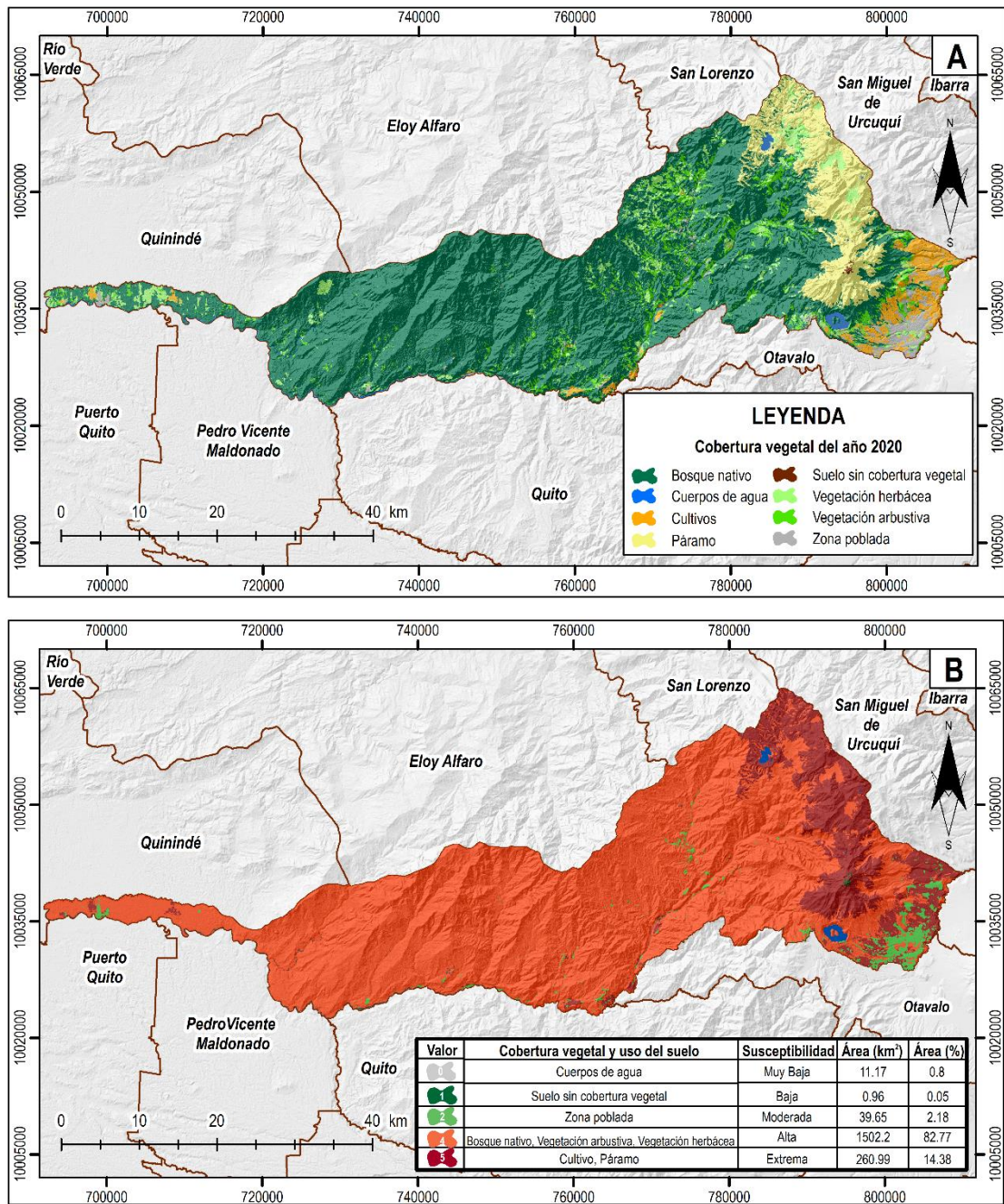


Figura 7. A. Cobertura y uso del suelo del cantón Cotacachi; **B.** Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la cobertura y uso del suelo del cantón de Cotacachi

4.1.2 Factores climáticos o meteorológicos

Los factores climáticos más sobresalientes con base a las características del cantón Cotacachi para la ocurrencia ante los incendios de coberturas vegetales son: la precipitación, temperatura, evapotranspiración, déficit hídrico y velocidad del viento.

4.1.2.1 Precipitación media anual

La presente variable se calculó para un periodo de tiempo comprendido entre los años de 1986-2015, como se evidencia en la Figura 8A. Los valores de la leyenda expresan intervalos menores cercanos a 910 mm desde el centro cantonal de Cotacachi, hasta más de 2 334 mm en la parroquia de las Golondrinas al ser precipitaciones bajas y altas, respectivamente, propias de la zona Andina y la zona Tropical, debido a la alta diversificación de la cobertura vegetal existente (GAD Municipal de Cotacachi, 2015, pp. 40).

Como plantea el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático [IDIGER] (2019) la precipitación condiciona a la humedad del combustible (vegetación), debido a su interacción directa con la humedad relativa, combustibles muertos y días sucesivos de la vegetación viva después de concentrarse con el recurso hídrico dentro de la morfología de las especies vegetales y suelo.

Pérez et al., (2013) mencionan que, la precipitación es un factor de influencia directa para el número y la magnitud a incendios forestales (Kitzberger et al., 2017). Es decir, la predominancia de las reservas hídricas disponibles en el suelo origina una alta producción de biomasa y combustible forestal (De Andrade et al., 2020). Por lo tanto, Espinel (2021) menciona que, a mayor cantidad de precipitación se da una menor amenaza a incendios, mientras que, a menor precipitación, su susceptibilidad se convierte en extrema. Así pues, se estableció los rangos de susceptibilidad a incendios para el cantón de Cotacachi (Figura 8B).

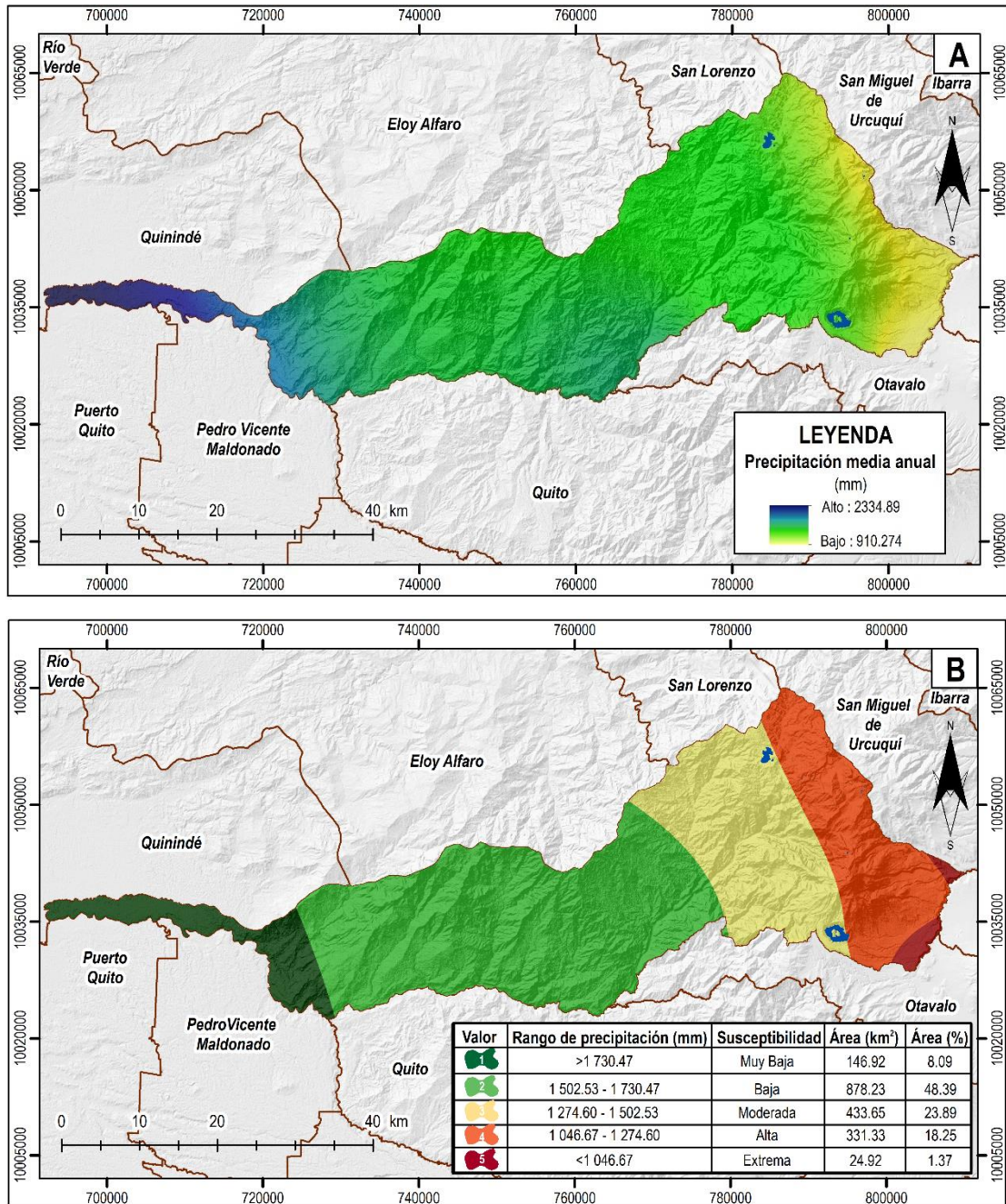


Figura 8. A. Precipitación media anual del periodo 1986-2015 del cantón de Cotacachi; **B.** Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la precipitación del cantón de Cotacachi

4.1.2.2. Temperatura media anual

Se estimó la distribución de la temperatura del cantón Cotacachi para el periodo anterior, como se detalla en la Figura 9A. Donde sus rangos oscilan entre los 3.59°C hasta los 25.43°C, desde la zona Andina hacia la zona Tropical (Intag). De acuerdo con el INAMHI (2002), en los últimos 50 años, el Ecuador ostenta una tendencia general de una temperatura en aumento para la zona interandina, cambios en los patrones de precipitación y una menor disponibilidad del recurso hídrico (VanderMolen, 2011).

Mérida (2020) refiere que, la temperatura contribuye en el contenido de humedad en la vegetación, es decir, controla o regula la desecación, al condicionar la temperatura interna de los tejidos vegetales. A su vez, al surgimiento de corrientes de aire que comienzan desde los suelos calientes (Capador, et al., 2021). Este fenómeno natural aparece en los meses de verano, con mucha frecuencia en el medio día y en algunas horas de la tarde (Chávez y Moreano, 2013). Además, influye a la entrada para el cálculo de la evapotranspiración al atribuir los requerimientos básicos de energía calorífica externa para el proceso de ignición de combustible. La presente variable estimó que, a menor temperatura tiene a una baja susceptibilidad, al ser <7.38°C. Mientras a temperaturas >20.93°C alberga una susceptibilidad extrema dentro del cantón (Figura 9B). De acuerdo con Chuvieco et al., (1998) señalan que, las altas temperaturas y una baja humedad en el aire intensifican la probabilidad de ignición, que aumenta significativamente el efecto de inflamabilidad de la vegetación. Asimismo, García et al., (2012) corroboran que, el incremento en la temperatura atribuye a una alta vulnerabilidad para la aparición de estos fenómenos.

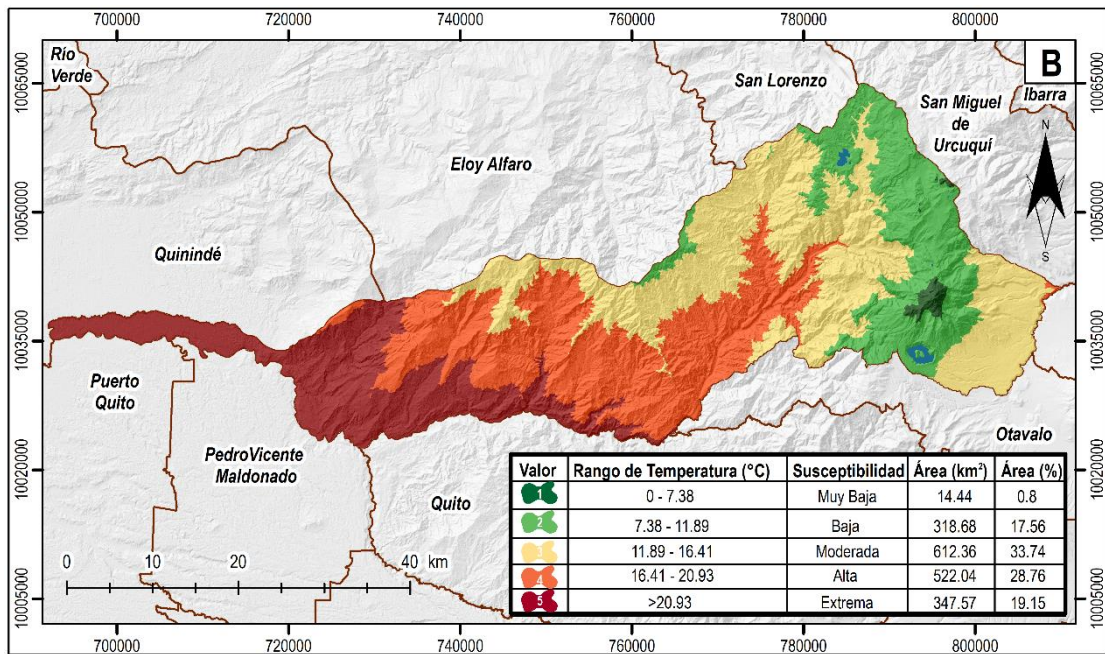
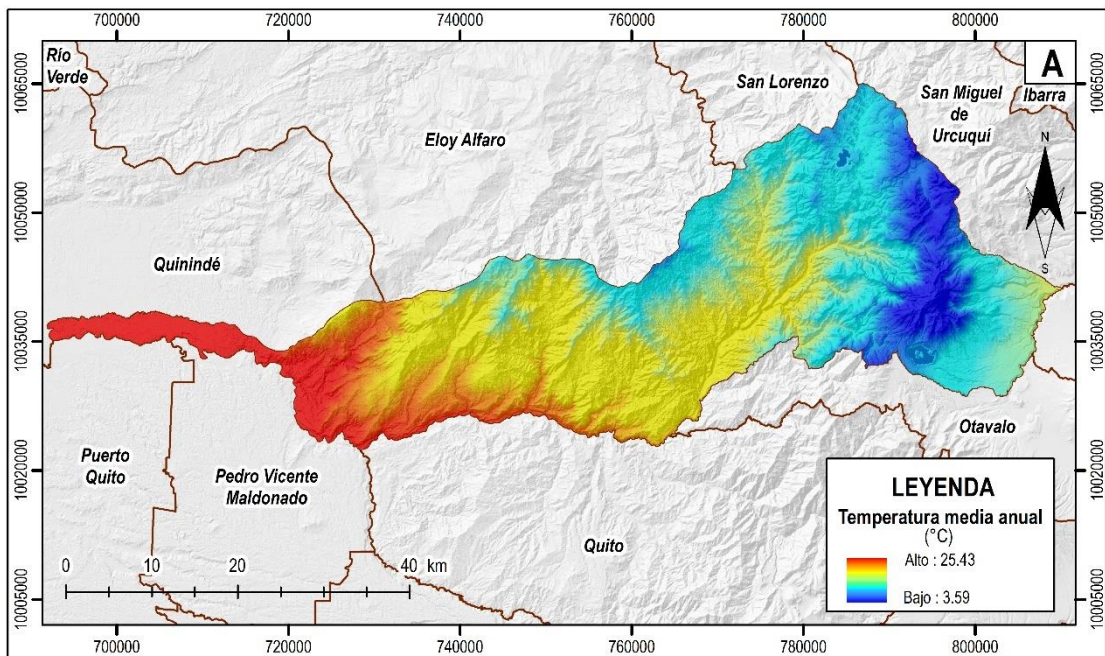


Figura 9. A. Temperatura media anual del periodo 1986-2015 del cantón de Cotacachi; **B.** Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la temperatura del cantón de Cotacachi

El diagrama ombrotérmico estimó que, el cantón Cotacachi posee dos épocas lluviosas (Enero-Mayo y Octubre-Diciembre) y una época seca (Junio-Septiembre) debido a que alberga una amplia variedad de pisos climáticos con sus precipitaciones y temperaturas muy particulares, como se representa en la Figura 10. Este cálculo fue elaborado a partir de los promedios mensuales multianuales de la precipitación y temperatura media del cantón para el periodo de años 1986-2015, que cuenta con 30 años de historial climatológico.

A pesar de ello, el GAD Municipal de Cotacachi (2015) afirma la existencia de altas precipitaciones en la zona Tropical (Intag) para los meses de Julio, Agosto y Septiembre causado por la alteración en los ecosistemas, que resulta del calentamiento global y las características propias del sitio, a diferencia de la zona Andina.

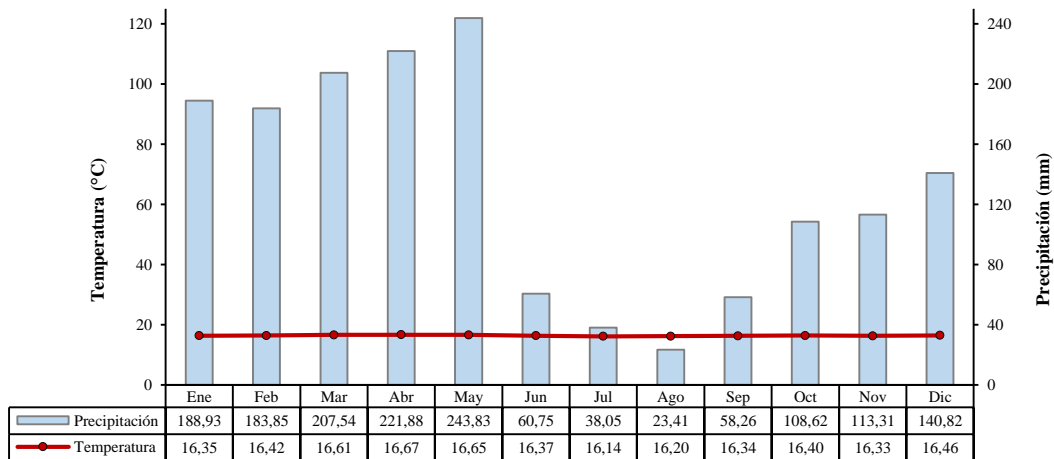


Figura 10. Diagrama ombrotérmico del cantón Cotacachi del periodo 1986-2015

En el cantón Cotacachi existe un crecimiento en el número de eventos a incendios durante la época seca, conociéndose como los meses de estiaje al intercalar los valores de las variables climáticas calculadas en relación con el historial incendios correspondientes al periodo de años de 2018-2020 para el área de estudio (Figura 11).

La ocurrencia de los incendios interactúa con las bajas precipitaciones con mayor frecuencia en ecosistemas que presentan periodos secos en el verano (Littell, 2016). La generación de biomasa está condicionada a la humedad, al ser el combustible que contribuye a la conducta del fuego (Pompa et al., 2017).

Por otra parte, Pazmiño (2020) menciona que, la advección de aire caliente y seco, se asocian con los incendios forestales al contribuir con los patrones del clima para los incendios. No obstante, durante la época lluviosa no se aprecia una alta ocurrencia a incendios significativos debido a su bajo potencial de ignición, causado por la alta predominancia de humedad en el suelo y la vegetación existente.

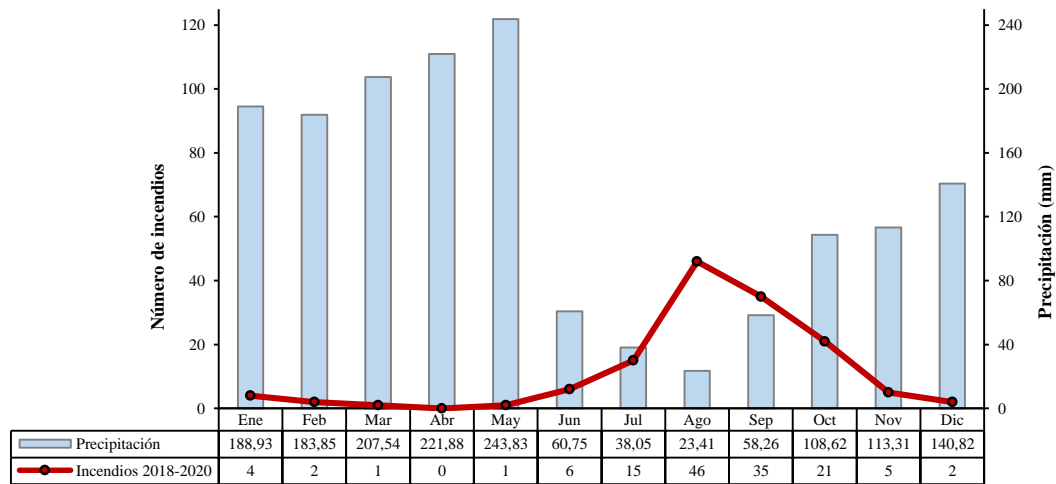


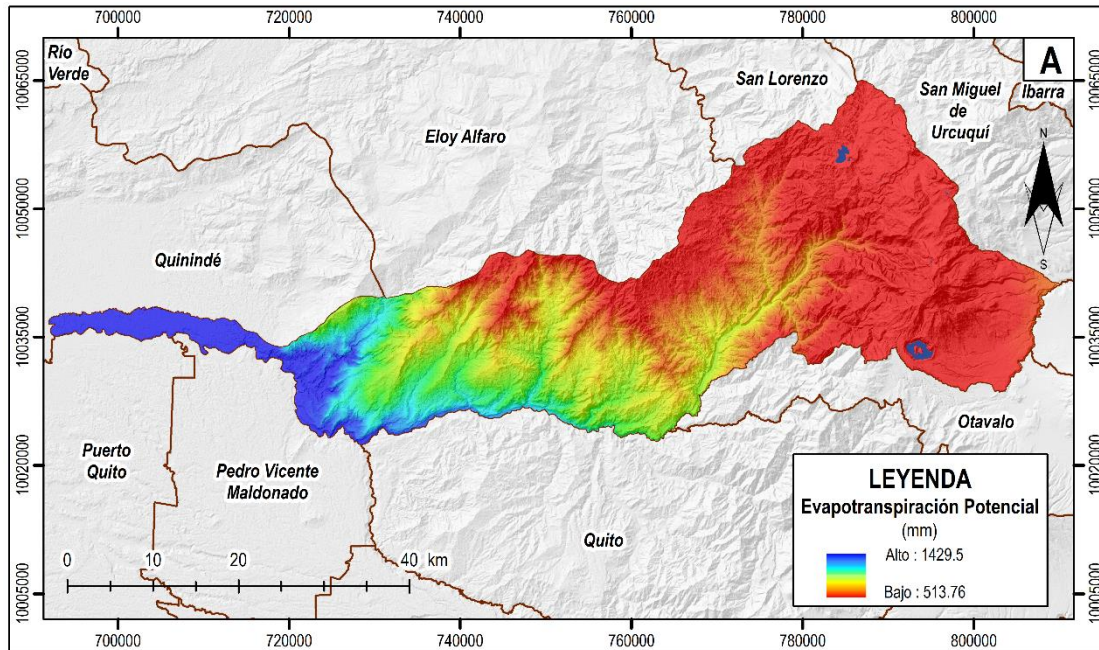
Figura 11. Relación entre precipitación y número de incendios del cantón Cotacachi

4.1.2.3. Evapotranspiración potencial

El índice de susceptibilidad por evapotranspiración potencial para el cantón Cotacachi se basa en el rango de pérdida de humedad, con valores desde los 513.76 mm/anuales hasta los 1 429.5 mm/anuales (Figura 12A). Hebel (2019) menciona que, los incendios forestales afectan directamente a la evapotranspiración al generar una variación

espacial y temporal. Cook, et al., (2014) argumentan que, al aumentar la precipitación, también incrementará la evapotranspiración.

De igual forma Zúniga et al., (2017) reconocen que, la disponibilidad hídrica rectifica que la sequía es el precursor para la ocurrencia a incendios sino otros factores ambientales o topográficos. Se conoce que, a mayor evapotranspiración potencial, más extremo será el nivel de susceptibilidad a incendios en el cantón de Cotacachi. Mismo que, alberga una susceptibilidad extrema aproximadamente de 15.91% del total de su territorio que cubre la zona de Intag, debido a las características ambientales que posee, como se visualiza en la Figura 12B.



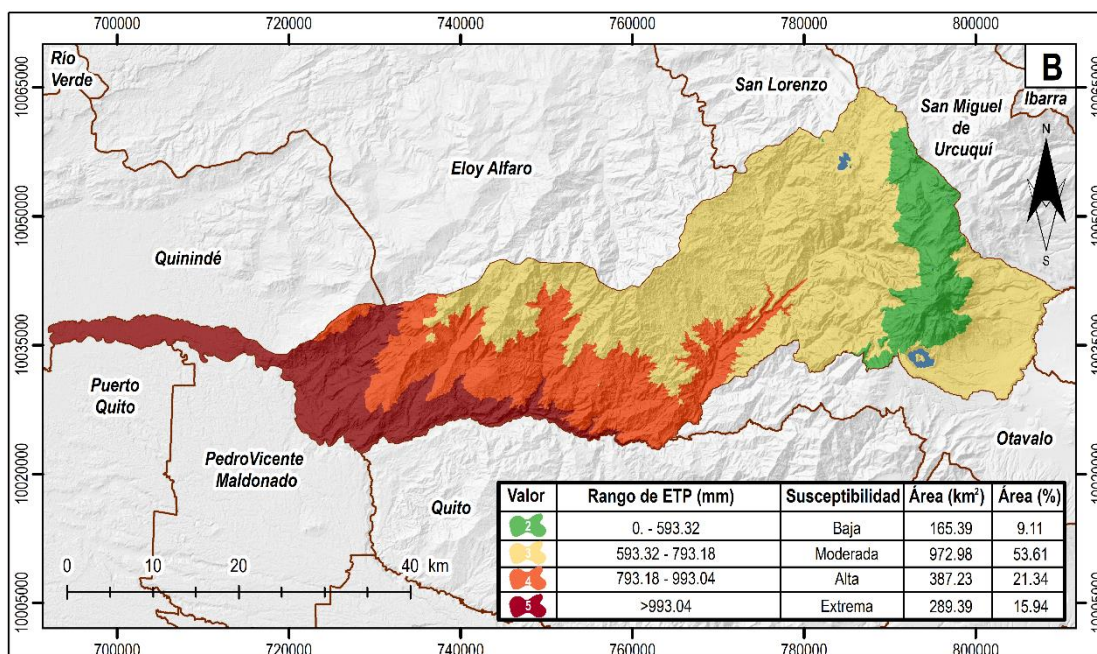


Figura 12. A. Evapotranspiración potencial del cantón de Cotacachi; **B.** Rangos de susceptibilidad a incendios con base en la ETP del cantón de Cotacachi

4.1.2.4. Déficit hídrico

En el cantón Cotacachi, el déficit hídrico oscila desde los 221.50 mm hasta los 984.08 mm (Figura 13A). Según, Fischer et al., (2007) al existir altos valores de la presente variable puede alcanzar un aumento del riesgo al fuego, debido a su relación directa con las condiciones ambientales óptimas como altas temperaturas acompañadas de bajas precipitaciones. Al utilizar la ecuación de Thornthwaite & Mather (1955) se asemejaron el registro de incendios para el periodo de años 2018-2020 en áreas con escasez de recurso hídrico, que son las zonas afectadas por los incendios. Mismas que, infringen las condiciones de sequía al promover la ocurrencia de incendios, pero no necesariamente al nivel de propagación (Fischer, et al., 2007). Por lo tanto, para la clasificación de los niveles de susceptibilidad, se caracteriza que, a menor déficit hídrico, mayor será la probabilidad a incendios de cobertura vegetal en el cantón Cotacachi (Figura 13B), la susceptibilidad extrema para el centro cantonal representa el 4.29% del área total. Como establece (Corporación Nacional Forestal [CONAP], 2009) el alargamiento del déficit hídrico estival o la disminución de las precipitaciones

en el invierno se relaciona con la temporada de incendios con mayor dirección en regiones de Valparaíso a Los Lagos, en Chile, similar con el área de estudio.

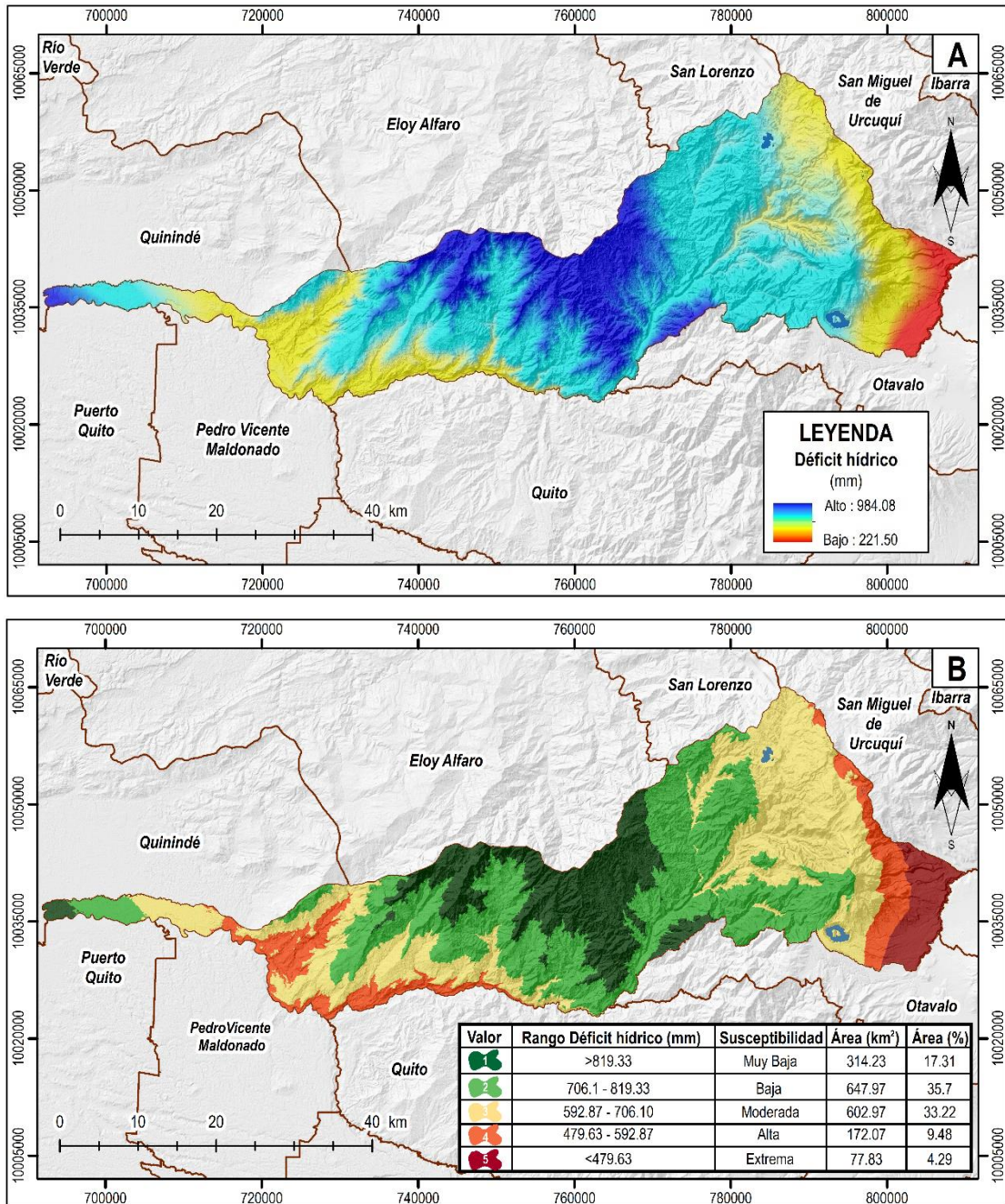
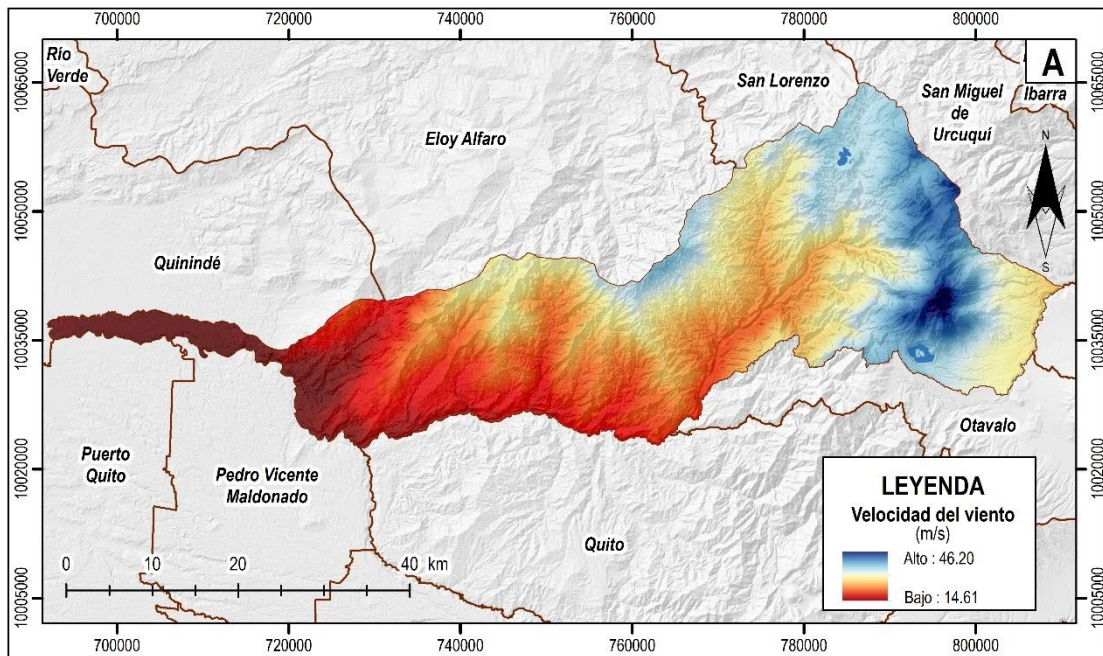


Figura 13. A. Déficit hídrico del cantón de Cotacachi; **B.** Rangos de susceptibilidad a incendios con base al déficit hídrico del cantón de Cotacachi

4.1.2.5. Velocidad del viento

Las variables climáticas en su mayoría actúan directamente a la ocurrencia de incendios forestales (Lloret, 2004; Cerano et al., 2010), a excepción de la velocidad del viento que contribuye a la propagación del fuego Keane et al., (2010), dado que el fuego se incrementa hacia arriba a favor de la pendiente que, hacia abajo en contra Khan et al., (2019), debido a la deshidratación de los combustibles disponibles en las pendientes al facilitar el alcance de las llamas que son tendidas por la velocidad del viento (Dante et al., 2019). Es decir, a mayor velocidad más se propaga (Vadrevu et al., 2010).

Por lo tanto, la velocidad del viento para el cantón Cotacachi mostró una susceptibilidad moderada de 40.29%, alta de 39.45% y extrema de 9.67% de su territorio, que corresponden a 731.39, 716 y 175.45 km² respectivamente, como se represente a la Figura 14A y 14B.



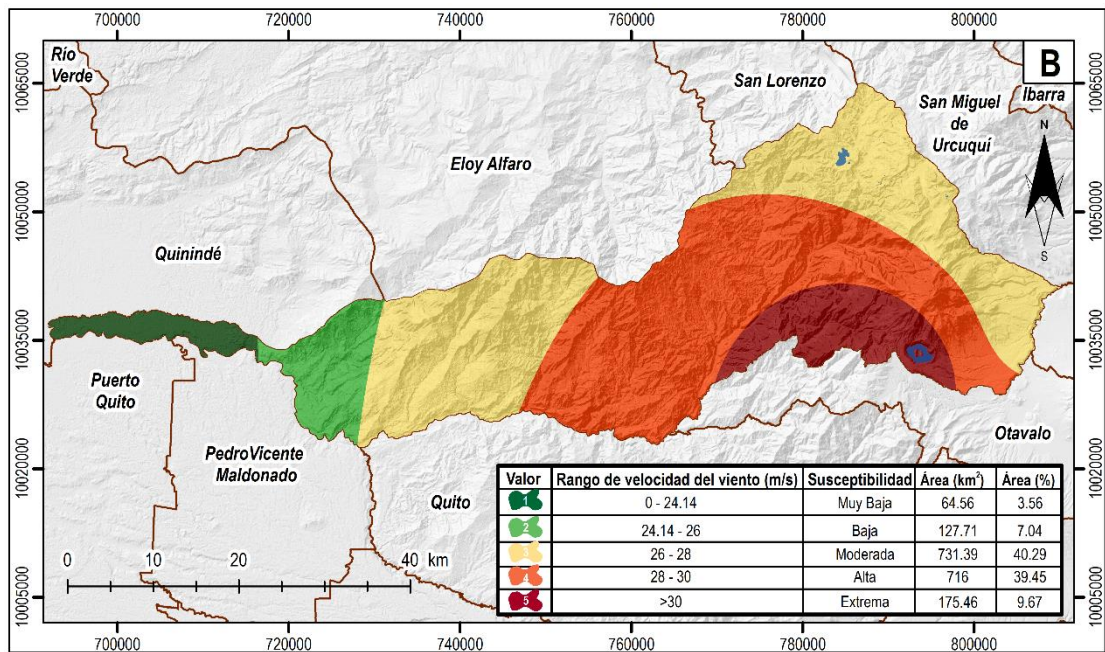


Figura 14. A. Velocidad del viento para el cantón de Cotacachi; **B.** Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la velocidad del viento del cantón de Cotacachi

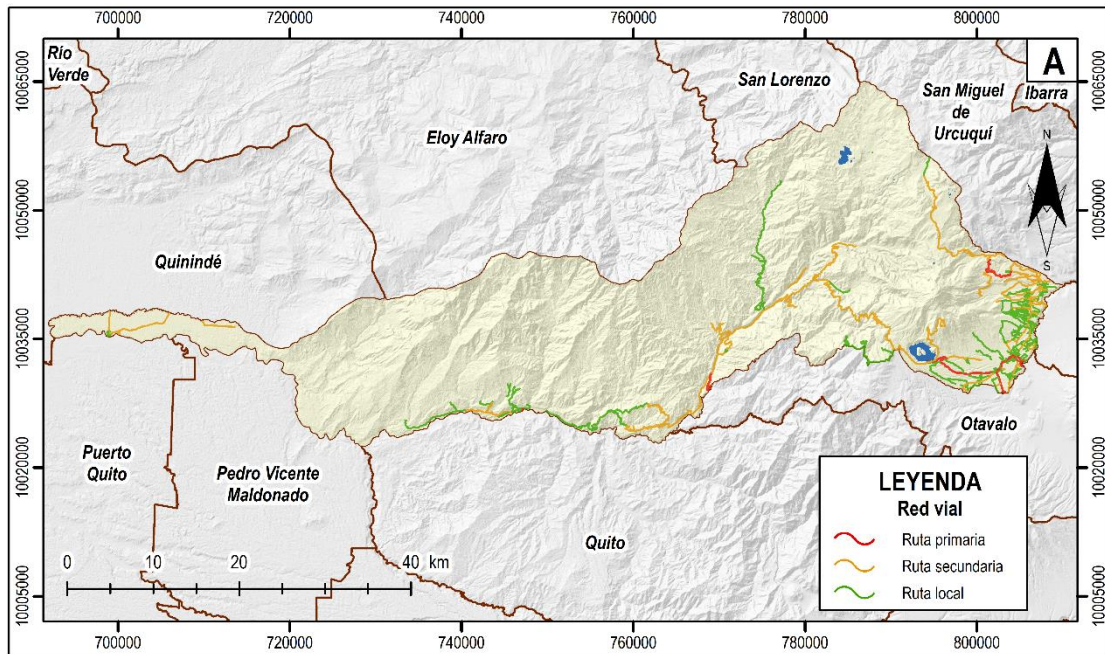
4.1.3. Variables sociales

Se determinó los resultados de las dos variables sociales, donde el factor humano influye directa o indirectamente en el proceso de ignición y propagación a incendios en la cobertura vegetal en el cantón Cotacachi.

4.1.3.1. Proximidad a carreteras

El área de estudio alberga una distribución baja de red vial en su territorio, a pesar de ser el cantón más extenso de la provincia de Imbabura, como se representa en la Figura 15A. Además, el GAD Municipal de Cotacachi (2015) valora con más de 783.50 km de vías cuya calzada es de tipo asfaltadas y/o adoquinadas (54 km), empedradas (144.5 km), lastradas (86.5 km) y suelo natural (498.5 km). Esta última se considera con mayor susceptibilidad al deterioro y están presentes para el área urbana y rural, respectivamente.

Según Adab et al., (2011) afirman que, el área limítrofe a redes viales y centros poblados influyen a la ocurrencia de incendios. Asimismo, Gutiérrez et al., (2020) mencionan que, la proximidad a carreteras se considera un factor de riesgo estático, donde al involucrarse con las demás variables pueden determinar una mejor predicción del modelo. Por lo cual, los intervalos fueron clasificados con relación a una mayor cercanía a carreteras, mayor es el riesgo a incendios de origen antrópico, donde el factor humano se vincula de forma indirecta con la variable. No obstante, presenta un nivel de susceptibilidad baja (17.69%) generados por el carecimiento del desarrollo vial, a su vez, alberga unos valores menores del nivel de susceptibilidad moderada (9.9%), al compartir espacio territorial y cercanía para la red vial, áreas pobladas y sus actividades. Es preciso mencionar que, el nivel cinco corresponde a la susceptibilidad extrema donde se intercalan con los valores del nivel cuatro o alto, como se visualiza en la Figura 15B.



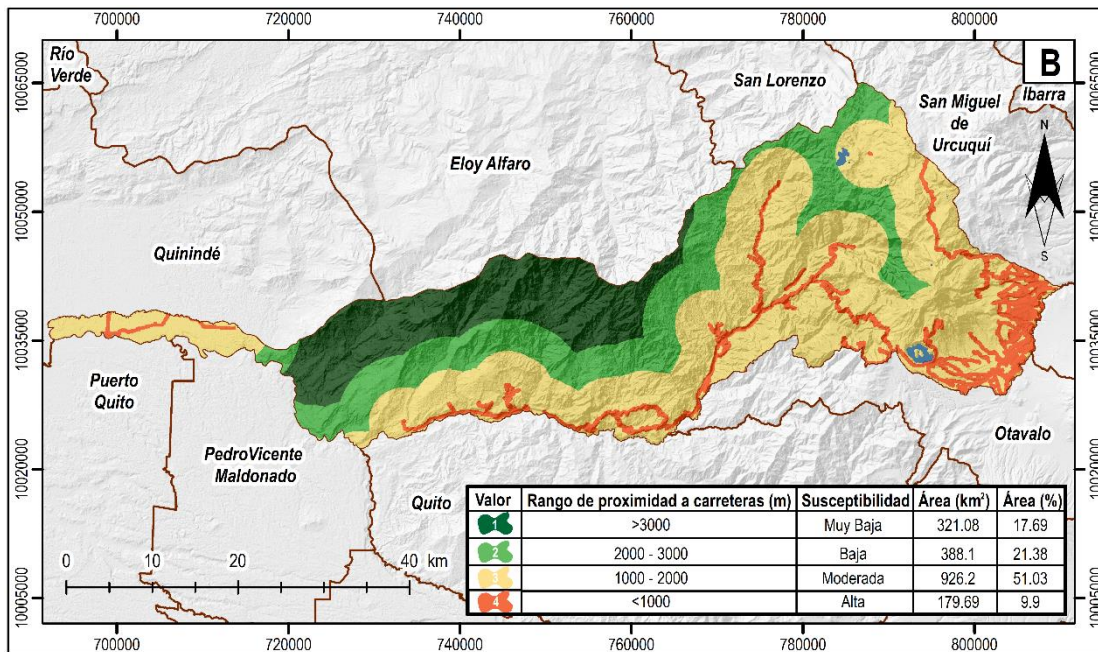


Figura 15. A. Proximidad a carreteras del cantón de Cotacachi; **B.** Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la proximidad a carreteras del cantón de

4.1.3.2 Proximidad a espacios agrícolas

Con respecto a la presente variable, en el cantón Cotacachi se identificó una extensión de 64.87 km² destinados a actividades agrícolas con mayor predominancia en la zona Andina, como se representa en la Figura 16A. No obstante, presenta una susceptibilidad muy baja de 18.58%, baja de 24.35%, moderada de 39.4% y alta de 17.68% de todo su territorio, como se visualiza en la Figura 16B. De acuerdo, con Penniman (2018) la mayoría de los agricultores consideran al fuego como una herramienta para la eliminación de residuos agrícolas y como técnica para el rebrote de pastos (Vélez, 2000; Tebbutt et al., 2021). Sin embargo, Santacruz y Palacio (2018) refutan dicha mención, debido a que en su estudio documentan que países como: Colombia, Ecuador y Perú, los cultivos ilícitos inciden a los incendios forestales, dado que en su mayoría son clandestinos y se encuentran en bosques nativos, alejados de la población.

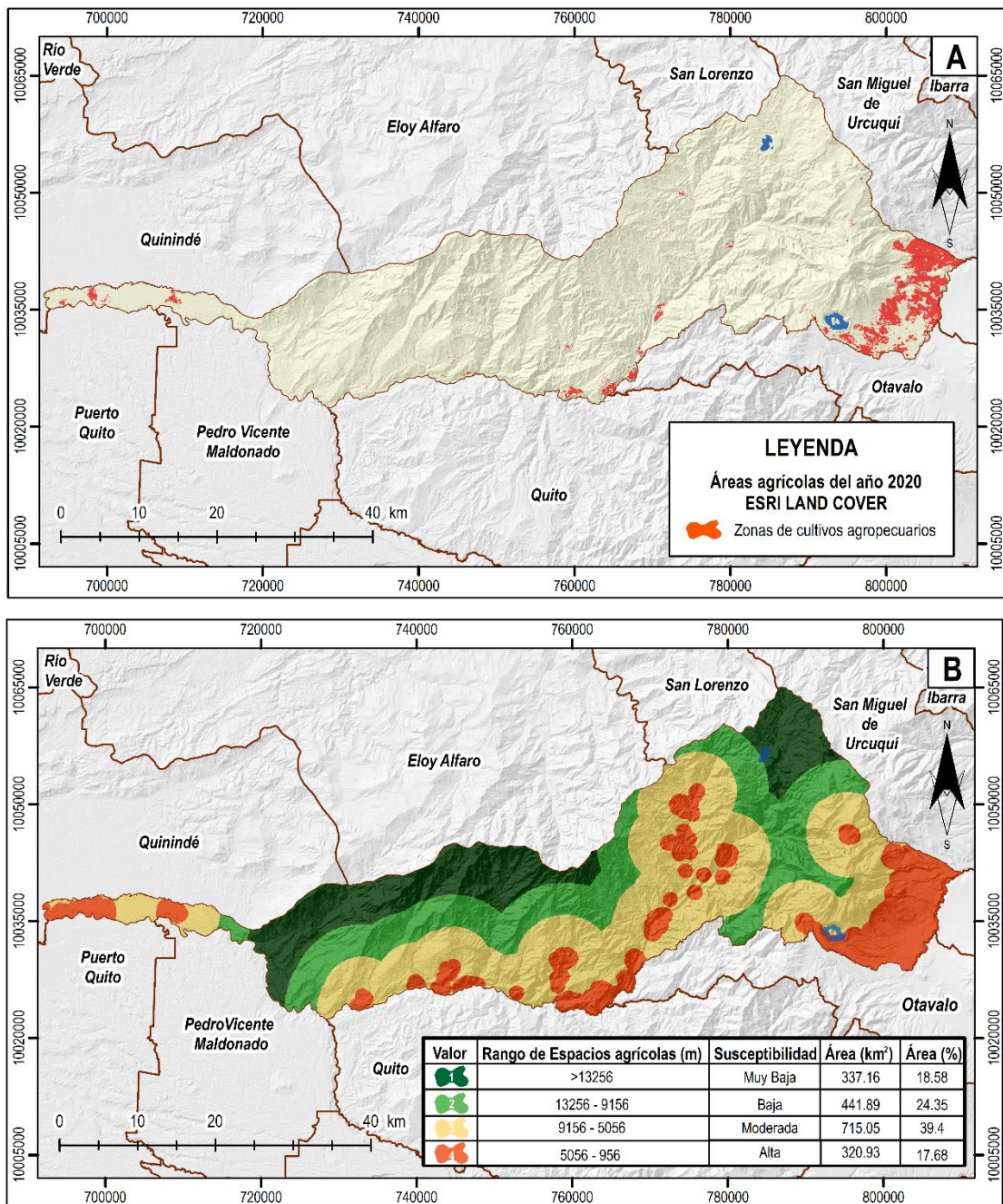


Figura 16. A. Proximidad a espacios agrícolas del cantón de Cotacachi; **B.** Rangos de susceptibilidad a incendios con base a la proximidad a espacios agrícolas del cantón de Cotacachi

4.1.4 Proceso de análisis jerárquico (PAJ)

El establecimiento de las ponderaciones para cada una de las variables topográficas, meteorológicas y sociales que inciden a la ocurrencia y propagación a incendios de cobertura vegetal, fue acorde a la investigación realizada por (Coelho et al., 2016) en Brasil y a los estudios desarrollados en nuestro país, provincia de Imbabura en los cantones de Pimampiro e Ibarra por (Arias et al., 2020; Anrango et al., 2020), respectivamente. El presente método fue adaptado para el cantón Cotacachi, para posteriormente ubicar las variables en una matriz de doble entrada, como se representa en la Tabla 29.

Tabla 29. Comparaciones pareadas

	C.Veg	Pend	Prec	Temp	OT	ETP	Alti	DH	P.C	EA	VV
C.Veg	1	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5
Pend	0.2	1	1	1	1	1	5	1	5	5	5
Prec	0.2	1	1	1	1	1	3	5	3	3	3
Temp	0.2	1	1	1	1	0.2	5	0.2	1	1	3
OT	0.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
ETP	0.3	1	1	5	1	1	5	5	1	1	3
Alti	0.2	0.2	0.3	0.2	1	0.2	1	3	1	1	1
DH	0.2	1	0.2	5	1	0.2	0.3	1	1	1	3
P.C	0.2	0.2	0.3	1	1	1	1	1	1	1	3
E. A	0.2	0.2	0.3	1	1	1	1	1	1	1	3
VV	0.2	1	0.3	0.3	0.3	0.3	1	0.3	0.3	0.3	1
Total	3.13	12.6	11.53	21.53	14.33	9.33	28.33	23.53	20.33	20.33	29.00

Nota: La simbología utilizada son las siguientes: C.Veg.: cobertura vegetal y uso de suelo; Pend: pendientes; Prec: precipitación; Temp: temperatura; OT: orientación del terreno; ETP: evapotranspiración; Alti: altitud, DH: déficit hídrico; P.C.: proximidad a carreteras; EA: proximidad a espacios agrícolas; VV: velocidad del viento.

Los valores asignados en las comparaciones pareadas fueron validados al ejecutar la ecuación de consistencia al ser menores a 0.10, cuyo resultado fue satisfactorio. Tras realizar dicho proceso, se procedió a dividir cada valor con su respectiva sumatoria

(vertical) y se obtuvo el promedio de los valores (horizontal), cuyos resultados fueron los pesos respectivos asignados para cada una de las variables.

Las variables como: cobertura y uso del suelo, evapotranspiración, pendientes y precipitación evidenciaron mayor aporte al proceso de ignición de un incendio en el área de estudio (Tabla 30). Así mismo, (Arias, 2016; Arias et al., 2020; Anrango et al., 2020; Angulo et al., 2020) en sus estudios muestran que, la cobertura vegetal posee mayor influencia a la ocurrencia de incendios. De la misma manera, Coelho et al., (2016) argumentan que, las pendientes ayudan a la propagación del fuego. Mientras que Adab et al., (2012) consideran a la precipitación como un factor influyente, puesto que contribuye a la presencia o ausencia de humedad de la vegetación. Sin embargo, (Alanís et al., 2012, Penniman, 2018; Orlando, 2020) demuestran que, las demás variables climáticas y topográficas disminuyen su importancia y jerarquía una sobre otra, de acuerdo con las condiciones donde se realice la investigación.

Tabla 30. Ponderaciones de factores según Saaty

Variables topográficas, meteorológicas y sociales	Ponderación
Cobertura vegetal y uso de suelo*	0.2805
Evapotranspiración potencial**	0.1151
Pendiente del terreno*	0.1084
Precipitación media anual**	0.1058
Temperatura media anual**	0.0685
Orientación del terreno*	0.0666
Déficit hídrico**	0.0672
Proximidad a carreteras***	0.0555
Proximidad a espacios agrícolas***	0.0555
Altitud*	0.0458
Viento**	0.0329
Total	1.0000

Nota: La simbología para las variables son las siguientes: *: topográficos; **: meteorológico; *** sociales.

A continuación, se ejecutó la ecuación 17 de la susceptibilidad a incendios para el cantón Cotacachi, donde se tuvo en cuenta los pesos para las 11 variables ponderadas anteriormente, al priorizar su influencia directa a la propagación de incendios, como se representa en la Figura 17.

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Susceptibilidad} \\
 & = Cveg * 0.2805 + ETP * 0.1151 + Pend * 0.1084 + Prec * 0.1058 \\
 & + Temp * 0.685 + OT * 0.0666 + DH * 0.0672 + PC * 0.0555 + EA \\
 & * 0.0555 + Alti * 0.0458 + VV * 0.0329
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

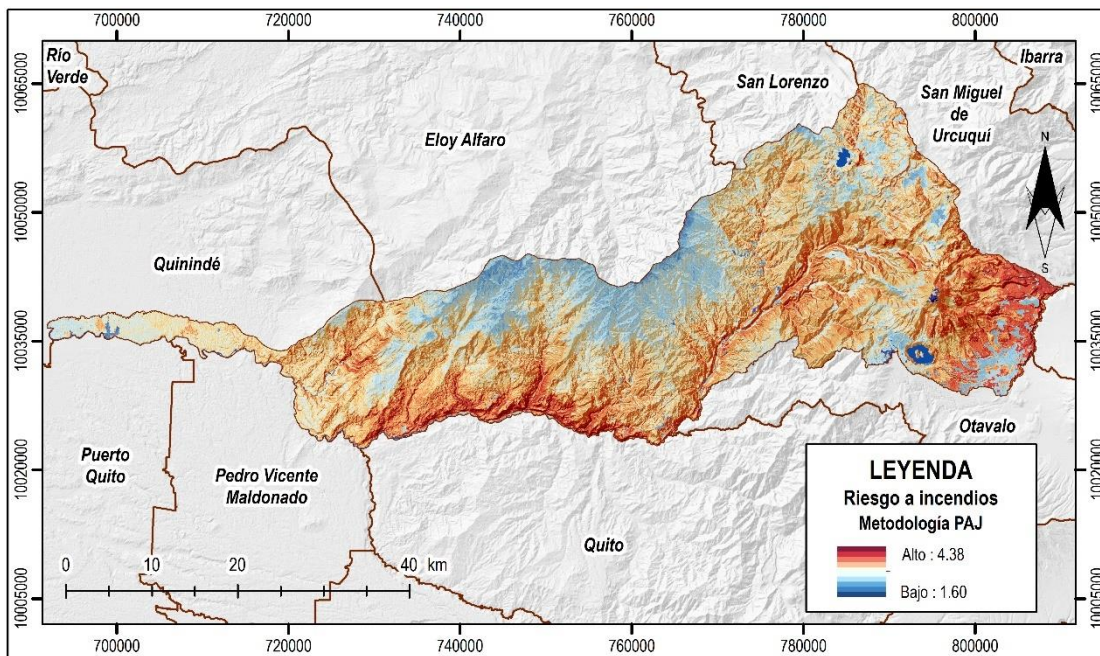


Figura 17. Modelo de zonificación de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal por el proceso de análisis jerárquico

4.1.5 Radiofrecuencia (RF)

Es un método estadístico bivariado que utilizó el registro histórico de eventos de la plataforma INPE del periodo de años 2000–2020, que en total fueron 874 registrados para el área de estudio. Aleatoriamente se consideró el 75% (656) de los focos de calor, que se utilizaron como datos de entrenamiento y el 25% (219) restantes utilizados como datos de prueba, como lo realizado por (Althuwaynee et al., 2014; Jaafari y Gholami,

2017). Se modificó la clasificación de los niveles de susceptibilidad a incendios en las variables bio físicas y sociales utilizados en PAJ con base al peso agregado obtenido en SA entre los datos de entrenamiento con los factores causales clasificados, como se representan en la Figura 18.

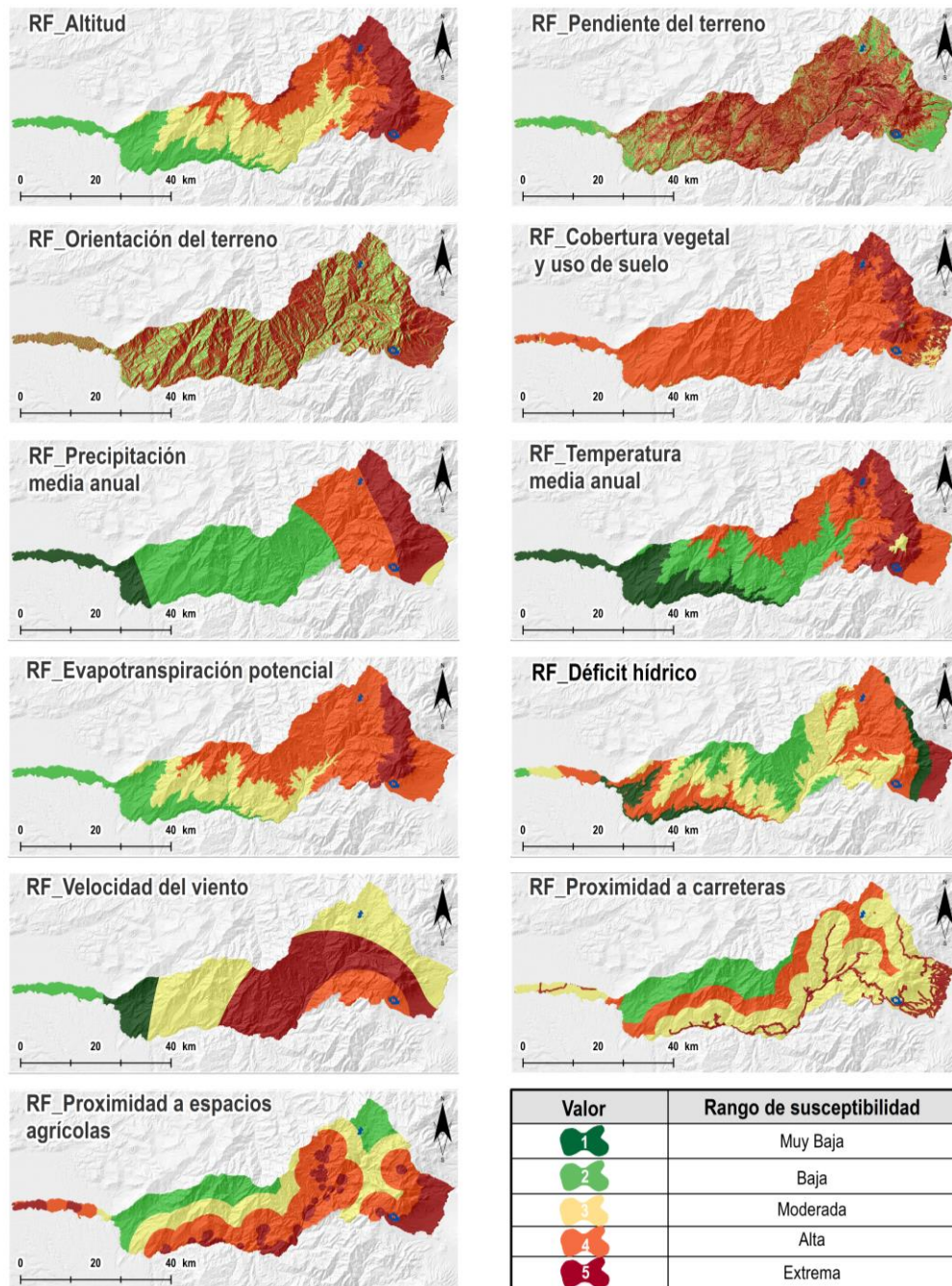


Figura 18. Reclasificación de los factores causales mediante la ponderación SA

Se ponderaron 11 variables del tipo biofísico y sociales donde predomina la cobertura y uso del suelo al poseer un mayor peso a otras, similar a lo desarrollado en el método PAJ, como se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31. Ponderaciones de factores reclasificadas según Radiofrecuencia (RF)

Variables topográficas, meteorológicas y sociales reclasificadas	Ponderación
RF_Cobertura vegetal y uso de suelo*	6.7513
RF_Evapotranspiración potencial**	5.8564
RF_Altitud*	5.3710
RF_Velocidad de viento**	4.6996
RF_Precipitación media anual**	4.3206
RF_Temperatura media anual**	4.2921
RF_Proximidad a carreteras***	4.0059
RF_Proximidad a espacios agrícolas***	3.9004
RF_Orientación del terreno*	3.2675
RF_Déficit hídrico**	2.5192
RF_Pendiente del terreno*	1.0000
Total	46.0000

Nota: La simbología para las variables son las siguientes: *: topográficos; **: meteorológico; *** sociales.

Para la elaboración del modelamiento se utilizó la ponderación de la tasa de predicción de RF y la comparación por pares (PW) multiplicados por 100 con la finalidad de mejorar el proceso de predicción, al ser más eficiente para la obtención del modelo de susceptibilidad a incendios, como se aprecia los valores en la Tabla 32.

Tabla 32. Tasa de predicción de RF y predicción de comparación por pares

Factores	Tasa de predicción de RF	RF*100	Tasa de predicción de comparación por pares (PW)	PW*100
Cobertura vegetal	7.5592	756	7.5592	756
Evapotranspiración potencial	5.5452	555	5.5452	555
Altitud	5.5171	542	5.5171	542

Temperatura media anual	4.5287	453	4.5287	453
Precipitación media anual	4.1647	416	4.1647	416
Déficit hídrico	2.0768	208	2.0768	208
Proximidad a carreteras	3.7120	371	1.0300	103
Pendiente del terreno	1.0000	100	1.0000	100
Orientación del terreno	3.0143	301	1.0000	100
Proximidad a espacios agrícolas	3.6040	360	1.0000	100
Velocidad del viento	4.3943	439	1.0000	100
Total	45.1163	4501	34.4217	3433

El modelamiento que utiliza el enfoque estadístico bivariado es favorable debido a la capacidad de lograr una precisión lógica (Althuwaynee et al., 2014). Al contrario de la similaridad y jerarquización de los valores entre las ponderaciones RF con PW; RF mostró un mejor peso relativo real entre los factores que se refiere a la densidad real, como se representa en la Ecuación 18.

$$\begin{aligned}
 \textit{Susceptibilidad} = & RF_Cveg * 756 + RF_ETP * 555 + RF_Alti * 542 + RF_Temp * \\
 & 453 + RF_Prec * 416 + RF_DH * 208 + RF_PC * 103 + RF_Pend * 100 + RF_OT * \\
 & 100 + RF_EA * 100 + RF_VV * 100 \qquad (18)
 \end{aligned}$$

En consecuencia, el modelo obtenido evidenció que, la cobertura vegetal perteneciente al pajonal situado entre el centro cantonal y la comunidad Piñan, son más susceptibles a incendios. No obstante, la parroquia de las Golondrinas presenta una menor susceptibilidad debido a la ausencia de datos de ocurrencia del evento en el sector, como se representa en la Figura 19.

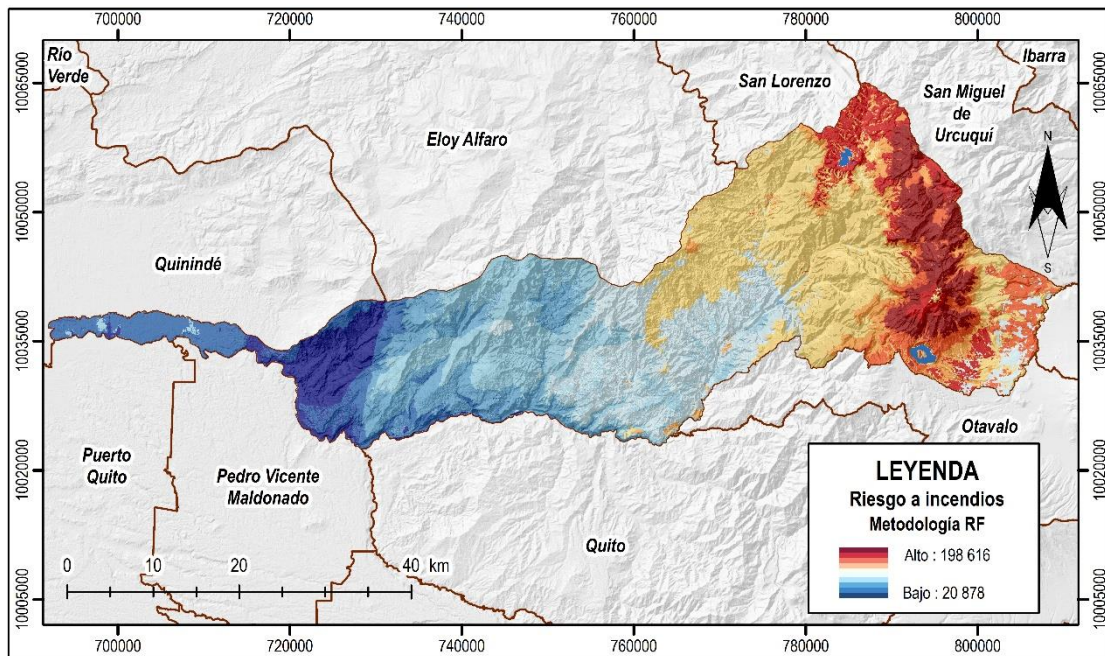


Figura 19. Modelo de zonificación de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal por el método radiofrecuencia

4.2 Zonificación de los diferentes niveles de susceptibilidad a incendios en las categorías de cobertura vegetal

Se determinaron dos modelos de susceptibilidad para el área de estudio, mismos que están influenciadas por la cobertura y uso del suelo y la evapotranspiración potencial. Desde el punto de vista de Andrango y Romero (2021) mencionan que las características de los combustibles intensifican el fuego. A diferencia de las variables restantes que afectan a la propagación a incendios, por ejemplo: la velocidad del viento.

4.2.1 Categorización de los diferentes niveles de susceptibilidad

Con la finalidad de categorizar áreas de menor a alta susceptibilidad a incendios para el cantón Cotacachi, se ejecutó la *regla práctica del intervalo* para clasificar los distintos niveles de susceptibilidad en los dos modelamientos que fueron obtenidos a través de la metodología PAJ y RF, respectivamente. Al respecto conviene mencionar

que, los valores para cada modelo se basaron en el procesamiento de las matrices pareadas y enfoque estadísticos.

4.2.1.1 Modelo de susceptibilidad PAJ

Los niveles de susceptibilidad del modelo obtenido de la metodología PAJ alberga aproximadamente menos del 4% de su extensión territorial a zonas de muy baja susceptibilidad a incendios que corresponden a cuerpos de agua, zonas pobladas y otras coberturas vegetales, como se representa en la Figura 20. No obstante, se puede evidenciar los niveles de alta (36.91%) y extrema (14.51%) susceptibilidad ante la probabilidad al evento, es decir, un 51.42% (931.42 km²) alojándose en zonas pertenecientes al sector oriental y suroccidental del cantón.

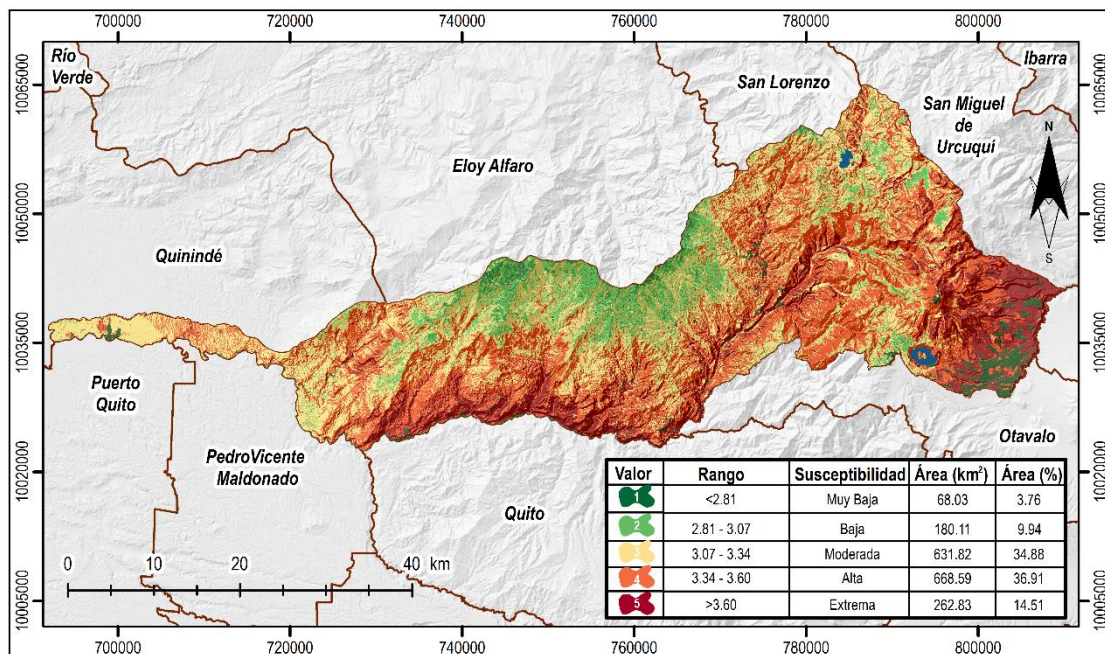


Figura 20. Modelo de susceptibilidad a incendios para el cantón Cotacachi, metodología proceso de análisis jerárquico

Con base a las zonas con mayor a menor susceptibilidad del modelo PAJ se identificó que la zona Tropical presenta una mayor susceptibilidad a incendios, debido a las condiciones ambientales y la extensión del territorio, seguida de la zona Andina que

presentan el 39.03 y 12.39 % de susceptibilidad total (alta y extrema), respectivamente para cada región como se representa en la Figura 21. Además, las parroquias con una alta susceptibilidad son García Moreno, Apuela, 6 de Julio de Cuellaje con 14.41; 6.17; y 4.01 % del territorio y más sectores aledaños presentan diferentes susceptibilidades (Anexo 16).

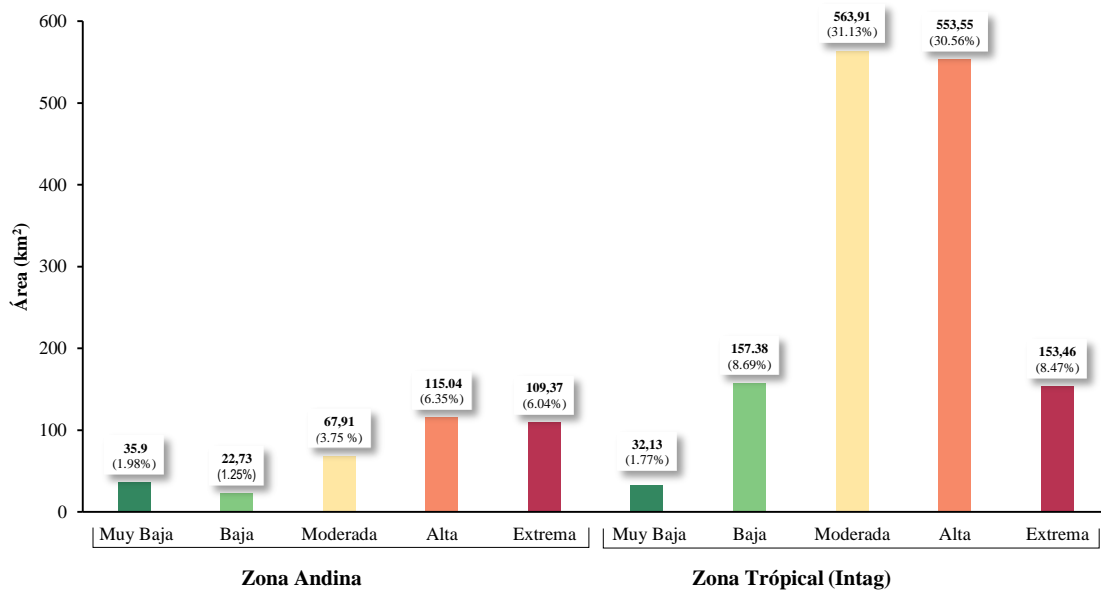


Figura 21. Niveles de susceptibilidad para la zona Andina y Tropical, Modelo PAJ

La variabilidad del incendio está condicionada en relación con el tipo de cobertura y uso del suelo, donde algunas presentan una mayor incidencia y propagación espacial del evento con base al modelo PAJ. En las cuales, aquellas coberturas que presentan un mayor grado de influencia del nivel de susceptibilidad (alta y extrema) pertenecen al bosque nativo (631.25 km²), páramo (130.72 km²), vegetación arbustiva (74.97 km²), cultivos (63.41 km²) y vegetación herbácea (30.81 km²) y otras con base al área total cantón Cotacachi. A pesar de ella, otras coberturas vegetales pertenecientes a zona poblada, cuerpos de agua y suelo sin cobertura vegetal no presentan susceptibilidad. En concordancia, a las coberturas vegetales más susceptibles con base a su propia área total en porcentajes son: cultivos (97.87%), páramo (66.81%), vegetación arbustiva

(62.37%), bosque nativo (48.85%), vegetación herbácea (35.35%) entre otros, como se representa en la Figura 22.

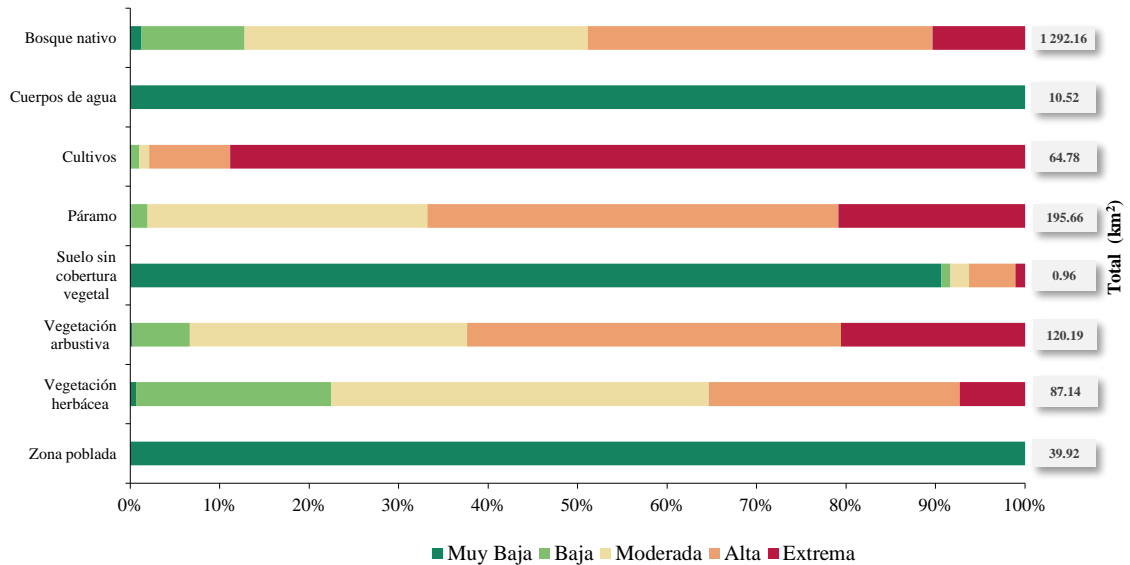


Figura 22. Gráfico de barras 100% apiladas de la susceptibilidad sobre las coberturas vegetales, Modelo PAJ

Nota: Cada cobertura compara el porcentaje con el que cada valor constituye al total y el nivel de susceptibilidad. Además, el área total puede cambiar debido a la pérdida de los píxeles durante el Geoprocesamiento.

4.2.1.2 Modelo de susceptibilidad RF

El cantón Cotacachi aloja grandes extensiones de las diferentes categorías de cobertura vegetal con alrededor del 97.12 % y el restante corresponde a zonas pobladas, cuerpos de agua y ríos. Además, al aplicar la metodología RF que integra la comparación por pares de los factores causales y calcular los niveles de susceptibilidad, se estimó un 47.56% de susceptibilidad total (alta y extrema) a incendios en el cantón Cotacachi, que se contrasta con el establecimiento de las zonas susceptibles con el modelo PAJ, como se evidencia en la Figura 23. Asimismo, presenta una muy baja susceptibilidad a incendios, pertenecientes al 3.13% ubicados sobre los cuerpos de agua, zonas urbanas y otros territorios.

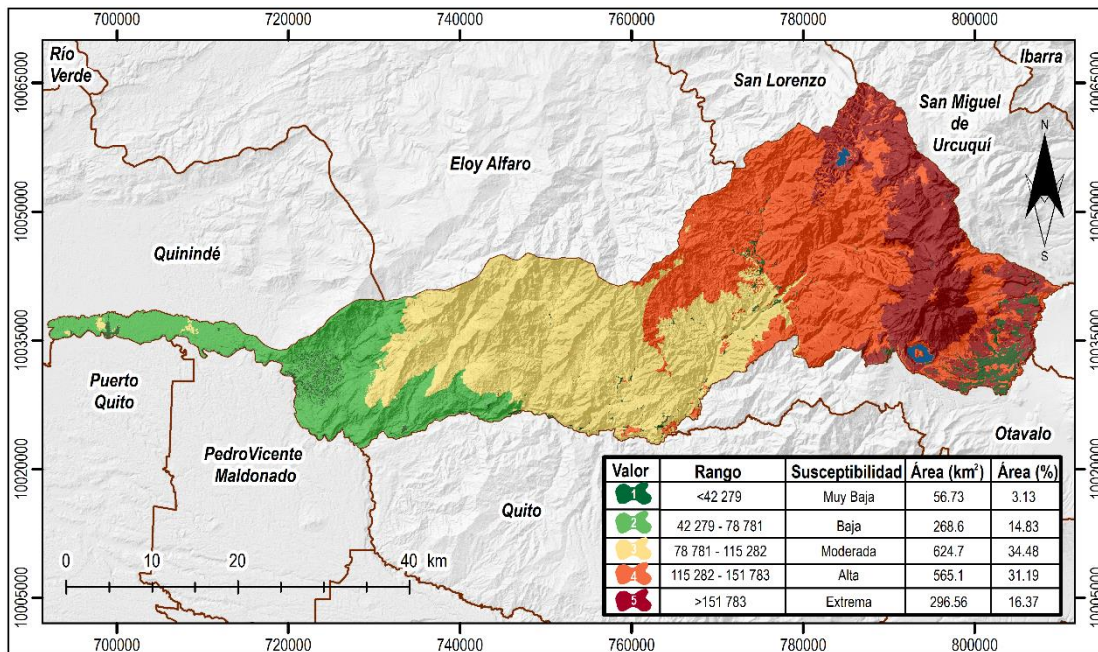


Figura 23. Modelo de susceptibilidad a incendios para el cantón Cotacachi, metodología radiofrecuencia

Predomina una mayor susceptibilidad en la zona Tropical con una susceptibilidad total (alta y extrema) que representa el 30.16% del total del territorio, seguido de la zona Andina que posee el 17.41%, respectivamente. Por otra parte, en la zona Andina aumentó la extensión del nivel de extrema susceptibilidad a incendios del 5.37% a diferencia del modelo PAJ, que se evidencia la diferencia en la aplicación de las metodologías utilizadas. No obstante, las parroquias con una alta susceptibilidad son: 6 de Julio de Cuellaje, Apuela, Peñaherrera con 9.22, 8.26 y 3.52 %, respectivamente de extensión total del territorio (Anexo 18).

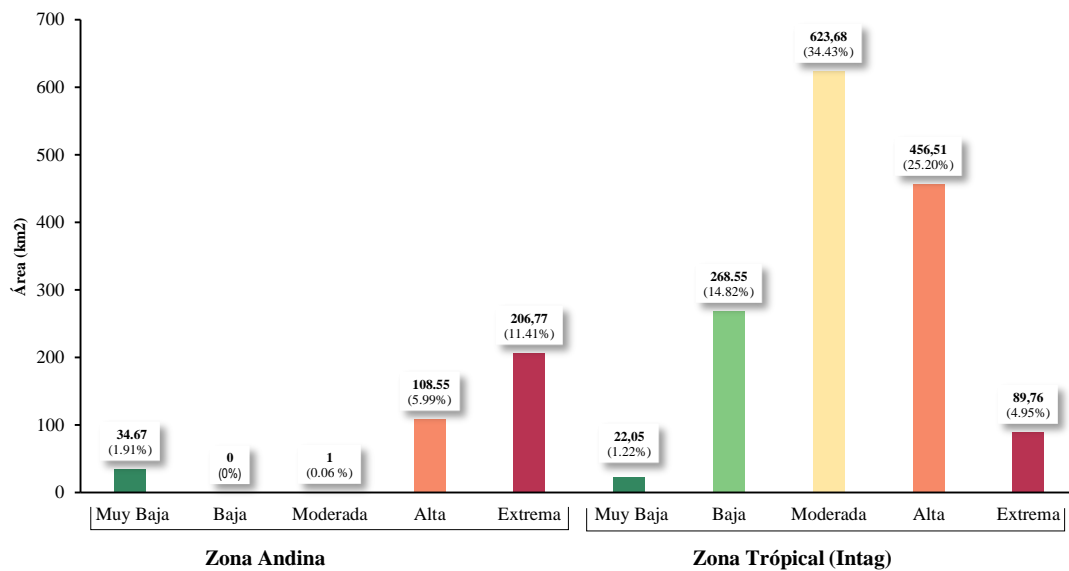


Figura 24. Niveles de susceptibilidad para la zona Andina y Tropical, Modelo RF

Las coberturas vegetales presentan una variabilidad en la zonificación de susceptibilidad a incendios mediante la metodología RF a diferencia del modelo PAJ, influenciada por la ocurrencia de estos eventos ante las características del territorio. Es decir, las cubiertas vegetales con alta y extrema susceptibilidad a incendios se establecen debido a las condiciones óptimas proporcionadas por la evapotranspiración potencial, baja pluviosidad, altas temperaturas y déficit hídrico que condicionan al volumen y extensión del evento sobre los tipos de cubiertas vegetales. Estas presentan un total de susceptibilidad alta y extrema en bosque nativo (468.33 km²), páramo (195.60 km²), vegetación arbustiva (74.16 km²), vegetación herbácea (61.32 km²) y cultivos (60.77 km²) con base al área total cantón Cotacachi, como se representa en la Figura 26. Asimismo, los factores climáticos condicionan a la generación y aumento de la biomasa que contribuyen a la conducta del fuego, la advección de aire caliente y seco al ser patrones de alta significancia (Littell et al., 2016; Pompa et al., 2017; Pazmiño, 2020). En concordancia, a las coberturas vegetales más susceptibles con base a su propia área total en porcentajes son: páramo (99.96%), cultivos (93.82%), vegetación herbácea (70.36%), vegetación arbustiva (61.69%), bosque nativo (36.34%) entre otros, como se representa en la Figura 25.

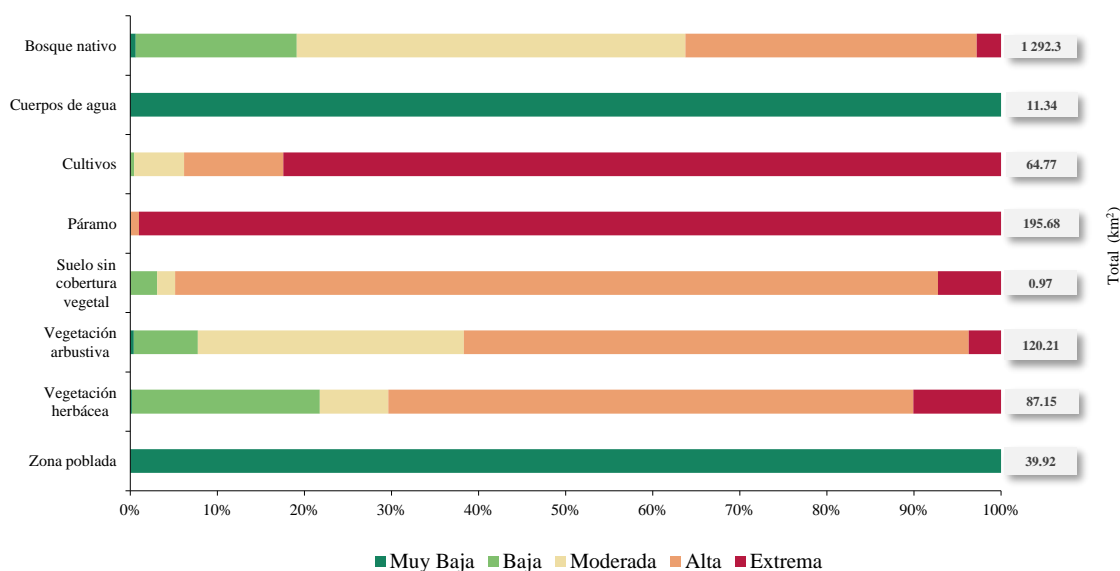


Figura 25. Gráfico de barras 100% apiladas de la susceptibilidad sobre las coberturas vegetales, Modelo RF

Nota: Cada cobertura compara el porcentaje con el que cada valor constituye al total y el nivel de susceptibilidad. Además, el área total puede cambiar debido a la pérdida de los píxeles durante el Geoprocesamiento.

4.2.2 Validación de datos

Para validar los modelamientos de susceptibilidad a incendios para el cantón Cotacachi, se realizó las siguientes pruebas estadísticas y se obtuvo resultados satisfactorios.

4.2.2.1 Chi Cuadrado

Al asociar los modelos PAJ y RF junto a los focos de calor para el periodo de años 2000-2020, se determinó una alta significancia de 0.01925 y 0.00023, respectivamente. Tras efectuar una prueba estadística del Chi Cuadrado de Pearson, al conocer que sus valores son menores a 0.05, se aceptó la hipótesis alterna en ambos modelamientos. De acuerdo con Sánchez (2020) menciona que la prueba del coeficiente de correlación de Pearson se aplica para determinar si una serie de datos u observaciones es acorde a una teoría determinada anteriormente. Sin embargo, el modelo RF presentó un resultado más significativo en comparación a PAJ, que muestra una mejor intercalación con los

niveles altos y extremos de susceptibilidad a incendios para el cantón de Cotacachi con los focos de calor, como se observa en la Tabla 33.

Tabla 33. Prueba estadística Chi Cuadrado de Pearson para modelamiento de incendios PAJ y RF

	Valor	Df	Significación asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson*	5.479	1.000	0.01925
Chi-cuadrado de Pearson**	13.594	1.000	0.00023

Nota: La simbología para la prueba estadística corresponde al modelamiento siguiente: *: PAJ; **: RF.

4.2.2.2 Curva ROC

En los modelos de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal para el cantón Cotacachi se generó la Curva ROC, como se representa en la Figura 26, que demuestra el cálculo de los valores pertenecientes al AUC al ser 0.824 y 0.911 para el modelo PAJ y RF, respectivamente (Tabla 37). Los valores calculados son mayores a 0.5, se aceptó la hipótesis alterna. No obstante, con respecto al resultado de RF, mostró un alto grado de confiabilidad de datos, donde se utilizó dicho modelo para el establecimiento de estrategias con el fin de disminuir los impactos provenientes de los incendios.

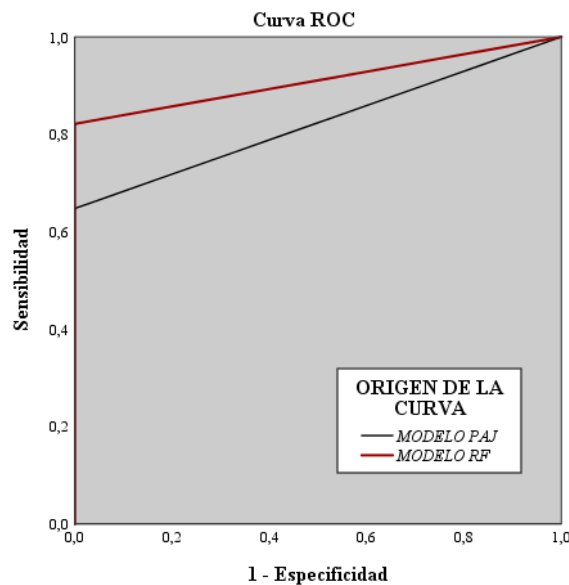


Figura 26. Curva ROC

Tabla 34. Área bajo la curva para los modelos a incendios

Variables de resultado de prueba	Área	Error estándar	Significación asintótica	95% de intervalo de confianza asintótico	
				Límite inferior	Límite superior
Modelo PAJ	0.824	0.060	0.053	0.707	0.941
Modelo RF*	0.911	0.031	0.014	0.850	0.971
Focos de calor	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000

Nota: * corresponde al mejor modelo utilizado para la representación de la susceptibilidad a incendios para el cantón Cotacachi.

Mediante la validación estadística se evidenció que el modelo RF presentó valores más aceptables a incendios de cobertura vegetal para el cantón Cotacachi, como se refleja en la Figura 24. Por lo tanto, se estimó que las áreas más sobresalientes de susceptibilidades son la moderada 34.48% (624.7 km²) y alta 31.19% (565.10 km²) del territorio, respectivamente sobre los tipos de coberturas vegetales de bosque nativo, cultivos, vegetación arbustiva, vegetación herbácea y páramo. Sin embargo, el nivel extremo predomina sobre los páramos, vegetación herbácea, centro cantonal y parte de Piñan con aproximadamente el 16.37% (296.56 km²), debido al ser el grado de interacción de todas variables que condicionan al proceso de ignición y propagación a incendios en el área de estudio, con mayor incidencia sobre el páramo, vegetación arbustiva y herbácea.

Por esta razón, Aguirre et al., (2018) mencionan que, los páramos son ecosistemas sensibles, considerados como elementos naturales al brindar servicios ecosistémicos únicos, principalmente a la industria del turismo. De esta manera, los turistas manifiestan que, en los últimos años la acción del hombre tiene un papel importante en la ignición de incendios, principalmente por las quemadas agrícolas que tienen una acción exponencial en condiciones adecuadas para el proceso de generación y propagación a incendios (Orozco et. al., 2011; Díaz y González, 2016). Por lo tanto, es importante establecer estrategias de gestión de riesgo en este tipo de área de interés.

4.3 Diseño de estrategias de gestión de incendios de cobertura vegetal

Se determinaron seis estrategias de gestión de riesgos, con base al análisis FODA del cantón Cotacachi.

4.3.1 Matriz FODA

Se define las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas que cuenta el área de estudio, ilustrada en la Tabla 35.

Tabla 35. Análisis FODA cantón Cotacachi

Fortalezas	Oportunidades
F1. Identificación de áreas susceptibles a incendios en el cantón Cotacachi.	O1. Voluntariado comunitario y Cuerpo de bomberos en colaboración activa para charlas, y proyectos de protección y prevención de la localidad frente a incendios.
F2. Caracterización de las condiciones biofísicas y sociales de las áreas susceptibles a incendios en el cantón Cotacachi.	O2. Participación de la comunidad universitaria para proyectos de vinculación.
F3. Presencia de Cuerpos de bomberos y Ordenanzas para la regulación de las quemas agrícolas y la acción de extinción de incendios.	O3. Normativa legal vigente.
F4. Plan RUPAY de prevención y respuesta para incendios forestales.	
Debilidades	Amenazas
D1. Aumento de la frontera agrícola.	A1. Dificil acceso a zonas susceptibles a incendios.
D2. Área de susceptibilidad alta y extrema corresponde al 47.56% del territorio cantonal.	A2. Falta de aporte económico por parte de las autoridades del cantón.
D3. Desconocimiento de los pobladores en la prevención y extinción de incendios del cantón Cotacachi.	A3. Deficiencia en el monitoreo de áreas susceptibles a incendios.
D4. Falta de disponibilidad de vehículos, equipos y personal para la acción ante incendios.	A4. Pérdida de cobertura vegetal y biodiversidad a causa de incendios.

4.3.1.1 Identificación de estrategias

Una vez identificadas las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del área de estudio, se procedió a realizar un cruce de elementos (Tabla 36) para proponer estrategias, mismas que ayuden a prevenir, mitigar, controlar y la acción inmediata frente a incendios de cobertura vegetal en el cantón Cotacachi.

Tabla 36. Cruce de variables del FODA

Criterios	Variables	Estrategias
Fortaleza y Amenaza (FA)	F2. Caracterización de las condiciones biofísicas y sociales de las áreas susceptibles a incendios en el cantón Cotacachi.	Establecer un Sistema de Alerta Temprana (SAT) de prevención de incendios en relación con los factores biofísicos y sociales del área de estudio.
	A4. Pérdida de cobertura vegetal y biodiversidad a causa de incendios.	
	F1. Identificación de áreas susceptibles a incendios en el cantón Cotacachi.	Implementar Torres de Vigilancia para el monitoreo y control en áreas vulnerables a incendios.
	A1. Difícil acceso a zonas susceptibles a incendios.	
Fortalezas y Oportunidades (FO)	F1. Identificación de áreas susceptibles a incendios en el cantón Cotacachi.	Apertura de brechas y franjas cortafuegos en sectores con mayor vulnerabilidad para combatir los incendios.
	O1. Voluntariado comunitario y cuerpo de bomberos en colaboración activa para charlas y proyectos de protección y prevención de la localidad frente a incendios.	
	F3. Presencia de Cuerpos de bomberos y ordenanzas para la regulación de las quemas agrícolas y la acción de extinción de incendios.	Asociación de comunidades, organizaciones públicas y la academia universitaria para las brigadas comunitarias.
	F4. Plan RUPAY de prevención y respuesta para incendios forestales.	
	O1. Voluntariado comunitario y cuerpo de bomberos en colaboración activa para charlas y proyectos de protección y prevención de la localidad frente a incendios.	
	O2. Participación de la comunidad universitaria para proyectos de vinculación.	
Debilidades y Amenazas (DA)	D3. Desconocimiento de los pobladores en la prevención y extinción de incendios del cantón Cotacachi.	Monitoreo para la identificación, evaluación de la biomasa vegetal y

	A3. Deficiencia en el monitoreo de áreas susceptibles a incendios.	dispersión de lluvia mediante drones ante riesgo a incendios.
Debilidad y oportunidad (DO)	D3. Desconocimiento de los pobladores en la prevención y extinción de incendios del cantón Cotacachi.	
	O2. Participación de la comunidad universitaria para proyectos de vinculación.	Implementar proyectos de educación ambiental a la población por parte de la academia universitaria en comunidades vulnerables a incendios.
	D2. Área de susceptibilidad alta y extrema corresponde al 47.56% del territorio cantonal.	
	D4. Falta de disponibilidad de vehículos, equipos y personal para la acción ante incendios.	
	O3. Normativa legal vigente.	

Estrategia 1. Sistema de Alerta Temprana (SAT)

Objetivo general:

Diseñar un Sistema de Alerta Temprana para prevenir incendios de cobertura vegetal en el cantón Cotacachi.

Alcance:

Implementar los SAT en todas las comunidades del cantón Cotacachi relacionados a sectores aledaños susceptibles a incendios.

Justificación:

El cantón Cotacachi muestra un total de 47.56% de susceptibilidad alta y extrema a incendios de cobertura vegetal, en efecto es necesario implementar acciones que eviten desastres y afectaciones a gran escala. De acuerdo, con Gasol (2020) un SAT genera información de forma operacional, mismo que asocia diferentes estrategias con orientaciones de control, prevención y vigilancia ante posibles incendios. Sin embargo, el éxito dependerá del conocimiento de la problemática al momento de integrar herramientas sencillas y efectivas, las cuales permitirán desarrollar un diagrama de información efectivo y seguro, mediante un seguimiento constante a través de la

inclusión de dispositivos, estructuras y la ejecución de un plan de contingencia (Brito, 2016). En la Figura 27 y Tabla 37, se detalla el proceso a implementar la estrategia.

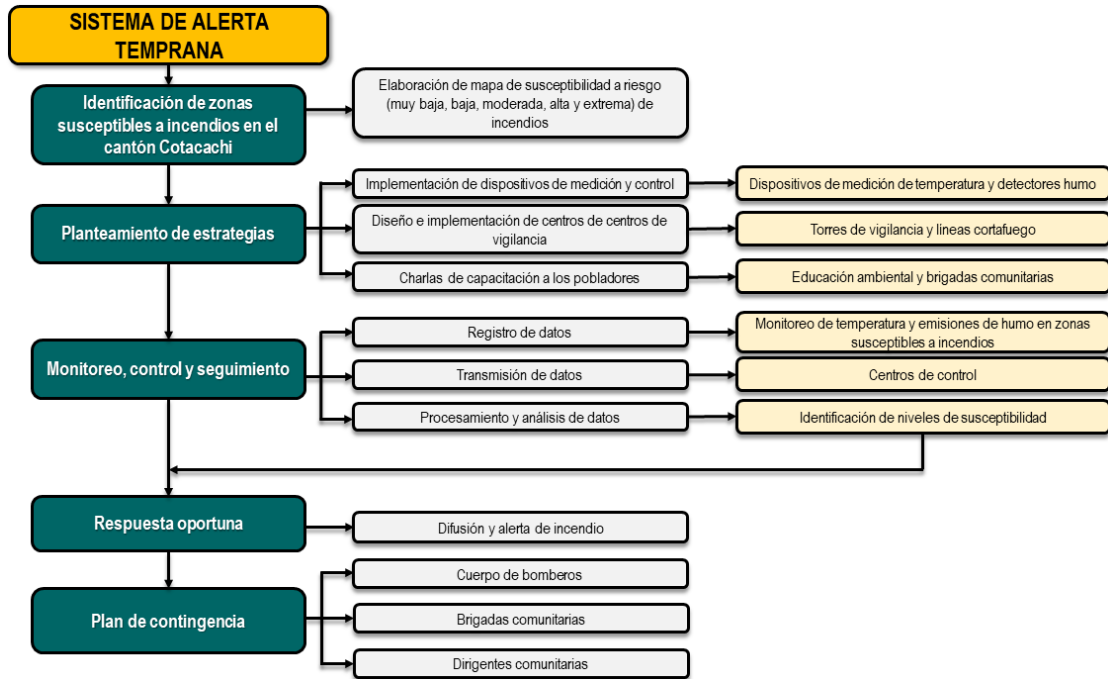


Figura 27. Sistema de Alerta Temprana

Tabla 37. Programa de Sistema de Alerta Temprana

Estrategia	Proyecto	Actividades	Indicadores	Medios de verificación	Alcance	Responsable
Programa de Sistema de Alerta Temprana	Proyecto de campaña y prevención de incendios	Socializar los resultados de la investigación a las autoridades del GAD Municipal de Santa Ana de Cotacachi, Cuerpo de bomberos y representantes de las distintas comunidades. Capacitación a los pobladores de las diferentes comunidades con el propósito de ejecutar acciones frente a posibles incendios de cobertura vegetal.	Número de responsables por entidades.	Oficios entregados, plan de capacitación, presentación PPT, listado de asistentes y registro fotográfico.	Implementar los SAT en todas las comunidades del cantón Cotacachi relacionados a sectores aledaños susceptibles a incendios.	Gobierno municipal de Santa de Cotacachi.
	Proyecto de implementación de los Sistema de Alerta Temprana	Instalación de dispositivos de control en sectores con mayor susceptibilidad y monitoreo de información a centros de control. Ejecución de acciones ante posibles incendios, evacuaciones e intervenciones rápidas por parte del Cuerpo de bomberos, brigadas y etc.	Número de dispositivos instalados, número de responsables para monitoreo. Número de responsables por sector, Cuerpo de bomberos.	Informes de monitoreo, registro fotográfico. Plan de acciones, listado de participantes en acción de control, informes, registro fotográfico.		Representantes de las comunidades.

Estrategia 2. Torres de vigilancia para el monitoreo y control en áreas vulnerables a incendios.

Objetivo General:

Determinar la localización óptima topográfica para las instalaciones de puntos de observación fijas o torres de vigilancia en el cantón Cotacachi.

Alcance:

Monitorear el 65% (1 179.8 km²) del territorio cantonal para el control a incendios de cobertura vegetal por medio de las torres de vigilancia.

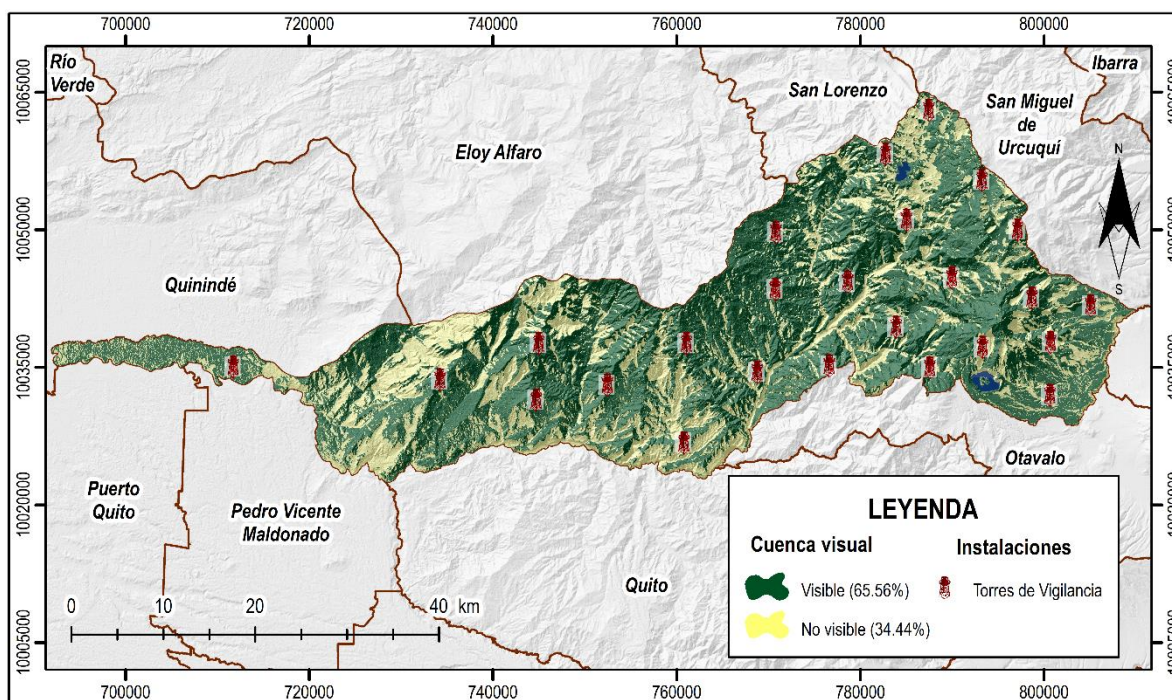


Figura 28. Torres de vigilancia en el cantón Cotacachi

Justificación:

Al determinar que alrededor del 47.56% del territorio presenta un nivel de alta y extrema susceptibilidad a incendios, impulsa a la implementación y ejecución de estrategias. Según Bosnich (2007) la detección de incendios favorece a la localización y control de sectores de alta vulnerabilidad ante estos eventos. La detección programada integra a los Observadores Terrestres Fijos, es decir, las torres de vigilancia que constituyen una estructura de metal o madera con una altura que bordea entre los 12 a 30 m, que sobrepasa los límites de la vegetación circundante con base a las condiciones del terreno. A su vez, se encuentra instalada una caseta con una vigía permanente para permitir un monitoreo y control con la finalidad de evitar el desarrollo de riesgos de origen natural o antrópicos.

Se plantea la instalación de 26 torres de vigilancia ubicadas con las características anteriormente mencionadas en sitios adecuados que contemplen un radio de visibilidad sin alteraciones atmosféricas, características topográficas, ambientales y cobertura vegetal, como se visualiza en la Tabla 38. Estos parámetros fueron tomados en cuenta mediante el Geoprocetamiento en el software ArcGIS en su versión 10.8 con la herramienta *Viewshed*. Como menciona el CONAF (2008) el aumento de controles y fiscalizaciones, provocan a la disminución del sobreuso potencial del fuego como parte de las actividades agrícolas como método de limpieza, por otra parte, subsisten un pequeño grupo de propietarios que continúan con su uso inadecuado. En la Figura 28 y Tabla 39, se detalla el proceso a implementar la estrategia.

Tabla 38. Área visible y coordenadas de las torres de vigilancia proyección WGS84 UTM 17S

Nombre	Altura de la torre	Coordenada Y UTM	Coordenada X UTM	Altitud (m.s.n.m.)
Torre A	60	711643	10035091	300
Torre B	60	793161	10055437	3691
Torre C	60	798598	10042578	3661
Torre D	60	768697	10034524	1803
Torre E	60	770658	10043531	2494
Torre F	60	787486	10035001	3391
Torre G	60	760710	10026796	1470
Torre H	60	787367	10063070	3232
Torre I	60	782670	10058281	3440
Torre J	60	744898	10037637	2597
Torre K	60	770711	10049775	2535
Torre L	60	752375	10033106	2065
Torre M	60	778543	10044378	2243
Torre N	60	776519	10035223	2415
Torre O	60	783821	10039417	2696
Torre P	60	783821	10039417	2696
Torre Q	60	804998	10041753	2493
Torre R	60	800622	10037752	3095
Torre S	60	797050	10050022	3973
Torre T	60	760976	10037638	2706
Torre U	60	800558	10031976	2634
Torre V	60	789882	10044795	2505
Torre W	60	793220	10037218	4030
Torre X	60	784951	10051108	3085
Torre Y	60	734155	10033679	1756
Torre Z	60	744627	10031446	1641

Tabla 39. Programa de implementación de torres de vigilancia

Estrategia	Proyecto	Actividades	Indicadores	Medios de verificación	Alcance	Responsable
Programa de implementación de torres de vigilancia	Proyecto de planificación y unidad contra incendios para el fortalecimiento ante riesgos naturales y antrópicos	Determinar puntos eficientes para la instalación de torres de control.	Planos arquitectónicos, área de operación totalmente limpias, libres de cobertura vegetal o desechos	Mapas bases y de ubicación	Monitorear el 65% (1 179.8 km ²) del territorio cantonal para el control a incendios de cobertura vegetal por medio de las torres de vigilancia.	Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Ana de Cotacachi Gobiernos parroquiales Cuerpos de Bomberos Comunidades aledañas
		Limpieza de espacios para la infraestructura y senderos.		Fotografías de lugares antes y después de la limpieza, planos arquitectónicos, materiales y desarrollo de la construcción		
		Construcción de infraestructura (torres de control) y equipamiento.	Número de establecimientos de torres de control	Lista de verificadores de trabajadores y voluntarios		
		Monitoreo y vigilancia permanente en zonas susceptibles a incendios.	Verificadores de asistencia del personal encargado			
		Mantenimiento de instalaciones, equipos y senderos.	Número de equipos reparados y nuevos			

Estrategia 3. Apertura de brechas y franjas cortafuegos

Objetivo general:

Implementar nueve brechas y franjas cortafuegos en sectores con alta y extrema susceptibilidad a incendios en el cantón Cotacachi.

Alcance:

Prevenir la pérdida de cobertura vegetal en zonas susceptibles a incendios correspondiente al 47.56 % (861.66 km²) en el cantón Cotacachi.

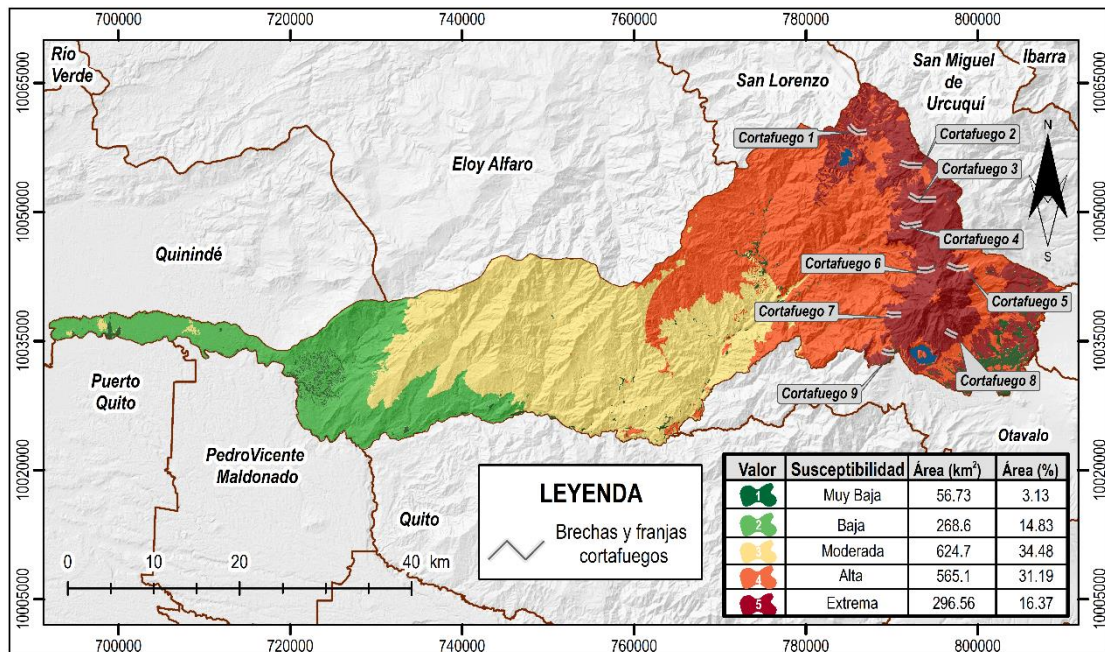


Figura 29. Ubicación de apertura de brechas y franjas cortafuegos

Justificación:

El uso del fuego se encuentra fuertemente relacionados a diversas actividades antropogénicas, mismas que resultan imposibles prohibirlas, por lo tanto, es fundamental desarrollar técnicas de prevención y mitigación que eviten propagar al

fuego de una forma acelerada y descontrolada (Moscovich et al., 2009). Este tipo de metodologías tienen la capacidad de reducir las características de los combustibles mediante la eliminación de la vegetación muerta. Por lo tanto, es importante considerar la creación de brechas y franjas cortafuegos en zonas susceptibles a incendios y en áreas especiales para la conservación. Se debe priorizar, si la ubicación es perpendicular a la dirección del viento con el propósito de evitar la propagación de incendios en zonas con mayor susceptibilidad alta y externa en el cantón Cotacachi. En la Tabla 41, se detalla el proceso a implementar la estrategia.

Tabla 40. Ubicación de brechas y franjas cortafuegos proyección WGS84 UTM 17S

Nº	Coordenada Y UTM	Coordenada X UTM	Parroquia
1	10059200	786054	Imantag
2	10055500	791965	Imantag
3	10051500	793455	Imantag
4	10048500	792404	Apuela
5	10043400	797530	Imantag
6	10043200	793909	Apuela
7	10038100	790456	Plaza Gutiérrez
8	10035900	796928	Cotacachi
9	10033700	789204	Quiroga

Tabla 41. Programa de implementación de brechas y franjas cortafuegos

Estrategia	Proyecto	Actividades	Indicadores	Medios de verificación	Alcance	Responsable
Programa de implementación de brechas y franjas cortafuegos	Proyecto de aislamiento, reducción y extinción de incendios	Identificación de áreas estratégicas para la implementación de brechas y franjas cortafuegos.	Ubicación de áreas seleccionadas	Mapa base y de ubicación, registro fotográfico, lista de participantes.	Prevenir la pérdida de cobertura vegetal en zonas susceptibles a incendios correspondiente al 47.56 % (861.66 km ²) en el cantón Cotacachi.	Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Ana de Cotacachi
		Construcción de brechas y franjas cortafuegos.	Número y área de franjas y brechas construidas	Registro fotográfico, lista de participantes, materiales de construcción,		Representantes comuneros y pobladores
		Mantenimiento y seguimiento ante posibles acumulaciones de material combustible en las franjas y brechas cortafuegos.	Limpieza de franjas y brechas	limpieza, facturas, informes, maquinaria pesada		Cuerpo de bomberos

Estrategia 4. Brigadas comunitarias.

Objetivo general:

Capacitar a grupos de interés con protocolos para la acción inmediata contra incendios en zonas de alta y extrema susceptibilidad en el cantón de Cotacachi.

Alcance:

Concientizar a las brigadas comunitarias para el control de las quemas agrícolas y actividades que ocasionen incendios de cobertura vegetal en un 100% del cantón Cotacachi.

Justificación:

La participación comunitaria involucra totalmente a la población de una comunidad que aborda objetivos para la solución de problemáticas; categorizándose por fases como: la identificación, priorización, toma de decisiones, gestión de recursos, desarrollo, monitoreo y evaluación de proyectos (Molina, 2000). Es decir, se implementará brigadas comunitarias que incluyan a poblados cercanos, grupos ecologistas, Cuerpo de bomberos, Policía Nacional y entre otros. Con el fin de salvaguardar la seguridad y protección de los recursos naturales, al mitigar y exterminar el incendio en zonas susceptibles. Además, esta acción se circunscribe con los SAT y torres de vigilancia al ser acciones inmediatas o repuestas oportunas, en caso de eventos como incendios de cobertura vegetal con una mayor priorización en la época de estiaje, debido su relación con la ocurrencia a incendios favorecidas por las condiciones climáticas, como se evidencia en las Figuras 11 y 12. En la Tabla 42, se detalla el proceso a implementar la estrategia.

Tabla 42. Programa de formación y cooperación de brigadas comunitarias

Estrategia	Proyecto	Actividades	Indicadores	Medios de verificación	Alcance	Responsable
Programa de formación y cooperación de brigadas comunitarias	Proyecto de acondicionamiento para brigadistas de prevención y control a incendios	<p>Capacitar a grupos de interés como comuneros, instituciones educativas, agricultores mediante charlas y talleres teórico-practico que aborde temas sobre las causas, efectos, prevención y control de incendios.</p> <p>Organizar brigadas comunitarias en relación con su ubicación geográfica, equipos y experiencia ante incendios. Evaluación y seguimiento del conocimiento brindado por medio de simulacros controlados por el Cuerpo de Bomberos en las comunidades.</p>	<p>Número de participantes</p> <p>Número de brigadas comunitarias</p> <p>Implementos de seguridad y equipos de seguridad entregados</p> <p>Evaluación y calificación de las brigadas comunitarias</p>	<p>Lista de asistencia, registro fotográfico, material didáctico, carteles, marcadores, proyector y parlantes, facturas, permisos legales.</p>	<p>Concientizar a las brigadas comunitarias para el control de las quemadas agrícolas y actividades que ocasionen incendios de cobertura vegetal en un 100% del cantón Cotacachi.</p>	<p>Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Ana de Cotacachi</p> <p>Gobiernos parroquiales</p> <p>Cuerpos de Bomberos</p> <p>Comunidades aledañas</p> <p>Centros educativos</p>

Estrategia 5. Educación ambiental

Objetivo general:

Implementar programas de educación ambiental liderado por estudiantes de la carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables de la Universidad Técnica de Norte en zonas de alta y extrema susceptibilidad a incendios en el cantón Cotacachi.

Alcance:

Capacitar en un 100% a los grupos prioritarios por parte de la academia universitaria para la gestión de riesgo a incendios en el cantón Cotacachi.

Justificación:

El fuego forma parte de la dinámica de los ecosistemas, no obstante, el inadecuado sobreesfuerzo y el descontrol de este factor en zonas urbanas y rurales ha catalogado a gran parte del territorio con mayor énfasis en la cobertura vegetal, conocidos como sectores de alta y extrema vulnerabilidad a incendios. Se conoce que, la población presenta un déficit en los protocolos para el manejo del fuego y sus efectos, se plantea generar un plan de educación ambiental como parte de prácticas preprofesionales, mismas que se implementarán mediante la asistencia de estudiantes de la carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables de la Universidad Técnica del Norte para concientizar y socializar a poblados, agricultores, turistas y centros educativos al ser considerados como grupos prioritarios. En la Tabla 43, se detalla el proceso a implementar la estrategia.

Tabla 43. Programa de educación ambiental

Estrategia	Proyecto	Actividades	Indicadores	Medios de verificación	Alcance	Responsable
Programa de educación ambiental	Proyecto de investigación y mejoramiento del conocimiento sobre la gestión de los recursos naturales	Capacitación a campesinos, agricultores y comunidades de la zona Andina y Tropical del contenido científico de la investigación. Obras de teatro con títeres, juegos en centros educativos y comunidades ubicadas zonas de alta y extrema susceptibilidad a incendios. Acompañamiento y seguimiento de los programas a los grupos de interés por medio de evaluación de aprendizajes.	Número de personas capacitadas Número de centros educativos capacitados Número de personas capacitadas Material entregado, difusión de contenido por páginas web y redes sociales	Invitaciones a las comunidades y grupos de interés, lista de asistentes, registro fotográfico, video, facturas, material entregado	Capacitar en un 100% a los grupos prioritarios por parte de la academia universitaria para la gestión de riesgo a incendios en el cantón Cotacachi.	Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Ana de Cotacachi Gobierno parroquial Comunidades, agricultores y poblados Estudiantes de la Universidad Técnica del Norte y asociaciones Cuerpo de Bomberos

Estrategia 6. Monitoreo mediante drones

Objetivo general:

Monitoreo y extinción de incendios mediante la aplicación de drones apagafuegos a una cobertura de 15-20 km² ubicadas en las torres de control para el cantón Cotacachi.

Alcance:

Monitorear el 100% de áreas susceptibles a incendios semanalmente en época seca y mensual en época lluviosa en el cantón Cotacachi.

Justificación:

Según la Comisión Nacional Forestal (2005) la naturaleza de los incendios se cataloga como accidentales, negligencias, intencionales y naturales, no obstante, la magnitud aumenta debido a los factores ambientales presentes. El uso de innovaciones tecnológicas como drones para la detección de focos de incendios tienen un costo bajo en comparación a otras plataformas satelitales (Vanko et al., 2017). Se implementará drones para el monitoreo de la biomasa presente en zonas de alta vulnerabilidad para la localización de altas masas piloteados desde las torres de vigilancia, seguidamente brigadas comunitarias controlarán este material de combustibilidad para evitar el riesgo a incendios. Además, durante la actividad de ignición y propagación los drones tienen la capacidad de volar muy cerca al evento con la finalidad de identificar daños al ambiente, vidas humanas o infraestructura para su rápida actuación ante este evento. En la Tabla 44, se detalla el proceso a implementar la estrategia.

Tabla 44. Programa monitoreo mediante drones

Estrategia	Proyecto	Actividades	Indicadores	Medios de verificación	Alcance	Responsable
Programa monitoreo mediante drones	Proyecto de vigilancia mediante técnicas aéreas	Capacitación a los técnicos y jefes de bomberos sobre el uso de drones para la gestión de riesgos.	Número de personas capacitadas	Licencia del uso de drones, facturas, oficios, lista de asistentes, registro fotográfico, video.	Monitorear el 100% de áreas susceptibles a incendios semanalmente en época seca y mensual en época lluviosa en el cantón Cotacachi.	Técnicos y jefes de Cuerpos de Bomberos encargados Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Ana de Cotacachi

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Los modelos de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal en el cantón Cotacachi son influenciados por factores topográficos y meteorológicos. Los modelamientos obtenidos a través de PAJ y RF jerarquizan los factores de mayor ponderación y predominancia, en ambos casos son la cobertura vegetal como un combustible y el uso del suelo que favorecen a la etapa de ignición, mientras que la evapotranspiración potencial condiciona a la humedad del medio y la fisiología de la vegetación. Por otra parte, la falta de pluviosidad y las altas temperaturas promueven al proceso de propagación vinculada con la velocidad del viento.
- El cantón Cotacachi presenta un 34.48% (624.7 km²) de susceptibilidad moderada al fuego, alta con 31.19% (565.1 km²) y extrema con 16.37% (296.56 km²) que corresponden a las coberturas vegetales clasificadas de bosque nativo, páramo, vegetación arbustiva y herbácea. Además, áreas como bosques nativos, páramo y cultivos fueron identificados como zonas prioritarias que influyen a la generación y propagación de incendios, es decir, los modelos de susceptibilidad a incendios se relacionan con el peligro histórico de incendios.
- Las estrategias propuestas en este estudio con base a la determinación de áreas susceptibles a incendios en sectores con alta y extrema susceptibilidad dentro del cantón Cotacachi se encuentran asociadas a un Sistema de Alerta Temprana el cual solucionará problemas a corto plazo (prevención), mediano plazo (recuperación) y a largo plazo (mitigación) mediante la participación comunitaria y de autoridades locales para garantizar el bienestar de la población y los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones.

5.2 Recomendaciones

- Replicar la metodología PAJ y RF utilizada en la presente investigación para la gestión de riesgos a desastres de origen natural y antrópico, debido a que los modelos de susceptibilidad a incendios del presente estudio son fiables de acuerdo con la validez de sus pruebas estadísticas.
- Se recomienda a las autoridades competentes y entidades de control ambiental revisar y emplear la información de los modelos de zonificación de áreas susceptibles a incendios de esta investigación con el fin de aplicar las estrategias propuestas para la protección de la biodiversidad del cantón Cotacachi.
- Difusión de resultados de la investigación a los pobladores y comunidades del cantón Cotacachi con el objetivo de generar conciencia y fortalecer la participación comunitaria en temas de protección y educación ambiental.
- Se recomienda tener en cuenta la zonificación de incendios de la presente investigación como una de las principales amenazas de pérdida de biodiversidad en su Plan de Ordenamiento Territorial.
- Para futuros trabajos deberán agrupar más factores climáticos y el comportamiento de las actividades humanas y urbanismo que se vinculen en la ocurrencia a incendios. Además, la integración de enfoques matemáticos como redes neurales y la máxima entropía servirán para entender el comportamiento de los eventos históricos para modelos de predicción relacionados a los fenómenos de origen natural y antrópico.

REFERENCIAS

- Abedi, G.H., Feizizadeh, B.M. & Blaschke, T.L. (2019). GIS-based forest fire risk mapping using the analytical network process and fuzzy logic. *Journal of Environmental Planning and Management*, 1-19. doi:10.1080/09640568.2019.1594726
- Aché, N., Alvarez, S. & Kitajima, K. (2008). "Susceptibility of Tree Seedlings to Biotic and Abiotic Hazards in the Understory of a Moist Tropical Forest in Panama". *Biotropica*, 41(1), 47-56.
- Adab, H., Kanniah, K. D., & Solaimani, K. (2012). Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Natural Hazards*, 65(3), 1723–1743. doi:10.1007/s11069-012-0450-8
- Adab, H., Kanniah, K., & Solaimani, K. (2011). GIS-based probability assessment of fire risk in grassland and forested landscapes of Golestan province, Iran. *Singapore: IACSIT Press*.
- Aguado, D., Cocero, D., Lana, N., Martínez, J., Martínez, X., Meza, E., Pérez, F., Riano, D., Riva, J...y Salas, J. (2004). Los incendios forestales en España, análisis de incidencia y casualidad. En E. Chuvieco (Ed), *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. (pp. 11-22). Madrid, España: CSIC.
- Aguirre, G., Aguirre, P. y Arias, P. (2018). Percepciones sobre el efecto de los incendios forestales en el turismo sustentable de la Reserva Ecológica Cotacachi Cayapa, Ecuador. *Sustentabilidades*, 9(18), 68-84.
- Alanís, E., Jiménez, J., Valdecantos, A., González, M., Aguirre, Ó., y Treviño-Garza, J. (2012). Composición y diversidad de la regeneración natural en comunidades de Pinus-Quercus sometidas a una alta recurrencia de incendios en el noreste de México. *Revista Mexicana de biodiversidad*, 83(4), 1208-1214
- Almorox, J. (2003). *Climatología aplicada el medio ambiente y agricultura*. Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
- Althuwaynee, O., Biswajeet, P., Hyuck-Jin, P. & Jung, H. (2014). A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical

- hierarchy process and multivariate statistical logistic regression for landslide susceptibility mapping. *Catena*, 114, 21-36. doi: 10.1016/j.catena.2013.10.011
- Alumiñas, J. y Galarza, J. (2016). Dirección estratégica y gestión de riesgo en la universidad. *Revista Cubana de Educación Superior*, 35(2), 83-92.
- Álvarez, Y. (2000). *Aplicación de tecnología SIG al Estudio del Riesgo y Prevención de Incendios Forestales en el área de Sierra Espuña-Gebas* [Universidad de Murcia España].
- Andrango Rodríguez, B.E. y Romero Cruz, K.G. (2021). *Cambio de Uso del Suelo en la Subcuenca del Rio Chillayacu (Un Enfoque a la Perdida de la Cobertura Vegetal)* [Universidad Técnica de Machala, Ecuador].
- Angulo, E., Rosales, O. y Herrera, F. (2020). Estrategias de gestión de riesgos de incendios en la reserva ecológica El Ángel: Un nuevo paradigma para la conservación de las cuencas hidrográficas a través de la reducción de la vulnerabilidad en las áreas protegidas. En P. Aguirre (Ed.), *Riesgos naturales en la cuenca del rio Mira. Variabilidad del clima, deslizamientos, incendios y vulneración volcánica* (pp. 73-85). Germany, Göttingen: Editorial CUVILLIER VERLAG.
https://books.google.com.ec/books?hl=en&lr=&id=i3gREAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT6&dq=related:IkbO1q2K6E8J:scholar.google.com/&ots=hn0Vpi6-J0&sig=lr1DMz4LE488loOhNakHj9UmUlk&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Anrango, S., Chingal, M. y Arias, P. (2020). Zonificación de cobertura vegetal propensa a incendios en el cantón Ibarra: Una mirada al centro poblado más grande de la cuenca del río Mira. En P. Aguirre (Ed.), *Riesgos naturales en la cuenca del rio Mira. Variabilidad del clima, deslizamientos, incendios y vulneración volcánica* (pp. 55-69). Germany, Göttingen: Editorial CUVILLIER VERLAG.
<https://books.google.com.ec/books?hl=en&lr=&id=i3gREAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT6&dq=related:IkbO1q2K6E8J:scholar.google.com/&ots=hn0Vpi6->

[J0&sig=lr1DMz4LE488loOhNakHj9UmUlk&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=en&lr=&id=i3gREAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT6&dq=related:IkbO1q2K6E8J:scholar.google.com/&ots=hn0Vpi6-J0&sig=lr1DMz4LE488loOhNakHj9UmUlk&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Argote, M. (2009). Comparación y evaluación de la distribución del estimador de la tasa global de fecundidad de Bolivia. *Papeles de Población*, 15(62), 201-222.

Arias Murcia, Y.K. (2016). *Zonificación de amenazas por incendios forestales en el sector rural del municipio de Tota Boyacá con el empleo de SIG*. [Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia].

Arias, P., Encarnación, G., Díaz, A. y Herrera, F. (2020). Zonificación de áreas propensas a incendios de cobertura vegetal en la subcuenca del río Mataquí ubicada en la Provincia Imbabura. En P. Aguirre (Ed.), *Riesgos naturales en la cuenca del río Mira. Variabilidad del clima, deslizamientos, incendios y vulneración volcánica* (pp. 39-51). Germany, Göttingen: Editorial CUVILLIER VERLAG.

https://books.google.com.ec/books?hl=en&lr=&id=i3gREAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT6&dq=related:IkbO1q2K6E8J:scholar.google.com/&ots=hn0Vpi6-J0&sig=lr1DMz4LE488loOhNakHj9UmUlk&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Armijo, M. (2009). *Manual de Planificación Estratégica e Indicadores de Desempeño en el Sector Público*. ILPES/CEPAL. [Archivo PDF].

Asamblea Nacional de la República del Ecuador. (12 de junio de 2019). *Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (RCOA)*, Registro Oficial N°577, 1-193. [Archivo PDF].

Asamblea Nacional de la República del Ecuador. (14 de marzo de 2016). *Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales*, Registro Oficial N°711 1-47. [Archivo PDF].

Asamblea Nacional de la República del Ecuador. (19 de octubre 2010). *Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)*, Registro Oficial N°303, 1-174. [Archivo PDF].

Asamblea Nacional de la República del Ecuador. (20 octubre de 2008). *Constitución de la República del Ecuador*, Registro Oficial N°449 [Archivo PDF].

- Asamblea Nacional de la Republica del Ecuador. (5 de julio de 2016). *Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo*, Registro Oficial N°790, 1-32. [Archivo PDF].
- Batista, A., Mangini, R., Pachaly, R., Soares, V. & Koproski, L. (2007). “Fire effects on reptiles and mammals in Ilha Grande National Park (PR/MS), Brazil”. *Forest Ecology and Management*, 23(9), 18-30.
- Bermúdez, A., Casado, R., García, M., Gómez, A., Quiles, F., Y Ruiz, J. (2007). Empleo de una red de sensores en el reajuste de modelos de comportamiento del fuego en incendios forestales. *Wildfire*.13-17.
- Bonham, G.F., 1994. Geographic Information Systems for Geoscientists, Modeling with GIS. *Pergamon Press*, 39.
- Bosnich, J. (2007). *Apuntes cátedra Control de Incendios Forestales*. [Universidad Austral de Chile, Chile].
- Brito Moncayo, G. (2016). *Sistema electrónico de alerta temprana de incendios forestales mediante procesamiento digital de imágenes para la empresa municipal del cuerpo de bomberos Ambato* [Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador].
- Burgueño, M., García, J., y González, J. (1995). Las curvas ROC en la evaluación de las pruebas diagnósticas. *MedClin (Barc)*, 104(17), 661-70.
- Butler, A., Sarlöv, I., Knez, I., Ångman, E., Ode, A. & Akerskog, A. (2018). Landscape identity, before and after a forest fire. *Landscape Research*, 43(6), 878-889. doi.10.1080/01426397.2017.1344205
- Capador, E., Gonzáles, G. y Suárez, P. (2021). Analysis of Land Cover in Forest Fires through Spectral Indexes: Studio Case Cerros Orientales, Bogotá, Colombia. *Avances Investigación En Ingeniería*, 18(1).
- Carrasco Rodríguez, Y. (2016). *Índice meteorológico de peligro de incendio forestal para la provincia Pinar del Río, Cuba* [Universidad de Pinar del Río, Cuba].
- Carrera, D., Guevara, P., Tamayo, L., Balarezo, C. y Rosa, D. (2016). Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona

- costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media. *Idesia (Arida)*, 34(3), 79-88. doi: 10.4067/S0718-34292016000300010
- Castillo M., Pedernera P. y Guillermo J. (2002). *Aplicaciones de los SIG en la lucha contra los incendios forestales*. [Archivo PDF].
- Celemín, J. (2014). El proceso analítico jerárquico en el marco de la evaluación multicriterio: Un análisis compartativo. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, (6), 47-63.
- Centros de Estudios Agrarios y Ambientales. (2013). *Re: Zonificación de ecosistemas* [Pág. Web]. <http://www.ceachile.cl/zonificacion.htm>
- Cerano, J., Villanueva, J., y Fulé, Z. (2010). Reconstrucción de incendios y su relación con el clima para la Reserva Cerro El Mohinora, Chihuahua. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 1(1), 63-74.
- Cerda, J. y Cifuentes, L. (2012). Uso de curvas ROC en investigación clínica: Aspectos teórico-prácticos. *Revista chilena de infectología*, 29(2), 138-141. doi: 10.4067/S0716-10182012000200003
- Césari, M. (2006). *Validación Estadística con Valor de Prueba Vtest, para el aprendizaje de Modelos Probabilísticos. 2.3. El procedimiento de descripción estadística. 20*. Mendoza, Argentina: ILICo.
- Chávez, A., y Moreano, R. (2013). Sistema de información para la interpolación de datos de temperatura y precipitación del Ecuador. *Revista Politécnica*, 32(1), 70-75.
- Chuvienco, E., Martín, M., Martínez, J., y Salas, F. (1998). Geografía e incendios forestales. *Serie Geográfica*, 7(7), 11-17.
- Coelho, F.E., Dos Santos, A.R., Fiedler, N.C., Ribeiro, G.A., Da Silva, A.G., Dos Santos, A.B. & Schettino, V.R. (2016). Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 173, 65-71. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.02.021
- Comisión Nacional Forestal. (2005). *Incendios forestales: Guía práctica para comunicadores*. [Archivo PDF].

- CONAF. (23 de mayo de 2008). *Re: Protección contra Incendios Forestales*. [Pág. Web].
- CONAF. (26 de diciembre de 2009). *Re: Estadísticas de Incendio*. [Pág. Web].
- Cook, B. I., Smerdon, J. E., Seager, R., & Coats, S. (2014). Global warming and 21st century drying. *Climate Dynamics*, 43(10), 2607-2627. doi: 10.1007/s00382-014-2075-y
- Corral, Y. (2009). Validez y confiabilidad de los instrumentos de investigación para la recolección de datos. *Revista ciencias de la educación*. 19(33), 228-247.
- D'Annunzio, R. (2012). Situaciones de los bosques recursos forestales análisis regional. En D. *Situación de los bosques del mundo* (pp. 2-29). Roma, Italia: FAO.
- Dagnino, J. (2014). La Distribución Normal. *Bioestadística y Epidemiología*, 43(2), 116-121. doi: 10.25237/revchilanstv43n02.08
- Dante, L., Martínez, P., Pulido, M., Lara, E. López, G. (2019). Instructivo de quemas prescritas. Chiapas, México. *Environmental Science* 183-190.
- De Andrade, C., Delgado, C., Barbosa, M., Teodoro, P., Da Silva, A., Wanderley, H., y Capristo, F. (2020). Régimen de incendios en el sur de Brasil impulsado por la variación atmosférica y la cobertura vegetal. *Meteorología Agrícola y Forestal*, 295, 108- 194
- De la Fuente, D. (2017). Capítulo III. Shuar Arutam: gobierno, territorio y bosque. En D. de la Fuente (Ed), *Gente, bosques e instituciones en el aprovechamiento forestal del Ecuador: caso centros y asociaciones shuar de la Cordillera del Cóndor y la cuenca del río Santiago*. (pp.65-82) Quito, Ecuador: FLACSO.
- Degioaani, A., de Prada, J., Cisneros, J. y Gutiérrez, A. (2017). *Re: Análisis multicriterio discreto: Un método facilitador para la toma de decisiones en el ordenamiento territorial* [Pág. Web]. <http://universidadverdad.uazuay.edu.ec/article/view/34/30>
- Díaz, I. y González, M. (2016). Análisis espacio-temporal de incendios forestales en la región del Maule, Chile. *Bosque*, 37(1), 147-158.

- Espinel, D. (2021). *Influencia de factores meteorológicos sobre la incidencia de los incendios forestales y el transporte de las emisiones hacia las ciudades andinas* [Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia].
- Estacio, J. y Narváez, N. (2012). Incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ): Conocimiento e intervención pública del riesgo. *Letras Verdes* 11, 27-52.
- Estrada, V. (12 de septiembre de 2019). Ochenta hectáreas afectadas tras incendio en el cerro de Cotacachi. *La Hora*.
- Fischer, M., Di Bella, C. y Jobbágy, G. (2007). Factores que controlan la distribución espacio temporal de los incendios en la región semiárido-argentina. *Ed. Martin*.
- Flores, G., Benavides, S., Valdez R., Vega, D. y Casillas Díaz. (2016). Descripción de variables para definición de riesgo de incendios forestales en México. *Investigaciones Altoandinas*, 20(6), 458-470.
- Fondo Mundial para la Reducción de los Desastres y la Recuperación, [GFDRR]. (2018). *Metodología para la construcción de agendas sectoriales para la reducción del riesgo de desastres en Ecuador*. [Archivo PDF].
- François, M., Reyes, J. y Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones geográficas*, (51), 53-72.
- García, M., Piñeros, A., Bernal, F., y Ardila, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (36), 60-64.
- Gasol, C. (2020). *Fortalecimiento de los sistemas de alerta temprana*. [Archivo PDF].
- Ghosh, S., Carranza, E. M., van Westen, C.J., Jetten, V.G. & Bhattacharya, D.N. (2011). Selecting and weighting spatial predictors for empirical modeling of landslide susceptibility in the Darjeeling Himalayas (India). *Geomorphology*, 131(1-2), 35-56. doi: 10.1016/j.geomorph.2011.04.019
- Gigović, L., Jakovljević, G., Sekulović, D. & Regodić, M. (2018). GIS multi-criteria analysis for identifying and mapping forest fire hazard: Nevesinje, Bosnia and Herzegovina. *Tehnički vjesnik*, 25(3), 891-897.

- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Ana de Cotacachi. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Cantón Cotacachi 2015 – 2035*. Actualización. [Archivo PDF].
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Ana de Cotacachi. (9 de septiembre de 2016). *Ordenanza para la Adscripción del Cuerpo de Bomberos y el Ejercicio de la Competencia de la Gestión de Riesgos, los Servicios de Prevención, Protección, Socorro y Extinción de Riesgos de Incendios en el Cantón Santa Ana de Cotacachi*, Ordenanza Municipal. [Archivo PDF].
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Ana de Cotacachi. (19 de mayo de 2017). *Ordenanza que Regula las Quemadas Agrícolas para la Prevención de Incendios Forestales en el Cantón Santa Ana de Cotacachi*, Ordenanza Municipal. [Archivo PDF].
- Gonzales, A., Franco, C., Vargas, F., y Armenteras, D. (2013). A new algorithm for mapping burned areas in Colombia. *Agronomía Colombiana*, 31 (2), 234-242.
- González, D. y Bosque, J. (2008) Generación de un mapa de vientos en un SIG. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*, 47, 51-77.
- Guamán, J., Guamán, E., Torres, H., Chamba, W. y Álvarez, F. (2020). Estudio de protocolos de enrutamiento utilizados en redes de sensores para la detección de incendios forestales 2020 XV, *Congreso Ibérico de Sistemas y Tecnologías de la Información* (CISTI). Sevilla, España. doi: 0.23919/cisti49556.2020.9140900
- Guil, F., Soria, Á., Margalida, A. & Pérez, G. (2018). Wildfires as collateral effects of wildlife electrocution: An economic approach to the situation in Spain in recent years. *Science of The Total Environment*, 625, 460-469.
- Gurrutxaga, M. & Lozano, P. (2008). Landscape ecology a framework for the integrated study of landscape dynamics and its incident in wildlife. *Geographical Studies*, doi: 10.3989/estgeogr.0427
- Gutiérrez, H., Lee, O., Corozo, B., Dimka, J., Eisenberg, N., Trostle, A. & Hardin, R. (2020). Perceptions of local vulnerability and the relative importance of climate change in rural Ecuador. *Human Ecology*, 48(4), 383-395.

- Hebel, M. (2019). *Impactos de incendios forestales en los procesos hidrológicos considerando la variable temporal y espacial de la cobertura vegetal* [Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile].
- Hernández, Q., Espinoza, F., Saldaña, R. y Rivera, C. (2011). Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de Veracruz, México. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(171), 215-221.
- Hervás, J., Barredo, J. y Lomoschitz, A. (2002). Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamiento mediante SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio, aplicación a la depresión de Tirajana (Gran Canaria). *Fundamento y Aplicaciones en España*, Instituto Geológico y Minero de España. *Instituto Geológico y Minero de España*. 169-180.
- Hoang, V.T., Chou, T.Y., Fang, Y.M., Nguyen, N.T., Nyguyen, Q.H., Xuan, C.P. & Meadows, M.E. (2020). Mapping forest fire risk and development of early warning system for NW Vietnam using AHP and MCA/GIS methods. *Applied Sciences*, 10(12), 43-48. doi: 10.3390 / app10124348
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2011). *Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000*. Bogotá, Colombia: Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (16 de mayo de 2018). *Documento Metodológico Estadísticas Variables Meteorológicas*, 1-112. [Archivo PDF].
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, IDIGER. (febrero de 2019). *Documento Técnico de Soporte Mapa de amenaza por incendios forestales escala 1:25.000*, Proyecto actualización de componente de gestión del riesgo para la revisión ordinaria y actualización del Plan de Ordenamiento Territorial. [Archivo PDF].
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador, INAMHI. (2002). *“Evidencias del cambio climático en Ecuador”*. [Archivo PDF].

- Jaafari, A., & Gholami, D. (2017). Wildfire hazard mapping using an ensemble method of frequency ratio with Shannon's entropy. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 25(2), 232- 243. doi: 10.22092/ijfpr.2017.111758
- Jácome, G., Mejía, J., Guerra, N., Romero, A., Piedmag, V., Padilla, C., Tanaí, I. y Pupiales, N. (2020). Los volcanes de Imbabura y su tiempo geológico. *FICAYA Emprende*, (13).
- Jahdi, R., Salis, M., Alcasena, F.J., Arabi, M., Arca, B. & Duce, P. (2020). Evaluating landscape-scale wildfire exposure in northwestern Iran, *Natural Hazards*. doi: 10.1007 / s11069-020-03901-4
- Jiménez, A. M., Urrego, E. L. & Toro, J. L. (2016). Evaluation of the fire behavior of the vegetation in northern Antioquia Colombia landscape analysis. *Colombia Forestal*, 19(2), 37-55.
- Johnston, K., Ver Hoef J., Krivoruchko, K. & Lucas N. (2001). Using ArcGIS geostatistical analyst. *Esri Redlands*, 380.
- Karra Kontgis, Seager, R., & Coats, S. (2021). Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning. IGARSS 2021-2021 IEEE. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE
- Keane, E., Drury, S., Karau, E., Hessburg, P. & Reynolds, K. (2010). A method for mapping fire hazard and risk across multiple scales and its application in fire management. *Ecological Modelling* 221(2– 18).
- Khan, H., Shafique, M., Khan, M., Bacha, M., Shah, S. & Calligaris, C. (2019). Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(1), 11-24. doi: 0.1016/j.ejrs.2018.03.004
- Kitzberger, T., Falk, A., Westerling, L. & Swetnam, T. W. (2017). Direct and indirect climate controls predict heterogeneous early-mid 21st century wildfire burned area across western and boreal North America. *PloSone*, 12(12), e0188486
- Landis, J. & Koch, G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometric*, 33(1), 159-174.

- Lee, S., & Talib, J.A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47, 982-990. doi: 10.1007/s00254-005-1228-z
- Leyva, J. C. (2011). *Análisis multicriterio para la toma de decisiones métodos y aplicaciones*. San Rafael, México: Plaza y Valdés, S.A. de C.V.
- Littell, J. S., Peterson, D. L., Riley, K. L., Liu, Y., & Luce, C. H. (2016). A review of the relationships between drought and forest fire in the United States. *Global Change Biology*, 22(7), 2353-2369. doi: 10.1111/gcb.13275
- Lloret, F. (2004). Régimen de incendios y regeneración. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, 101-126.
- López, J. y Almuñías, J. (2015). La gestión de los riesgos de planificación estratégica en las instituciones de educación superior. *Revista Cubana de Educación Superior*, 34(2), 45-53.
- López, S., Jung, J. & López, M. (2017). A hybrid-epistemological approach to climate change research: Linking scientific and smallholder knowledge systems in the Ecuadorian Andes. *Anthropocene*, 17, 30-45.
- Lozano, R. J. (2011). *Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgo a incendios de cobertura vegetal*. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Martínez, R., Tuya, L., Martínez, M., Pérez, A. y Cánovas, A. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman Caracterización. *Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2), 1-20.
- Mayer, D. & Mayordomo, D. (1993). Statistical validation. *Ecological Modelling*, 68 (1,2), 21-32. doi:10.1016/0304-3800(93)90105-2
- McHugh, M. (2013). The Chi-square test of independence. *Biochemia Medica*, 23(2), doi: 143-149.10.11613/BM.2013.018
- Mendivelso, F. y Rodríguez, M. (2018). Prueba chi-cuadrado de Independencia Aplicada a Tablas 2xN. *Revista Médica Sanitas*, 21 (2), 92-95. doi: 10.26852/01234250.6

- Mérida, R. (2020). Causas que inciden en la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Caracas (1983-2003). *Revista Forestal Venezolana*, 49(1). 33- 38.
- Mielnicki, D., Canziani, P. y Drummond, J. (2005). *Quema de biomasa en el centrosur de Sudamérica: incendios locales, impactos regionales*. Buenos Aires, Argentina: CONICET.
- Molen, K. V. (2011). Percepciones de cambio climático y estrategias de adaptación en las comunidades agrícolas de Cotacachi. *Ecuador Debate*, 82(6), 33-44.
- Molina, Y. (2000). Planificación Participativa para Proyectos de Manejo de Cuencas al Nivel Local. [Archivo PDF].
- Monjarás, N. A., Briones, C. I., Vega, D. J., Calleros, E., Corral, J. J., López, P. M., Pompa, M., Rodríguez, D. A., Carrillo, A., González, A., Alvarado, E. & Jolly, W.M. (2020). Prediction of the core density of forest fires at multiple scales with geographically weighted regression in Mexico. *Science of The Total Environment*, 718, 1-14. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137313
- Moreno, J.M. (2005). Riesgos de Origen Climático: Impactos sobre los Incendios Forestales. En J.M. Moreno (Ed.), *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por el Efecto del Cambio Climático* (581-615). Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente.
- Moscovich, F. Ivandic, F. y Besold, L. (2009). *Manual de combate a incendios forestales y manejo de fuego*. Madrid, España. Ediciones INTA.
- Moya, D.L., Fonturbel, M.T., Borja, L.B., Peña, M.E., Sánchez, A.R., Plaza, P.A...De las Heras, J.P. (2021). Burning season and vegetation coverage influenced the community-level physiological profile of Mediterranean mixed-mesogean pine forest soils. *Journal of Environmental Management*, 277, 111-405. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111405
- Muñoz, F., Robles, C. y Santana, A. R. (2018). Puntos de calor en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí: patrones espaciales y factores asociados. *Madera y Bosque*, 24(1), 1-32.
- Naderpour, M., Rizeei, M., & Ramezani, F. (2021). Forest fire risk prediction: a spatial deep neural network-based framework. *Remote Sensing*, 13(13), 2513.

- National Wildfire Coordinating. 2005. *Manual para la Determinación del Origen y la Causa del Incendio Forestal*. [Archivo PDF].
- Nikhil, S., Danumah, H., Saha, S., Prasad, K., Rajaneesh, A., Mammen, C., ... & Kuriakose, L. (2021). Application of GIS and AHP Method in Forest Fire Risk Zone Mapping: A Study of the Parambikulam Tiger Reserve, Kerala, India. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 5(1), 1-14. doi.org/10.1007/s41651-021-00082-x
- Organización de las Naciones Unidas (1992). *Convenio Sobre la Diversidad Biológica*. [Archivo PDF]. <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2004). *Consulta de Expertos de la FAO sobre la Inocuidad de los Alimentos: Ciencia y Ética*. Italia, Roma: Grupo de la producción y diseño editorial Servicio de Gestión de las Publicaciones.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. *Principales Resultados*, doi: 10.4060/ca8753es
- Organización de Naciones Unidad (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*.
- Orlando, Villacreses, A. L. (2020). *Zonificación de la susceptibilidad a incendios forestales en el recinto Las Mercedes, comuna Sancán, cantón Jipijapa, Ecuador* [Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador].
- Orozco, M. E., Mireles, P., Valdez, M. E., y Peña, V. (2011). Incendios forestales y degradación de los ecosistemas terrestres: Impactos locales y emisiones globales. *Revista Geográfica de América Central*, 1-21.
- Osorio, J. y Orejuela, J. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. ejemplo de Aplicación. *Scientia Et Technica*, 14(39), 247-252.
- Parra, Á., Bernal, T. y Francia, H. (2010). *Incendios de cobertura vegetal y biodiversidad: una mirada a los impactos y efectos ecológicos potenciales sobre la diversidad vegetal*. [Archivo PDF].

- Parra, Á., Pascual, D., H., Gonzáles, F., Morales, M., Pabón, J. y Páramo, G. (2011). *Incendios de la cobertura vegetal en Colombia*. Valle del Cauca, Colombia.
- Pazmiño, D. (2020). Diferencias en el clima que produce incendios forestales y olas de calor en Victoria, Australia. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*. 1(1), 26-39.
- Penniman, L. (2018). *Farming while black: Soul fire farm's practical guide to liberation on the land*. Chelsea Green Publishing. [Archivo PDF].
- Pérez, G., Márquez, M., Cortés, A. y Salmerón, M. (2013). Análisis espaciotemporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 19(2), 37-58.
- Pérez, M.D. (2016). *Dirección técnica en extinción de incendios forestales*. Málaga, España: ICB Interconsulting Bureau S.L.
- Pizarro, R., González, P., Witterssheim, M., Saavedra, J. y Soto, C. (1993). Elementos técnicos de hidrología III. *Proyecto regional mayor sobre uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América Latina y el Caribe*. Talca, Chile, Universidad de Talca.
- Pompa, M., Camarero, J., Rodríguez, D. y Vega, D. (2017). Drought and spatiotemporal variability of forest fires across Mexico. *Chinese Geographical Science*, 28(1), 25-37. doi: 10.1007/s11769-017-0928-0
- Ponce, H. (2007). La matriz foda: alternativa de diagnóstico y determinación de estrategias de intervención en diversas organizaciones. *Enseñanza e Investigación en Psicología*, 12(1), 113-130.
- Prudente, T. (2010). *Geotecnologias aplicadas ao mapeamento de risco de incêndio florestal no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros e área de entorno* [Universidad Federal de Uberlândia, Uberlândia].
- Quesada, L. (12 de octubre 2019). *Re: ¿Qué son los Sistemas de Información Geográfica (SIG)?* [Página Web].
- Quevedo, F. (2011). Distribución normal. *Medwave*, (5), 1-5. doi: 10.5867/medwave.2011.05.5033

- Ramírez, D., Aponte, H., Lertora, G. y Gil, f. (2018). Incendios en el humedal Ramsar Los Pantanos de Villa (Lima-Perú): Avances en su conocimiento y perspectivas futuras. *Investigaciones Altoandinas*, 20(3), 347-360.
- Ricci, X. V. (2021). *Creación de un modelo de predicción de riesgos de incendios forestales usando una red neuronal convolucional sobre datos históricos de meteorología de California* [Universidad Oberta de Cataluña, España].
- Rodríguez, G., Gonzáles, G., Cabrera, R., Sánchez, C. y Hernández, E. (2014). Effect of the recurrence of forest fires on tree diversity. *Forest Sciences* 5(24) 3-7.
- Rodríguez, M., Jiménez, A., Peña, D. & De La Riva, J. (2018). A comprehensive spatialtemporal analysis of driving factors of human-caused wildfires in Spain using Geographically Weighted Logistic Regression. *Journal of environmental management*, 225, 177-192.
- Rosero Chamorro, E.R. (2021). *Estudio Multitemporal de Uso del Suelo y Cobertura Vegetal de la Subcuenca del Río Ambi, Provincia Imbabura, Ecuador* [Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador].
- Ruiz, L.V. y Blanco, J.L. (2004). Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en áreas forestales de México, un estudio en el volcán de la Malinche. *Centro de Ciencias de la Atmósfera e Instituto de Geografía*, 63-70.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: Ed. McGraw-Hill
- Sánchez, Acero. F. A. (2020). Prueba Chicuadrado. *Konrad Lorenz* 7(27), 123-150.
- Santacruz, E. y Palacio, V. (2018). Incendios forestales y cultivos ilícitos en México, una aproximación a la problemática. *Scielo Analytiscs* 71(2), 185-198.
- Sarli, R., Gonzáles, S. y Ayres, N. (2015). Análisis FODA, Una herramienta necesaria. *Facultad de Odontología. UNCuyo*, 9(1), 17-20.
- Secretaría de Gestión de Riesgo. (2014). *Agenda Sectorial de Gestión de Riesgo*. Quito, Ecuador: *EL TELEGRÁFO*.
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (2021). *Plan de Creación de Oportunidades 2021- 2025*. Quito, Ecuador. [Archivo PDF].
- Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (2020). *Etapas de incendios forestales: Informe de situación No. 30, 29/12/2020*. [Archivo PDF].

- Suárez, J. (2009). *Zonificación de susceptibilidad, amenaza y riesgo. Deslizamientos: análisis geotécnico*. Colombia: Editorial Universidad Industrial de Santander.
- Suryabhadgavan, K.V., Alemu, M.D. & Balakarishnan, M.E. (2016). GIS-based multi-criteria decision analysis for forest fire susceptibility mapping: a case study in Haremma forest, Southwestern Ethiopia. *Tropical Ecology*, 57(1), 33–43.
- Tadesse, L., Suryabhadgavan, K., Sridhar, G. & Legesse, G. (2017). Land use and land cover changes and Soil erosion in Yezat Watershed, Northwestern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(2), 85–94.
- Tebbutt, C., Devisscher., T, Obando., L, Gutiérrez., Meza, C., Armenteras, D. & Oliveras, I. (2021). Participatory mapping reveals socioeconomic drivers of forest fires in protected areas of the post-conflict Colombian Amazon. *People and Nature*, 3(4), 811-826. doi: 10.1002/pan3.10222
- Thornthwaite, C. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94. doi:10.2307/210739
- Thornthwaite, C. y Mather, R. (1995). The water balance: *Publications in climatology, laboratory of climatology*. [Archivo PDF].
- Triola, M. (2009). Distribuciones de probabilidad discreta. En M. Triola, *Estadística* (pp. 197-243). México, México: PEARSON Educación.
- Unión Europea. (2008). *Convenio sobre la diversidad biológica, Aplicación de la Unión Europea*. [Archivo PDF].
- Ustin, S. L., Riaño, D., Koltunov, A., Roberts, D.A. & Dennison, P. E. (2009). Mapping Fire Risk in Mediterranean Ecosystems of California: Vegetation type, Density, Invasive Species, and Fire Frequency. En E. Chuvieco (Ed.), *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems* (41-53). Springer, Berlín, Heidelberg.
- Vadrevu, K., Eaturu, A., Badarinath, K. S. (2010). Fire risk evaluation using multicriteria analysis-a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166(1–4), 223–239.
- Valle, A. (2017). *Opened Access Curvas ROC (Receiver-Operating-Characteristic) y sus Aplicaciones*. [Universidad de Sevilla, Sevilla, España].

- VanderMolen, K. (2011). Percepciones de cambio climático y estrategias de adaptación en las comunidades agrícolas de Cotacachi (Debate Agrario-Rural). *Ecuador Debate*. 145-157.
- Vanko, J., Sousa, J. J., Adão, T., Pádua, L., Morais, R., Hruška, J., & Peres, E. (2017). UAS, sensors, and data processing in agroforestry: a review towards practical applications. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 1– 43. doi: 0.1080/01431161.2017.1297548
- Vargas., D. y Campos, C. (2018). Modelo de vulnerabilidad ante incendios forestales para el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 10(2), 435-446.
- Vázquez de la Cueva, A. (2016). *Incendios forestales en la España peninsular (1974-2010): análisis temporal y especial desde una perspectiva ecológica*. Madrid, España: INIA - Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- Vázquez, A. y Rodríguez, M. (2008). Dinámica de paisajes forestales en relación con la incidencia del fuego en España peninsular: 1987-2000. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 7(2), 143-154.
- Vélez, R. (2000). Las quemas incontroladas como causa de incendios forestales. *Forestry Sciences* 15(4), 13-26.
- Yago, M., Zúñiga, M. & Rodríguez, M. (2019). Modelling temporal variation of fire-occurrence towards the dynamic prediction of human wildfire ignition danger in northeast Spain. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 385-411.
- Yilmaz, I. (2009). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslides (Tokat-Turkey). *Computers & Geosciences*, 35(3), 1125-1138. doi: 10.1016/j.cageo.2008.08.007
- Zamora, G. (13 de octubre de 2020). El incendio en la Reserva Cotacachi Cayapas destruyó 300 hectáreas. [Archivo PDF].

Zúñiga, J., Cisneros, D., & Pompa, M. (2017). Drought regulates the burned forest areas in Mexico: the case of 2011, a record year. *Geocarto International*, 1-31.
doi: 10.1080/10106049.2017.1415986

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de datos de precipitación faltantes

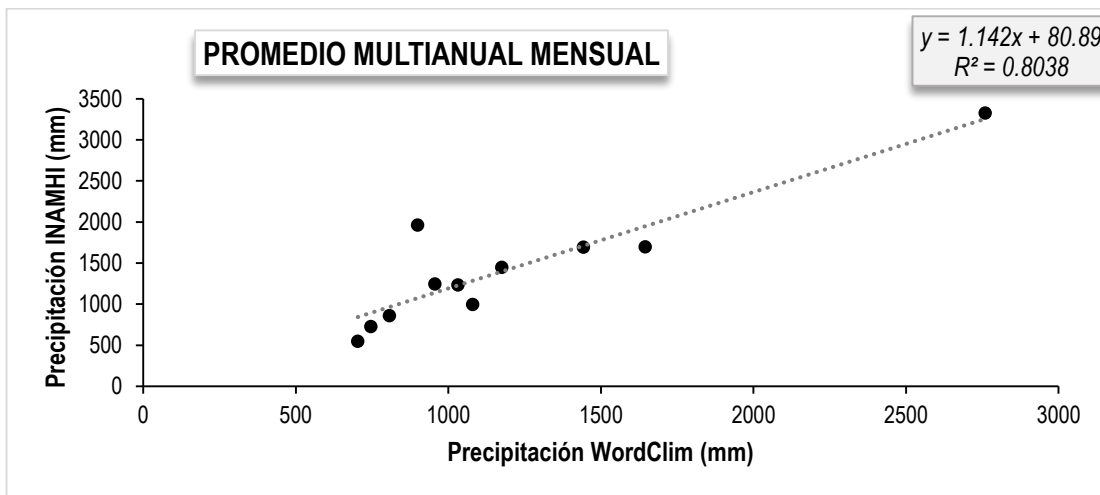
Código	Estación	N.º datos faltantes
M0001	Inguincho	1
M0025	La Concordia	2
M0103	San Gabriel	1
M0105	Otavalo	2
M0308	Tufinno	7
M0312	Pablo Arenas	3
M0315	Pimampiro	8
M0325	García Moreno	15
M0326	Selva Alegre	13
M0337	San José de Minas	7
TOTAL		59

Anexo 2. Tabla de correlación lineal de datos de precipitación, para el relleno de información faltante

Estación	Año	R^2	
M0001	1994	0.7485	
M0025	1988	0.8454	
M0103	1986	0.7505	
M0105	1987	0.4429	
	1991	0.7303	
	1993	0.7404	
	1995	0.7298	
	1999	0.3891	
	M0308	2000	0.6992
		2001	0.7453
2012		0.5138	
2015		0.3709	
1987		0.8594	
M0312	2007	0.8189	
	2009	0.8055	
	1999	0.5232	
	2000	0.8761	
M0315	2004	0.5155	
	2007	0.6687	
	2008	0.8563	
	2009	0.4352	

	2012	0.8054
	1995	0.8292
	2000	0.9667
	2001	0.9169
	2002	0.4993
M0325	2006	0.9211
	2007	0.9135
	2008	0.9338
	2010	0.9066
	2011	0.8812
	2012	0.8589
	1986	0.8014
	1987	0.6519
M0326	1992	0.9606
	2002	0.9027
	2008	0.9338
	2011	0.8812
	2015	0.5237
M0337	1992	0.8294
	1995	0.6427
	2001	0.8161
	2002	0.8189

Anexo 3. Gráfico de correlación lineal para validación de datos, precipitación



Anexo 4. Estaciones meteorológicas utilizadas para la temperatura media anual

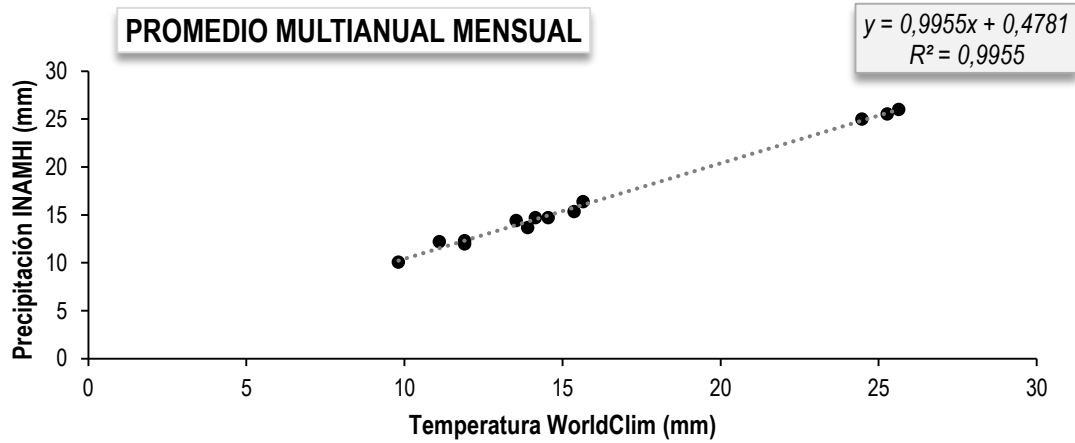
Código	Estación	Coordenada Y UTM	Coordenada X UTM	Altitud (m.s.n.m.)
M0001*	Inguincho	10028798	789103	3185
M0002*	La Tola	9974613	793126	2480
M0003*	Izobamba	9959896	772362	3058
M0004*	Rumipamba-Salcedo	9887374	767963	2628
M0009	La Victoria INERHI	9994652	796501	2200
M0021	Atuntaqui	10036241	809307	2200
M0023	Olmedo-Pichincha	10016386	828654	3120
M0024*	Quito INAMHI-INNAQUITO	9980700	779884	2812
M0025*	La Concordia	10002949	681248	360
M0086	San Vicente De Pusir	10054327	829118	1891
M0101	El Carmelo	10074994	876811	2856
M0102*	El Ángel	10069327	840293	3055
M0103*	San Gabriel	10066860	854156	2860
M0104	Mira-Fao Granja La Portada	10060845	830662	2270
M0105*	Otavalo	10026312	805039	2556
M0107*	Cahuasqui-FAO	10057329	810444	2335
M0153*	Muisne	10068570	609729	6
M0154*	Cayapas	10108571	724418	75
M0156	Quinindé (Conv. Madres Lauritas)	10034955	670405	120
M1094*	Tomalon-Tabacundo	10003689	807981	2790
M111	Malchingui INAMHI	10006147	796965	2840
M114	Tumbaco	9974183	787865	2348
M1199	Huaca Hacienda-UPEC	10067996	861490	2837
M1240	Ibarra	10036584	818168	2247
M1250	La Concepción	10066400	820962	1521

Nota: Todas las estaciones meteorológicas fueron empleadas para el relleno de datos. Por ende, la simbología siguiente: * es empleada para el desarrollo del Promedio Multianual Mensual debido al no superar el 30% de datos faltantes de las mismas.

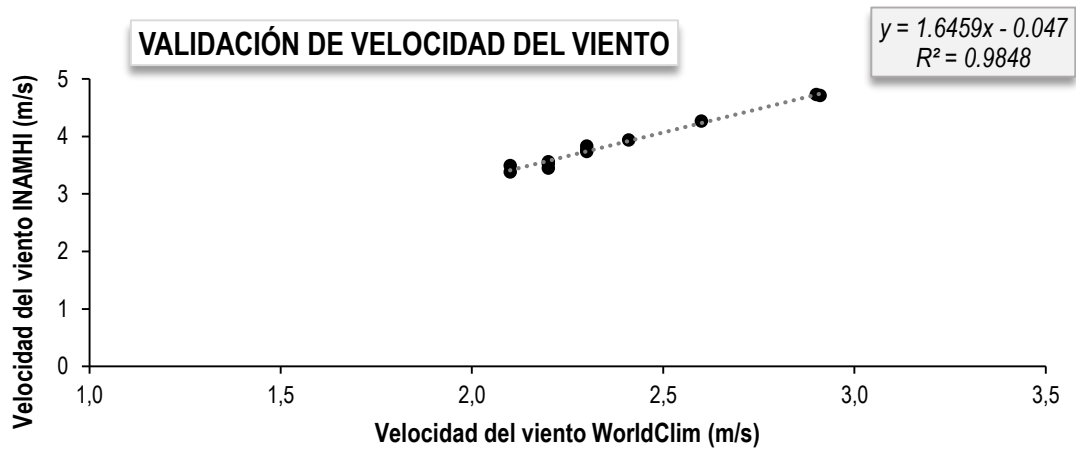
Anexo 5. Tabla de datos de temperatura faltantes

AÑO	M0001	M0002	M0003	M0004	M0009	M0021	M0023	M0024	M0025	M0086	M101	M102	M103	M104	M105	M107	M107	M153	M154	M156	M1094	M111	M114	M1199	M1240	M1250
1986	0	12	0	12	12	0	12	12	0	12	0	1	1	12	0	0	12	12	0	12	12	12	12	12	12	12
1987	0	12	0	12	12	0	12	12	0	12	0	3	0	12	1	0	12	6	0	12	6	12	12	12	12	12
1988	0	12	0	12	12	10	12	12	0	12	7	2	0	12	0	0	12	12	4	12	5	12	12	12	12	12
1989	0	12	0	12	12	12	12	12	0	12	12	3	0	12	0	0	12	7	12	12	12	12	12	12	12	12
1990	0	0	0	0	12	12	2	0	0	12	6	1	0	2	0	0	12	1	3	2	8	0	12	12	12	12
1991	0	0	0	0	12	12	0	0	0	12	1	0	0	0	1	1	0	0	12	0	12	0	12	12	12	12
1992	0	0	0	0	12	12	12	0	0	12	1	0	0	0	2	2	12	0	12	0	12	0	12	12	12	12
1993	0	0	0	0	12	12	12	0	0	12	0	0	0	1	0	0	0	10	12	1	12	0	12	12	12	12
1994	1	0	0	0	12	12	3	0	0	12	0	0	0	12	0	0	4	0	12	0	12	0	12	12	12	12
1995	0	0	0	0	12	12	1	1	0	12	1	0	0	12	2	1	1	0	12	0	3	0	12	12	12	12
1996	0	0	0	0	12	12	0	0	0	12	12	0	0	12	0	0	0	0	12	0	0	0	12	12	12	12
1997	0	0	0	0	12	12	0	0	0	12	12	1	0	12	0	0	2	1	12	0	0	0	12	12	12	12
1998	0	0	0	0	5	12	1	0	0	12	12	1	0	12	0	0	1	0	12	0	0	1	12	12	12	12
1999	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	1	0	12	0	0	1	12	12	12	12
2000	0	0	0	0	0	12	0	0	0	8	12	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	2	12	12	12	12
2001	0	0	0	0	1	12	1	0	0	8	12	0	0	7	0	12	0	2	12	0	0	12	12	12	12	12
2002	0	0	0	0	0	12	0	0	0	12	12	1	0	12	0	1	0	4	12	0	0	2	12	12	12	12
2003	0	0	0	0	0	12	6	1	0	12	12	1	0	12	0	1	0	0	12	0	1	12	12	12	12	12
2004	0	0	0	1	0	12	12	0	0	12	12	0	0	6	0	0	0	0	3	0	12	12	12	12	12	12
2005	0	0	0	0	0	12	10	0	0	7	12	0	0	0	12	4	0	3	0	0	0	12	12	12	12	12
2006	0	0	0	1	0	12	12	0	0	1	12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	12	12	12	12	12
2007	0	1	0	1	0	12	1	0	0	11	12	0	0	1	0	0	0	0	0	2	12	12	12	12	12	12
2008	0	0	0	1	0	12	1	0	0	3	12	12	0	3	0	0	0	7	9	3	12	11	12	12	12	12
2009	0	1	0	0	0	12	0	0	0	2	12	7	0	0	0	0	1	12	8	0	12	12	1	12	12	12
2010	0	0	0	1	0	12	12	1	0	3	12	4	0	0	0	0	2	1	6	0	12	12	0	12	12	12
2011	0	0	0	0	0	12	1	0	0	1	12	0	0	0	0	0	1	0	1	0	12	0	0	12	12	12
2012	0	0	0	0	0	12	1	0	0	1	12	0	0	0	0	0	8	0	2	0	12	12	0	8	11	11
2013	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	12	1	0	0	0	0	5	1	0	0	12	12	0	0	1	1
2014	0	12	0	12	12	12	1	12	0	0	12	0	0	0	0	0	1	4	1	12	12	12	0	0	2	2
2015	0	12	0	12	12	12	0	12	0	8	12	4	0	0	0	1	4	12	4	12	12	12	12	0	12	12
TOTAL	1	74	0	77	174	334	137	75	0	245	268	42	1	152	18	23	104	95	209	80	218	209	289	320	338	338

Anexo 6. Gráfico de correlación lineal para validación de datos, Temperatura



Anexo 7. Gráfico de correlación lineal para validación de datos, Velocidad del viento

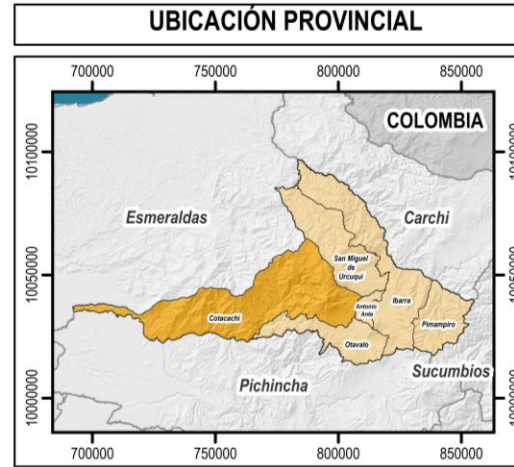


Anexo 8. Matriz de confusión para el índice Kappa

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Clase 6	Clase 7	Clase 8	Clasificación general	Precisión del usuario
Resultados del Clasificador	Clase 1	47	0	0	0	2	0	0	49	95.91%
	Clase 2	1	44	1	1	0	0	1	48	91.66%
	Clase 3	1	0	40	0	1	1	0	43	93.02%
	Clase 4	0	3	0	41	5	2	0	51	80.39%
	Clase 5	0	1	4	6	42	1	0	54	77.77%
	Clase 6	1	0	2	0	0	42	0	44	95.45%
	Clase 7	0	0	1	0	0	0	48	51	94.11%
	Clase 8	0	0	0	0	0	0	0	45	100.00%
Verdad general	49	48	48	48	48	48	48	48	385	
Precisión del productor	95.9%	91.6%	83.3%	85.4%	85.7%	87.5%	100%	93.7%		
Precisión general (OA) 90.65%					Kappa¹ 0.893					

Anexo 9. Mapa de ubicación del cantón Cotacachi

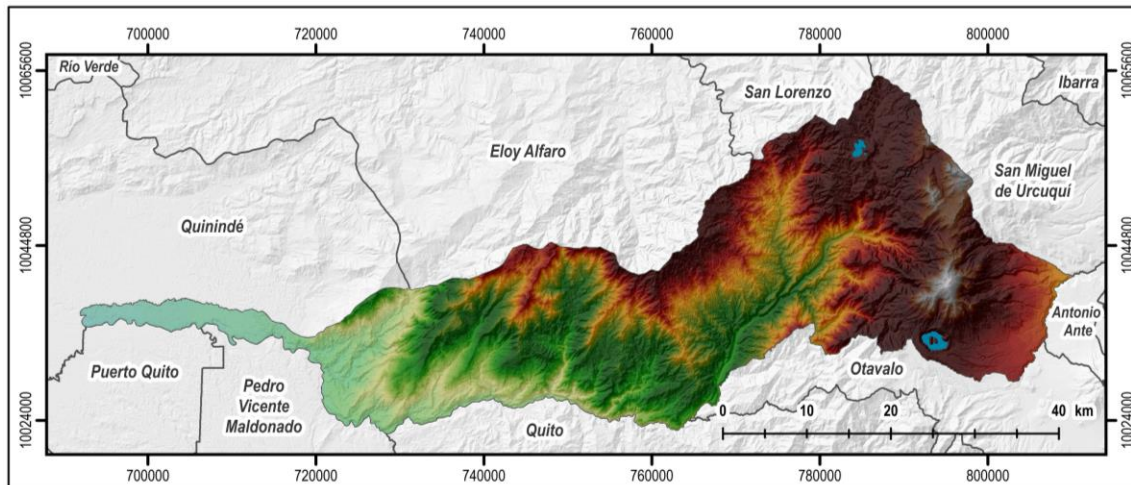
MAPA DE UBICACIÓN DEL CANTÓN COTACACHI



PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR UTM

DATUM WGS 1984, ZONA 17 HEMISFERIO SUR

UBICACIÓN CANTONAL



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD EN INGENIERÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES Y AGROPECUARIAS

CARRERA DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ZONIFICACIÓN DE COBERTURA VEGETAL PROPENSA A INCENDIOS EN EL CANTÓN COTACACHI PROVINCIA DE IMBABURA

ELABORADO POR:
Chuma Luis y Coronado Pablo

FECHA:
14 de Julio de 2022

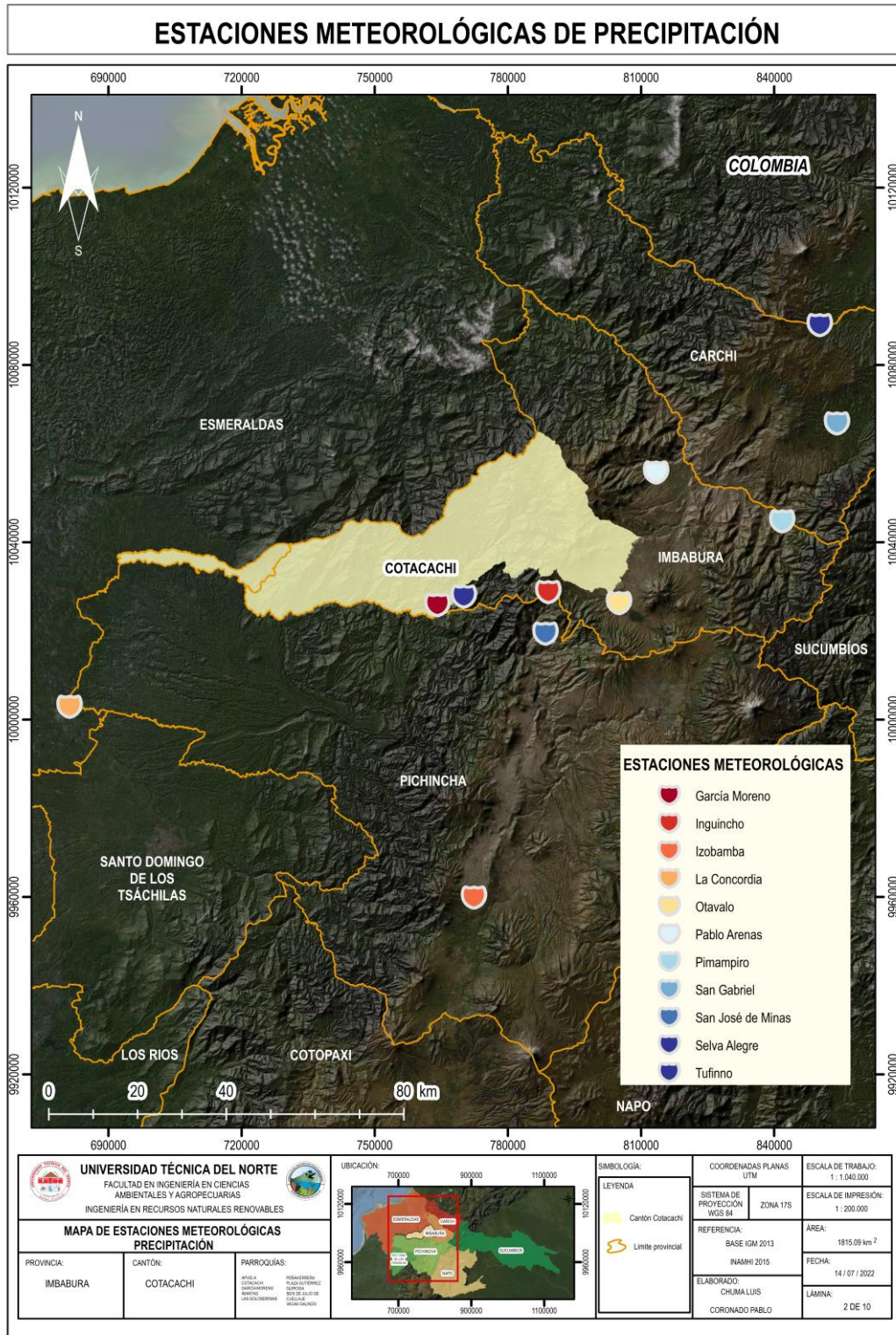
ESCALA DE TRABAJO:
1 : 200.000

ESCALA DE IMPRESIÓN:
1 : 665.000

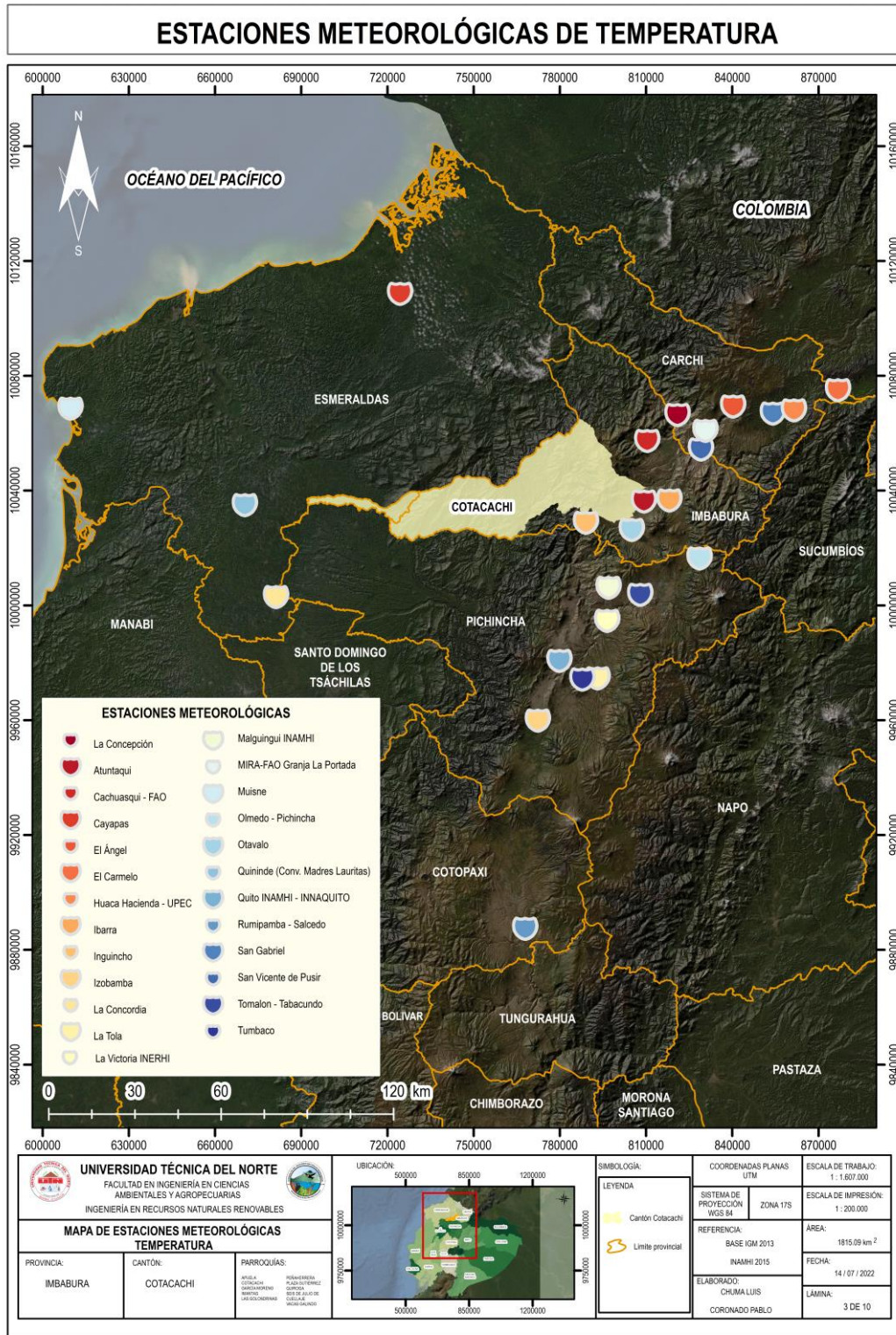
FUENTE:
IGM & OPEN TOPOGRAPHY

LÁMINA:
1 DE 10

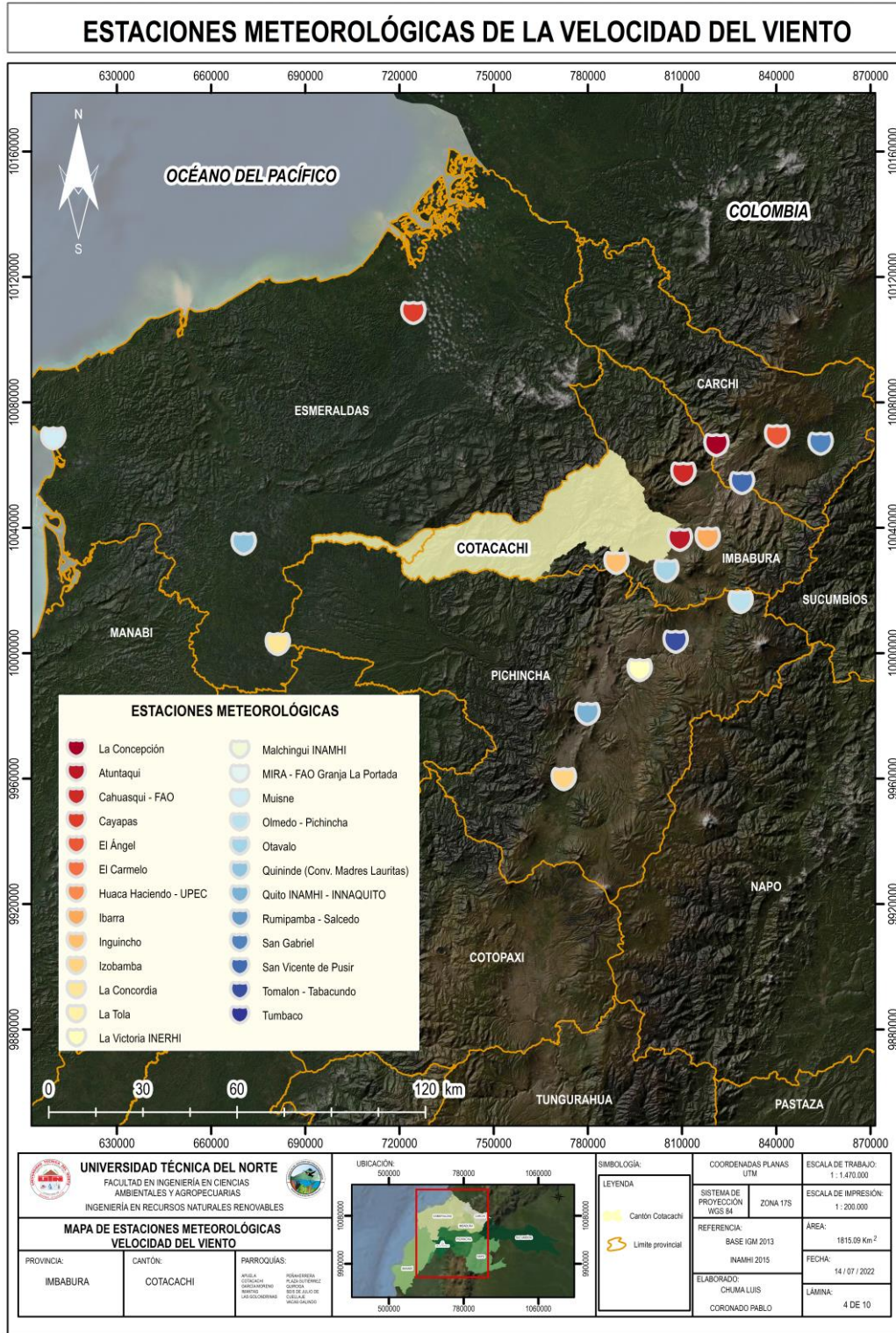
Anexo 10. Ubicación de estaciones meteorológicas para precipitación



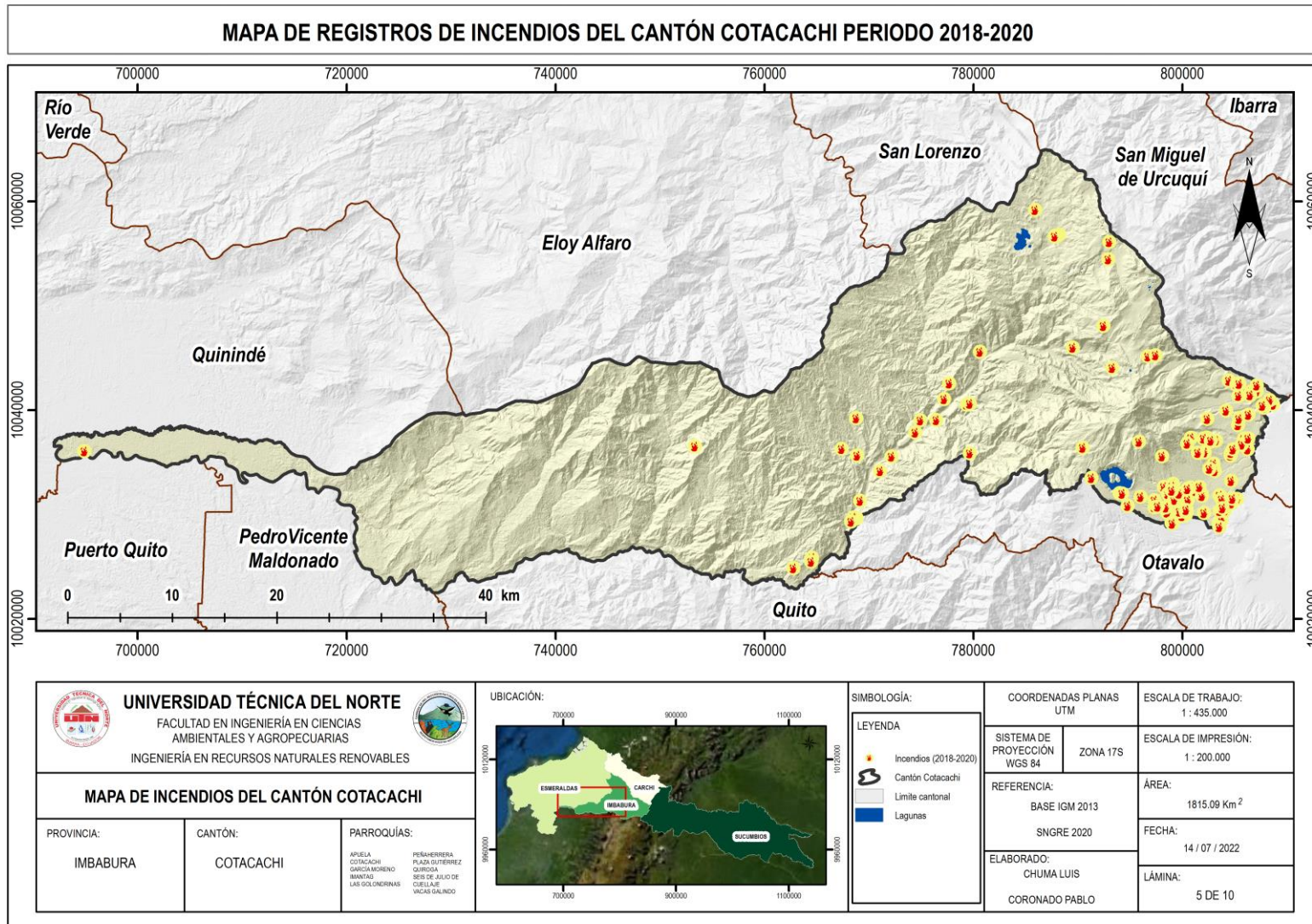
Anexo 11. Ubicación de estaciones meteorológicas para temperatura



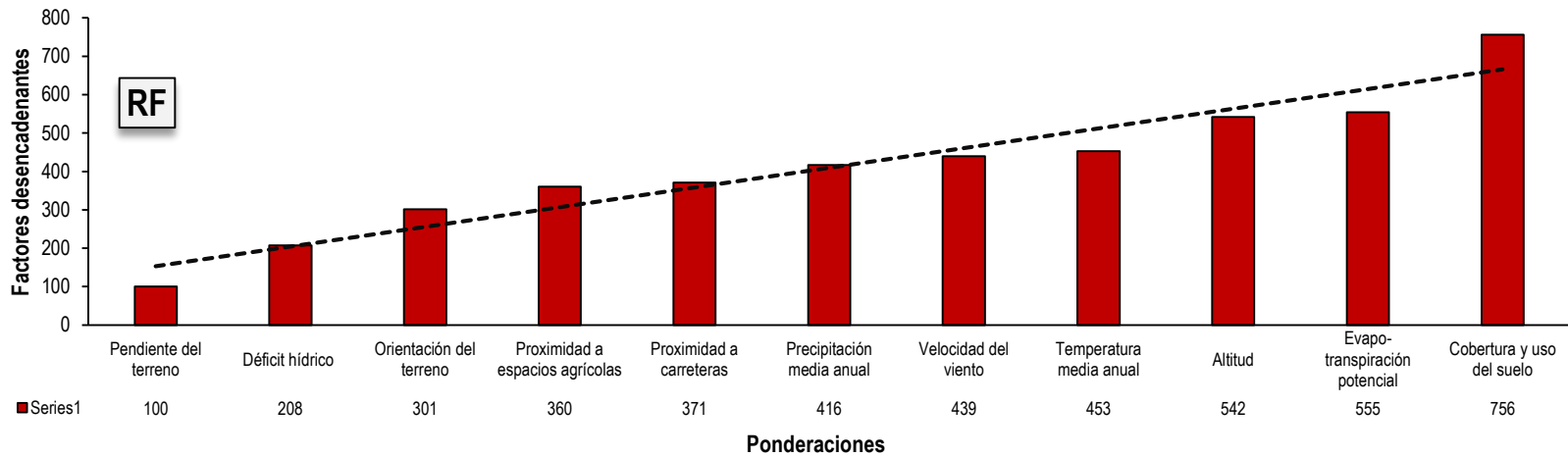
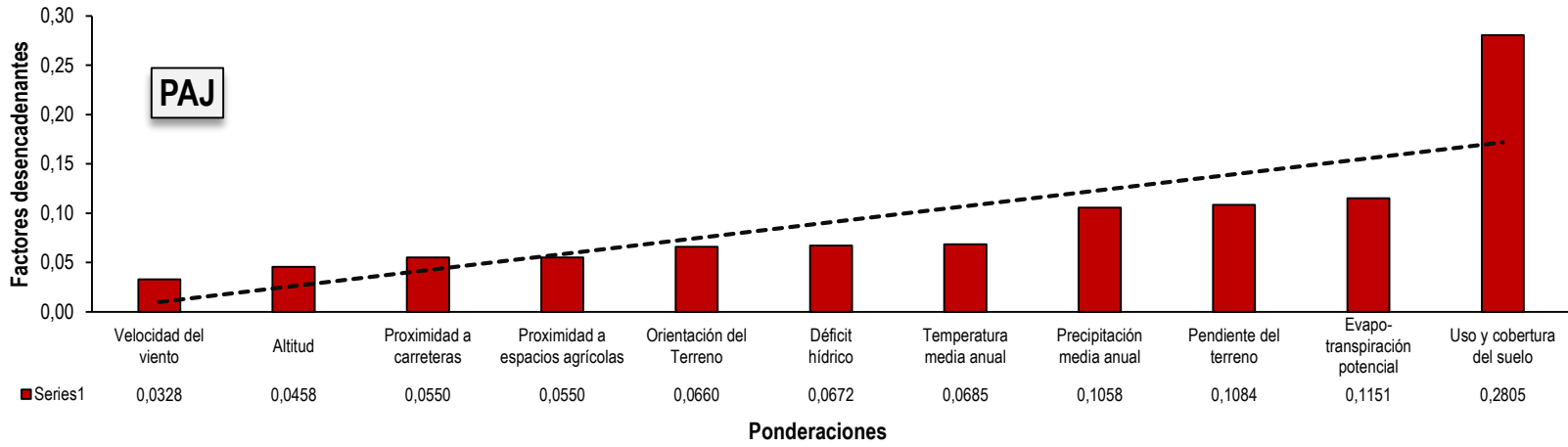
Anexo 12. Ubicación de estaciones metereológicas para velocidad del viento



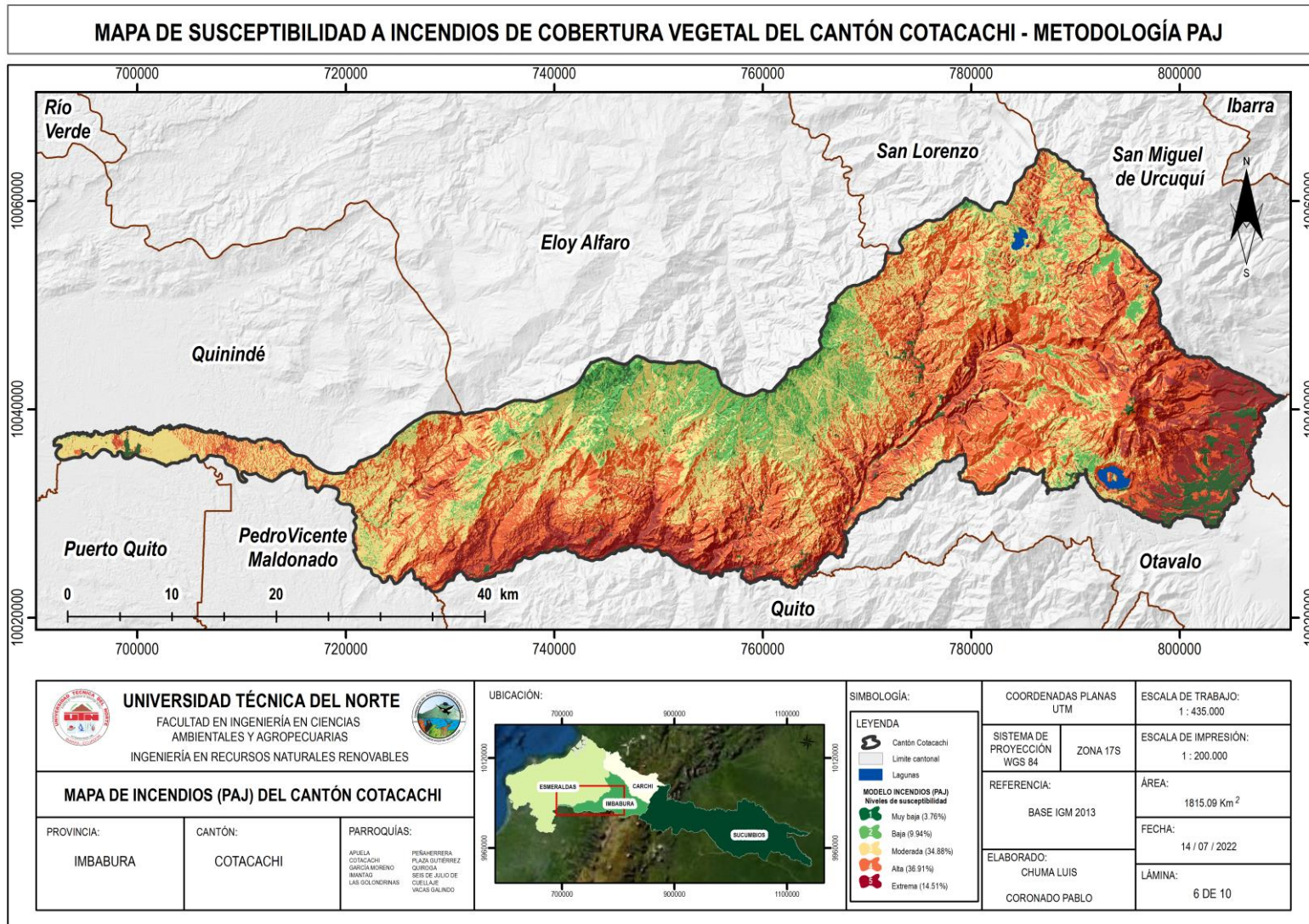
Anexo 13. Registro de incendios cantón Cotacachi periodo 2018-2020



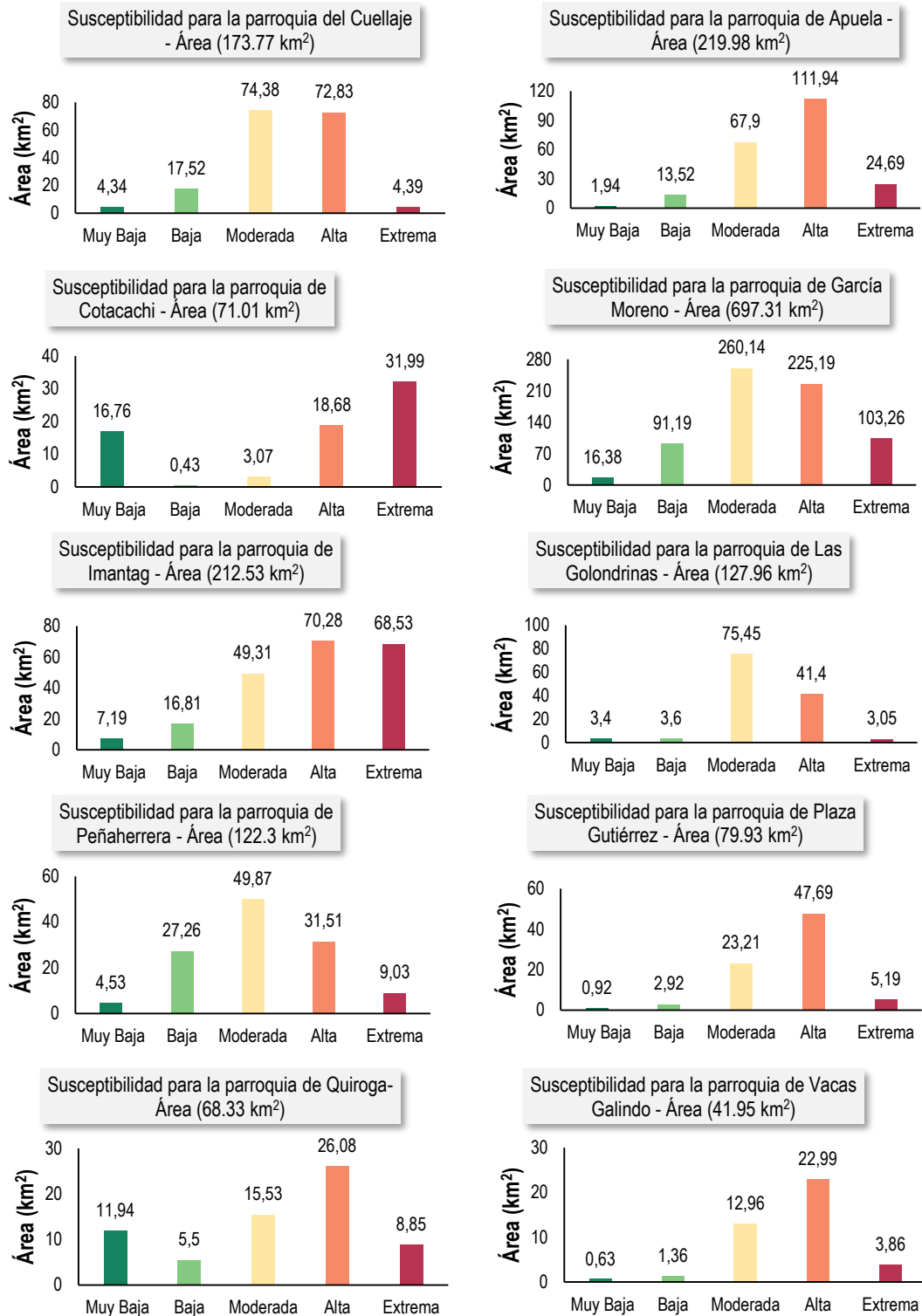
Anexo 14. Jerarquización de las ponderaciones de las metodologías PAJ y RF



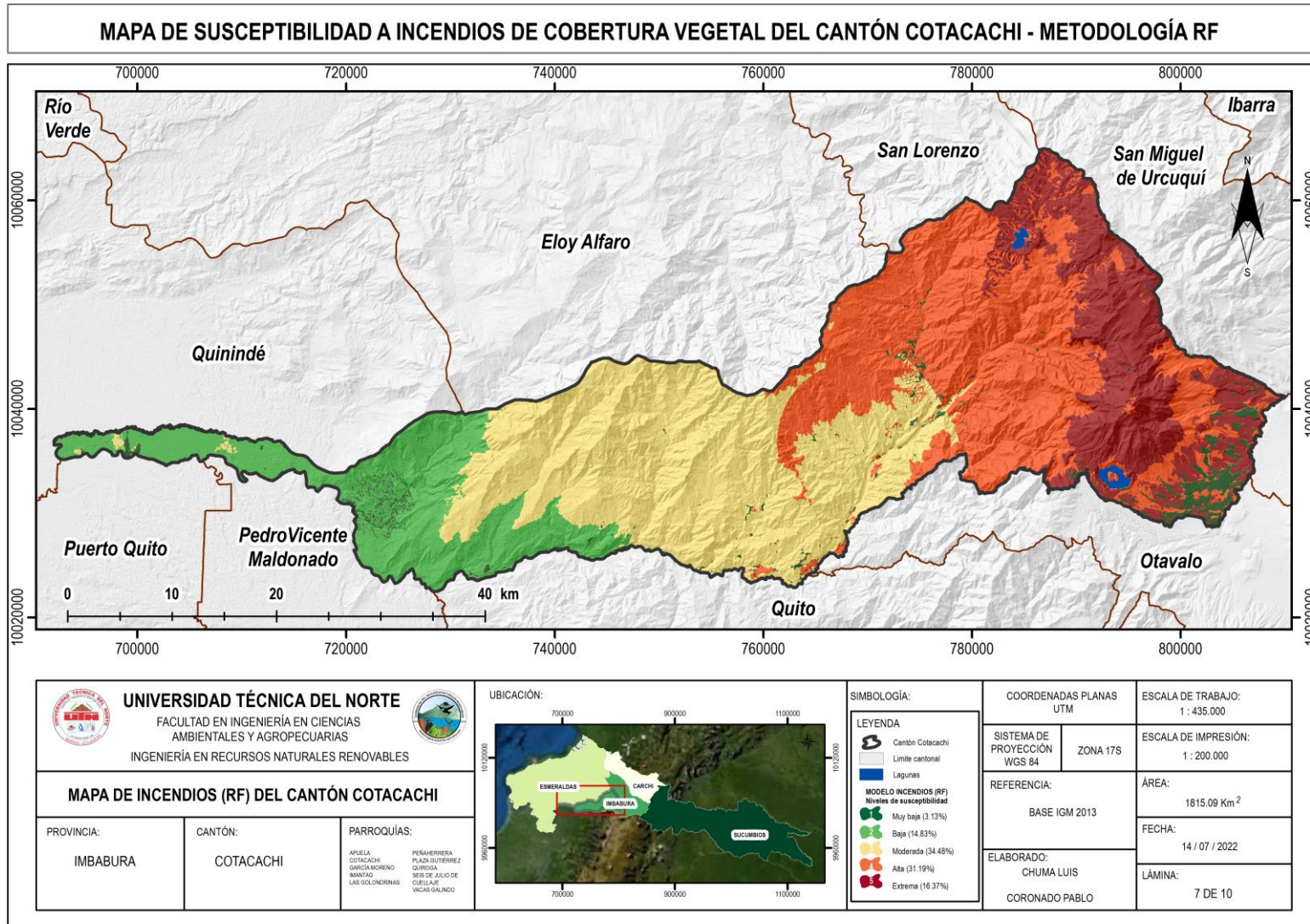
Anexo 15. Mapa de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal – metodología PAJ



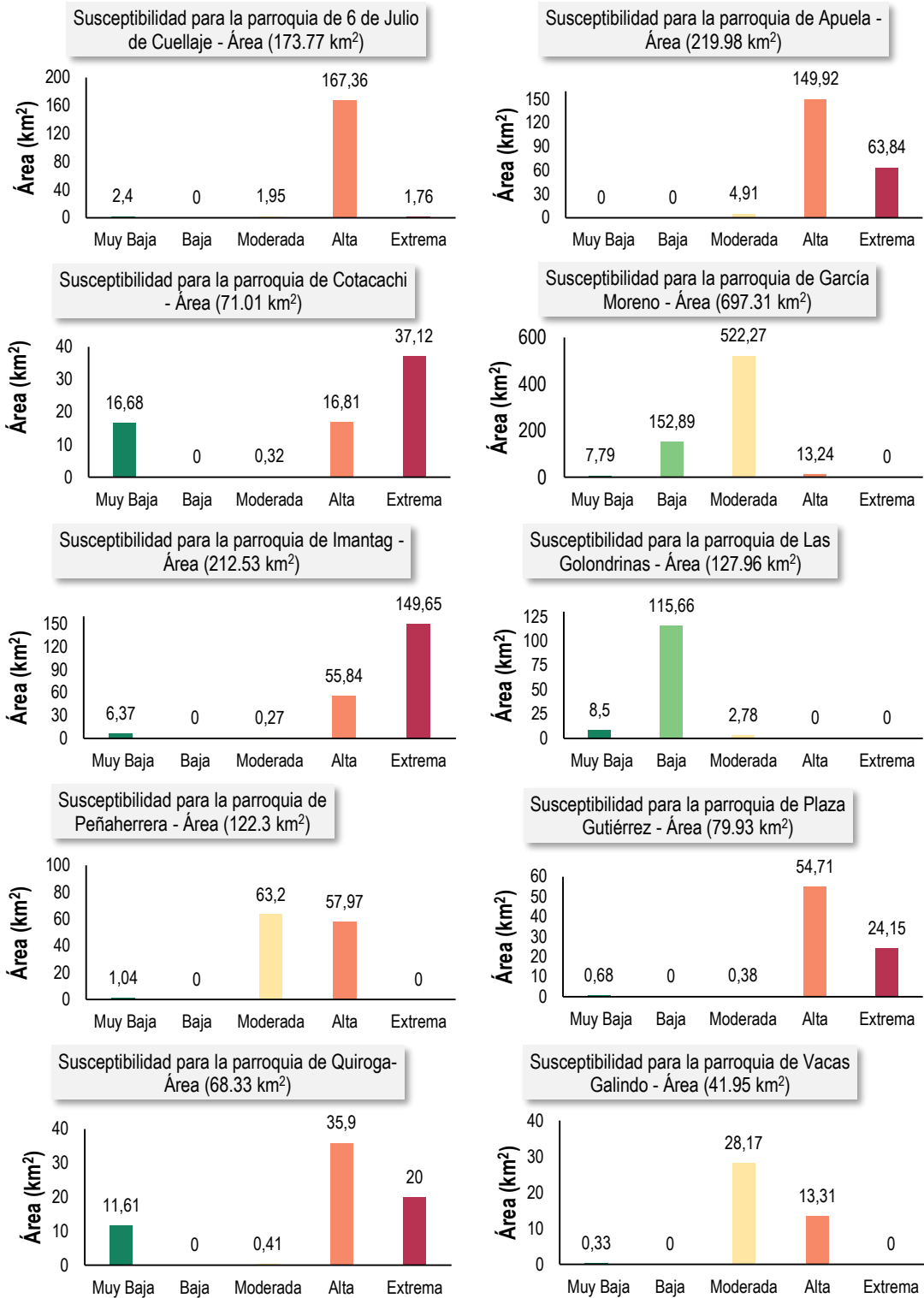
Anexo 16. Niveles de susceptibilidad por parroquias, modelo PAJ



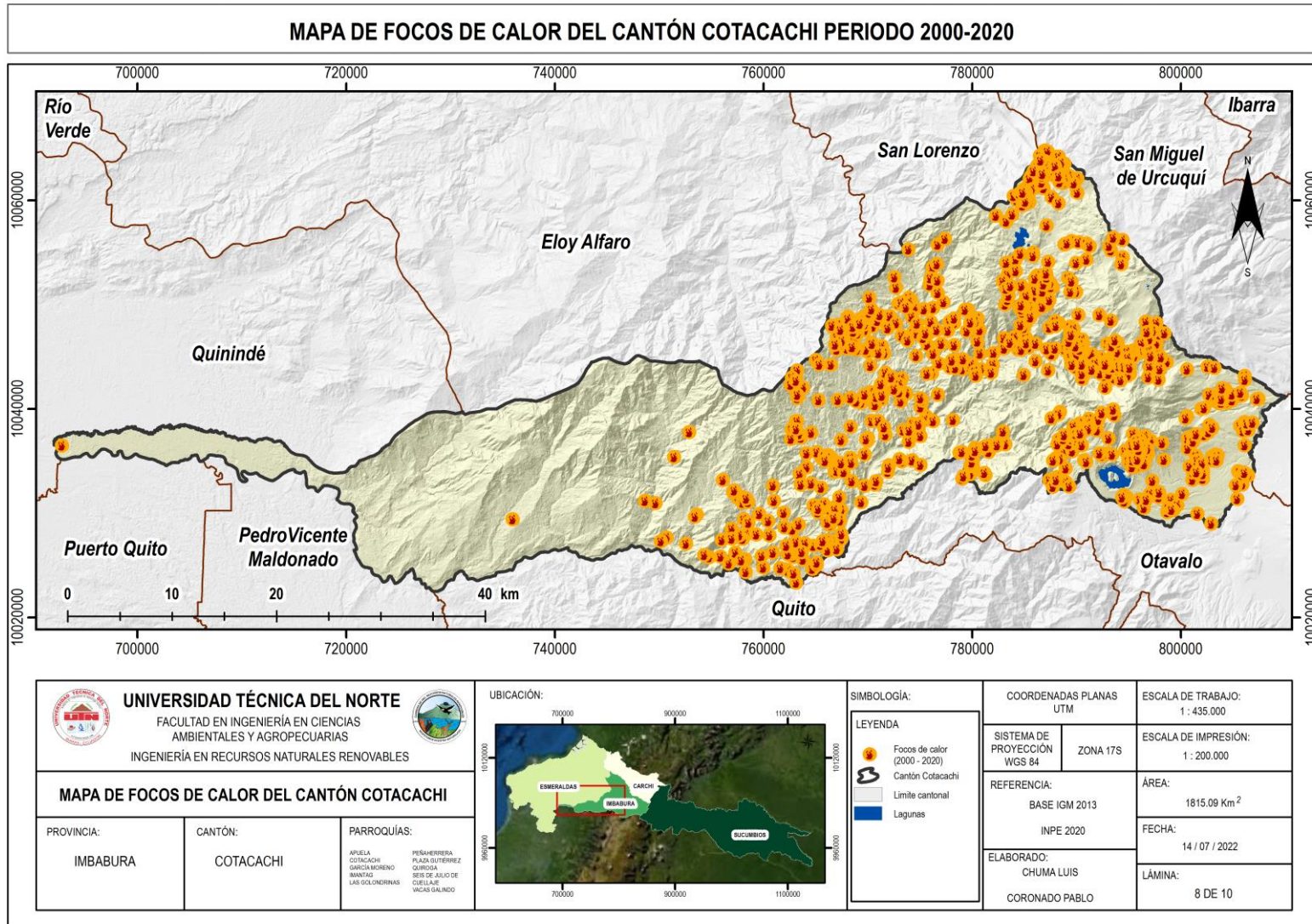
Anexo 17. Mapa de susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal – metodología RF



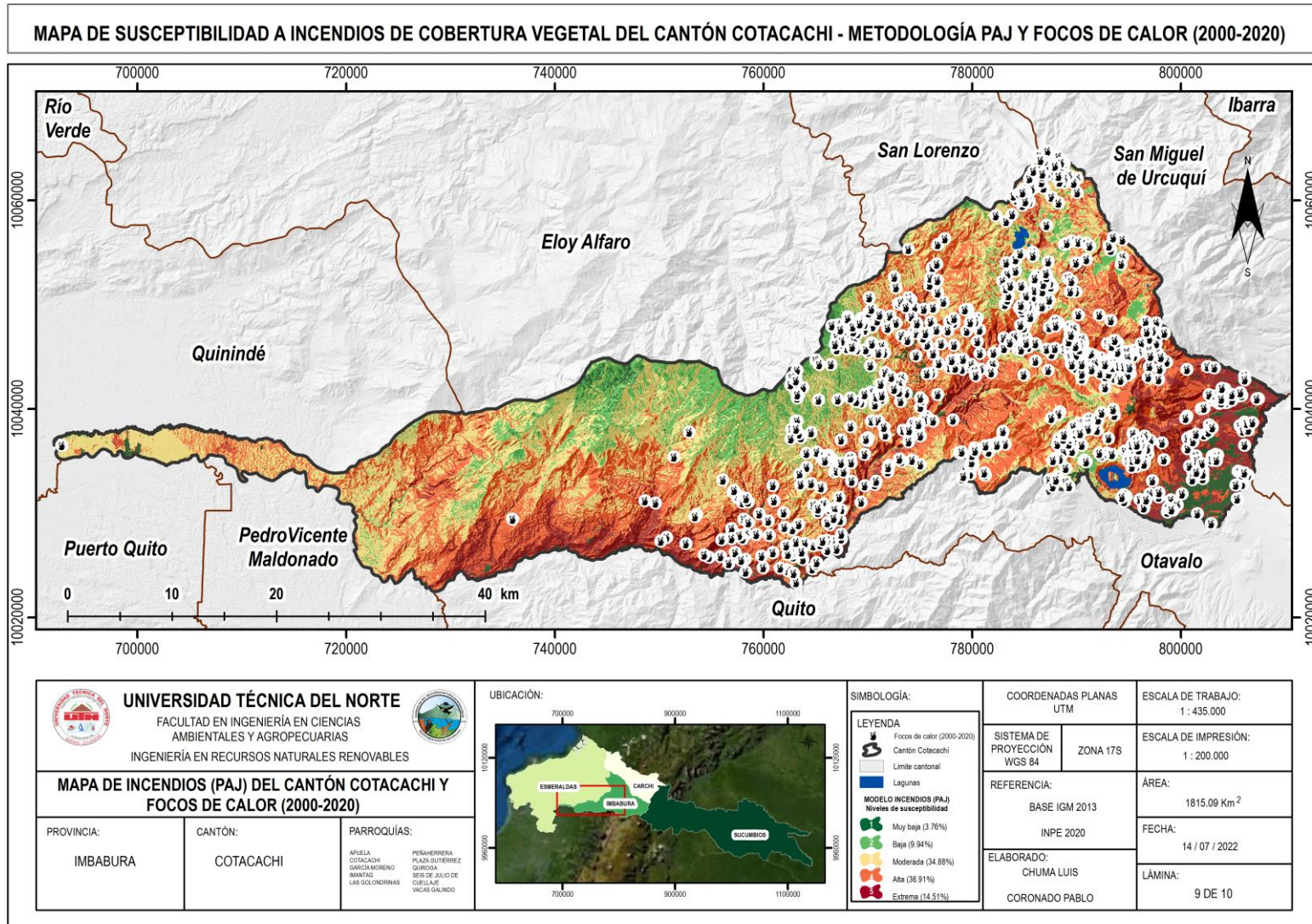
Anexo 18. Niveles de susceptibilidad por parroquias, modelo RF



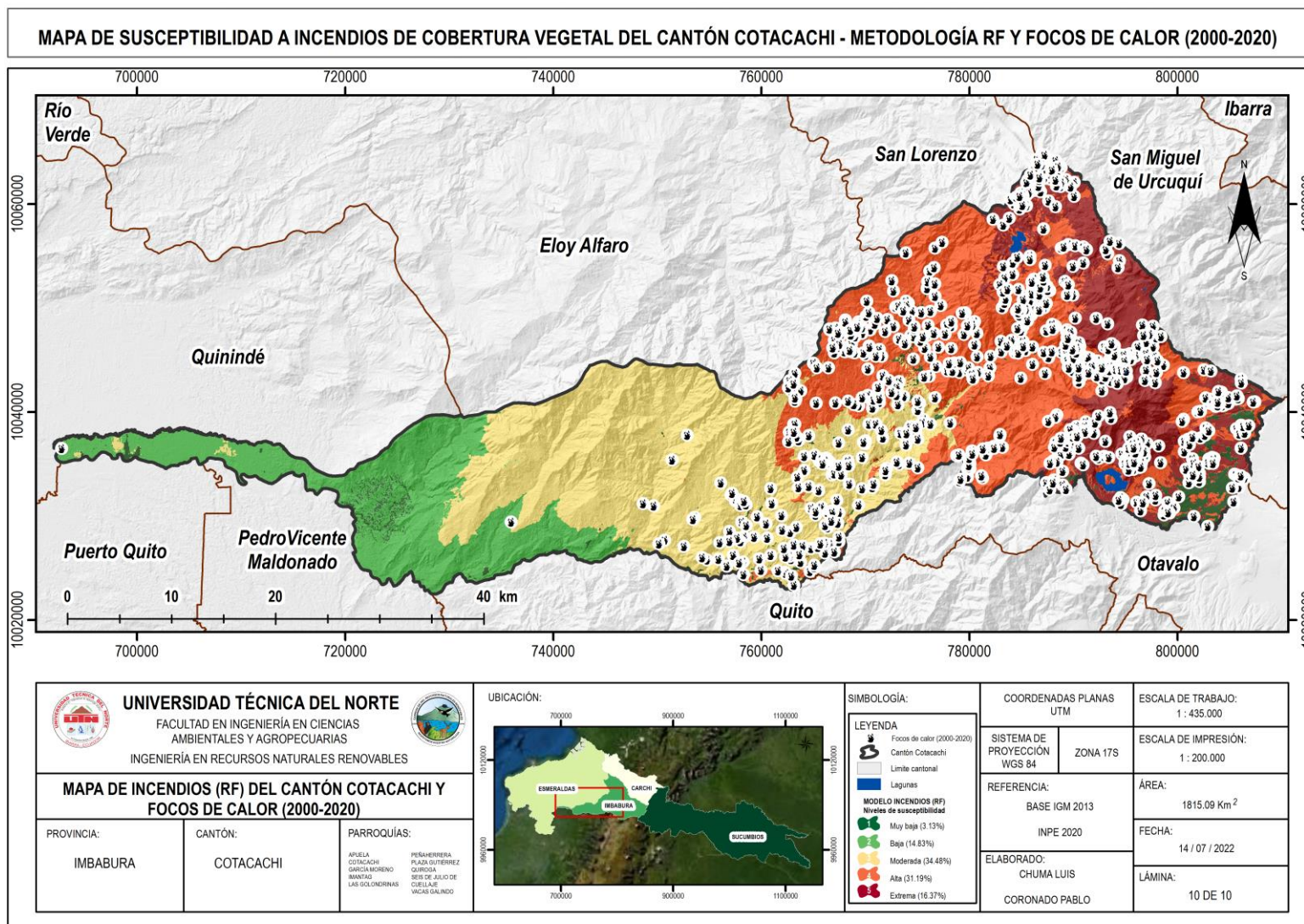
Anexo 19. Focos de calor INPE para el cantón Cotacachi periodo 2000-2020



Anexo 20. Modelo de susceptibilidad PAJ y focos de calor INPE



Anexo 21. Modelo de susceptibilidad RF y focos de calor INPE



Anexo 22. Registro fotográfico de salidas de campo

Anexo 22.a- Georreferenciación de cobertura de cuerpo de agua



Anexo 22.b- Georreferenciación de cobertura de bosque nativo



Anexo 22.c- Georreferenciación de zonas de cultivos



Anexo 22.d- Georreferenciación de suelo sin cobertura vegetal



Anexo 22.e- Georreferenciación de cobertura de vegetación arbustiva



Anexo 22.f- Georreferenciación de vegetación herbácea



Anexo 22.g- Georreferenciación de zona poblada



Anexo 22.h- Georreferenciación de registros de incendios



Anexo 22.i- Georreferenciación de áreas afectadas por incendios en la zona de Tropical (Intag)

