



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN Y PREVENCIÓN ANTE INCENDIOS
FORESTALES EN ZONAS DE ALTA Y CRÍTICA SUSCEPTIBILIDAD, EN EL
DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, UTILIZANDO EL PROGRAMA
FlamMAP**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniera Ambiental

AUTORA: BETSY GERMANIA CÓRDOVA LUSPA

TUTOR: JUAN GABRIEL MOLLOCANA LARA

Quito - Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Betsy Germania Córdova Luspa con documento de identificación N° 1724548936
manifiesto que:

Soy la autora responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la
Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial
el presente trabajo de titulación.

Quito, 15 septiembre del año 2022

Atentamente,



Betsy Germania Córdova Luspa
1724548936

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Betsy Germania Córdova Luspa, con documento de identificación N° 1724548936, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo experimental intitulado: “Estrategias de mitigación y prevención ante incendios forestales en zonas de alta y crítica susceptibilidad, en el Distrito Metropolitano de Quito, utilizando el programa Flammap”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Ambiental, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 septiembre del año 2022

Atentamente,



Betsy Germania Córdova Luspa
1724548936

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Gabriel Mollocana Lara con documento de identificación N° 1721700647, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo experimental: ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN Y PREVENCIÓN ANTE INCENDIOS FORESTALES EN ZONAS DE ALTA Y CRÍTICA SUSCEPTIBILIDAD, EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, UTILIZANDO EL PROGRAMA FLAMMAP, realizado por Betsy Germania Córdova Luspa, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo Experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 de septiembre del 2022

Atentamente,



Ing. Juan Gabriel Mollocana Lara M. Sc.
1721700647

DEDICATORIA

A mi hermosa Tamara

Betsy Germania Córdova Lusa.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, a mi madre y docentes que hicieron posible culminar mis estudios de tercer nivel.

Un agradecimiento a mi tutor Ing. Juan Gabriel Mollocana Lara por guiarme y apoyarme en la elaboración de este trabajo de titulación con sus conocimientos.

Especialmente agradezco a Alejandro Paccha a por sus enseñanzas en este camino, y por el tiempo que dedico para que pueda cumplir con este logro.

Betsy Germania Córdova Luspa

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Problema.....	1
1.2 Delimitación	3
1.1 Atahualpa.....	3
1.1.1 Volcán Paschoa	4
1.1.2 Volcán Atacazo.....	4
1.1.3 Cerro Guagua Pichincha	5
1.1.4 Volcán Casitahua.....	6
1.1.5 Cerro Ilaló.....	7
1.1.6 San Antonio de Pichincha	8
1.1.7 Puellaro	9
1.1.8 Sincholagua	10
1.1.9 Atahualpa.....	11
1.2 Pregunta de investigación.....	12
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo General	12
1.3.2 Objetivos Específicos	13
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	14
2.1 Incendios Forestales.....	14
2.1.1 Definición	14
2.1.2 Origen.....	14
2.1.3 Clasificación.....	14
2.1.4 Anatomía.....	15
2.2 Mecanismos que influyen en la propagación del incendio	16
2.2.1 Combustibles	17
2.2.2 Factores atmosféricos	18
2.3 Modelamiento de incendios forestales.....	19
2.3.1 Modelo de Rothermel.....	19
2.4 Mitigación y prevención de incendios forestales	20
2.4.1 Cortafuegos.....	21
2.4.1 Barreras Vivas	21

2.4.3.	<i>Quema prescrita</i>	22
2.5	Modelos de combustibles	23
2.6	Modelos elegidos	24
2.6.1	<i>Anderson</i>	24
2.6.2	<i>Scott-Burgan</i>	27
2.7	Simuladores	35
2.8	Software Utilizados	36
2.8.1	<i>FlamMap</i>	36
2.8.2	<i>Capas de entrada de FlamMap</i>	37
2.8.3	<i>ArcGIS</i>	39
2.9	Quito	39
2.9.1	<i>Incendios forestales en Quito</i>	39
2.9.2	<i>Zonas susceptibles a forestales en Quito</i>	39
2.9.3	<i>Gestión para prevenir y mitigar incendios</i>	42
2.9.4	<i>Fuentes de información para modelado de medidas mitigación</i>	43
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	44
3.1	Zona de estudio.....	45
3.2	Delimitación de la zona	47
3.3	Recopilación de información	47
3.3.1	<i>Carta topográfica de Quito</i>	48
3.3.2	<i>Cobertura y uso del suelo</i>	48
3.3.3	<i>Datos meteorológicos</i>	49
3.4	Procesamiento de información	52
3.4.1	<i>Archivo Landscape</i>	53
3.4.2	<i>Archivo wxs: datos meteorológicos</i>	62
3.4.3	<i>Punto de ignición</i>	63
3.5	Simulación.....	63
3.6	Validación del modelo.....	65
3.6.1	<i>Medidas estadísticas de similitud</i>	66
3.7	Aplicación de medidas de mitigación	68
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
4.1	Simulación de incendios forestales en 9 zonas de DMQ	70
4.2	Medidas de mitigación	70
4.3	Validación del modelo.....	73
4.4	Discusión	75
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76

5.1	Conclusiones	76
5.2	Recomendaciones	76
6.	BIBLIOGRAFÍA	77
7.	ANEXOS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Zona de estudio Pasochoa	4
Figura 2 Volcán Atacazo	5
Figura 3 Guagua Pichincha	6
Figura 4 Volcán Casitahua	7
Figura 5 Cerro Ilaló	8
Figura 6 San Antonio de Pichincha	9
Figura 7 Puellaro	10
Figura 8 Sincholagua.....	11
Figura 9 Atahualpa	12
Figura 10 Clasificación de acuerdo al combustible.....	15
Figura 11 Partes de un incendio	16
Figura 12 Triada del fuego.....	17
Figura 13 Barrera natural frente al fuego	22
Figura 14 Quema prescrita	23
Figura 15 Capas de archivo LANDSCAPE	38
Figura 16 Mapa de riesgo a incendio forestales	42
Figura 17 Diagrama de metodología	45
Figura 18 Zona de estudio	46
Figura 19 Zona de estudio	47
Figura 20 Curvas de nivel DMQ.....	48
Figura 21 Cobertura de suelo de zonas de estudio.....	49

Figura 22 <i>Datos metereológicos año 2019</i>	51
Figura 23 <i>Datos metereológicos</i>	52
Figura 24 <i>Raster de altura</i>	54
Figura 25 <i>Raster de Pendiente</i>	55
Figura 26 <i>Raster de Orientación</i>	55
Figura 27 <i>Modelo de combustible</i>	60
Figura 28 <i>Cobertura vegetal</i>	61
Figura 29 <i>Interfaz de FlamMap para crear Landscape</i>	62
Figura 30 <i>Inputs de FlamMap</i>	64
Figura 31 <i>Inputs de FlamMap</i>	65
Figura 32 <i>Casitagua, incendio real y simulado.</i>	68
Figura 33 <i>Tiempos de llegada en minutos</i>	70
Figura 34 <i>Barrera cortafuego existentes</i>	71
Figura 35 <i>Barrera cortafuego creadas</i>	72
Figura 36 <i>Cálculo de pixeles</i>	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Áreas de estudio</i>	3
Tabla 2 <i>Modelo de combustibles de Anderson (1981)</i>	25
Tabla 3 <i>Modelos de combustibles Scott-Burgan dividido en categorías.</i>	28
Tabla 4 <i>Sectores susceptibles a incendios en el DMQ en el año 2020</i>	40
Tabla 5 <i>Estaciones utilizadas</i>	50
Tabla 6 <i>Base de datos para cobertura vegetal y modelo de combustibles</i>	57
Tabla 7 <i>Datos meteorológicos usados</i>	63
Tabla 8 <i>Barreras cortafuego por zona</i>	69
Tabla 9 <i>Área de incendio simulado</i>	72
Tabla 10 <i>Matriz de error para el coeficiente kappa de Cohen</i>	73

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Datos meteorológicos de muestra de julio del 2019 por estaciones	83
Guamaní.....	83

RESUMEN

Los incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito han ocurrido especialmente en la época de verano, y son una de las principales causas de degradación ambiental. Tales incendios son un problema de difícil tratamiento para las autoridades municipales por la falta de herramientas que ayuden a prevenir, mitigar y responder efectivamente ante estos eventos.

En este trabajo se centra en generar simulaciones de incendios forestales en zonas de alta y crítica susceptibilidad del DMQ para responder con medidas de mitigación aplicables, definió 9 zonas que corresponden con el nivel de susceptibilidad requerido en base al mapa de susceptibilidades del año 2019.

La simulación se realizó usando el programa FlamMap debido a que está diseñado para realizar mapeo de la propagación del fuego, primero se trabajó sobre la carta topográfica del Ecuador obtenida de IGM. Además de estos mapas, se necesita conocer la cobertura vegetal y al realizar este trabajo se evidencio la limitada información disponible de combustibles vegetales, por eso se adaptó al mapa uso y cobertura de suelo del MAGAP al modelo de combustibles de Scott-Burgan, con esta información se generó un archivo lcp. El archivo lcp sumado a datos meteorológicos del 2019 obtenidos de 5 estaciones del REMMAQ permiten crear la simulación en FlamMap.

Este trabajo además aplica medidas de mitigación que logran disminuir notoriamente el porcentaje extensión del incendio por mencionar un ejemplo en el Pasochoa se redujo un 75% el incendio, debido a la aplicación de barreras cortafuegos que contienen caminos, y otros componentes naturales como rocas o cuerpos de agua, estos atributos se los obtuvo de OSM.

El programa FlamMap en este trabajo se evaluó mediante la comparación de un incendio ocurrido vs la simulación generada, el coeficiente de error corresponde a 0.78.

Palabras clave: *FamMap*, ArcGis, incendio forestal, simulación, combustibles.

ABSTRACT

Forest fires in the Metropolitan District of Quito have occurred especially in the summer season, and are one of the main causes of environmental degradation. Such fires are a difficult problem for municipal authorities due to the lack of tools that help prevent, mitigate and respond effectively to these events.

This work focuses on generating simulations of forest fires in areas of high and critical susceptibility of the DMQ to respond with applicable mitigation measures, defining 9 areas that correspond to the level of susceptibility required based on the susceptibilities map of the year 2019.

The simulation was carried out using the FlamMap program because it is designed to map the spread of fire, first, the topographic map of Ecuador obtained from IGM was worked on. In addition to these maps, it is necessary to know the vegetation cover and when carrying out this work, the limited information available on vegetable fuels was evidenced, for this reason the MAGAP land use and cover map was adapted to the Scott-Burgan fuel model, with this information and lcp file was generated. The lcp file added to 2019 meteorological data obtained from 5 REMMAQ stations allow the simulation to be created in FlamMap.

This work also applies mitigation measures that significantly reduce the percentage of extension of the fire, to mention an example in Paschocha, the fire was reduced by 75%, due to the application of fire barriers that contain roads, and other natural components such as rocks or bodies of water, these attributes were obtained from OSM.

The FlamMap program in this work was evaluated by comparing a fire occurred vs. the generated simulation, the error coefficient corresponds to 0.78.

Keywords: *FamMap*, ArcGis, *wildfire*, simulation, fuels.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Problema

Los incendios forestales se crean a partir de una fuente de calor, principalmente son ocasionados de manera voluntaria (Sahar et al., 2012), representan un peligro para los bosques, debido a que acaban con la materia orgánica de la naturaleza (ONU, s.f). El éxito del incendio dependerá de la inflamabilidad de la vegetación también influyen el clima y la topografía del terreno (FAO, 2001). Además, los incendios forestales que ocurren en zonas urbano-forestales son un riesgo porque afecta a los servicios ecosistémicos. (UNISDR, 2017)

Se debe anteponer la prevención para evitar riesgos resultantes del incendio, para ello se debe investigar los factores que desencadenan este fenómeno (MiAmbiente, 2015). Actualmente la tecnología ofrece múltiples opciones, para analizar datos y tomar decisiones antes que ocurra un incendio forestal (Ferry, 1999). Es así que, basándose en las características del fuego y su propagación, es posible crear mediante programas de simulación escenarios con estrategias para reducir el riesgo de incendio forestal (Silvae y Rodríguez, 1999), como por ejemplo se puede simular quemas prescritas, barreras cortafuego, entre otras (WWF, 2017). Para desarrollar proyectos de prevención y mitigación de incendios forestales es necesario la colaboración de la comunidad con las autoridades (NWGC, 2006).

Se está utilizando en varias regiones del mundo distintos programas como Arcar-Cardin, FlamMap, Kitral y otros, para simular incendios forestales basándose en condiciones realistas (Encinal et al., 2007), en conjunto con Sistemas de Información Geográfica para visualizar los datos simulados (Kanga, y Singh, 2017), esto con el fin de facilitar a los gestores información sobre propagación, longitud de llama y otras características, para que puedan tener control sobre el fuego. Con ayuda de estos programas ha mejorado la gestión de los incendios forestales, reduciendo recursos destinados a la extinción del incendio (Pedernera y Julio, 1999).

Los programas para modelar incendios que se enfocan en su comportamiento han estado disponibles desde el pasado (Finney, 2006). Con FlamMap la modelación se extiende a paisaje por su entrada que es un mapeo utilizando un SIG (Finney, 2007). FlamMap logra crear

simulaciones de las características del fuego como por ejemplo la longitud de llama y probabilidad de quema con condiciones ambientales constantes como el clima. (USDA, s.f), esta herramienta informática ayuda a predecir incendios a través de mapas (Salis, 2009).

Para usar modelos de fuego, en este caso el software FlamMap, es necesario realizar una validación y verificación del modelo (Van Hees, 2013), los modelos de incendios se pueden validar mediante los coeficientes de Sorensen y kappa de Cohen, sirven cuando hay dos evaluadores (Kılıç, 2015), dichos coeficientes son útiles para calcular las medidas de error aplicables (Mollocana et al, 2021).

Los incendios que han ocurrido en el Distrito Metropolitano de Quito en el pasado en su mayoría han sido provocados y otros han ocurrido por fuertes sequías (SNGRE, 2014), en la época de verano aumenta la susceptibilidad del DMQ a incendios forestales (Narváez y Estacio, 2012). El cuerpo de bomberos se mantiene realizando investigaciones sobre los incendios para tomar decisiones respecto a la gestión de estos siniestros (GADDMQ, s.f), además se busca integrar una herramienta como los modelos de simulación para que ayude con el pronóstico de los incendios forestales (Proaño y Trujillo, 2021). La información necesaria para la simulación de incendios forestales del DMQ, se puede obtener de fuentes de información libres y gubernamentales como: Ministerio del Ambiente, Bomberos del DMQ, Secretaría del ambiente y otras instituciones confiables para llevar a cabo la parte investigativa.

El objetivo de la investigación es usar la herramienta FlamMap para simular incendios forestales, validar el modelo para la simulación para generar estrategias de gestión de incendios aplicando conocimientos de estrategias de prevención y mitigación en las zonas susceptibles que se muestran el último mapa de vulnerabilidad de la ciudad de Quito. El modelo de simulación a usar utiliza hojas topográficas del IGM, datos meteorológicos de la REMMAQ o del INAMHI, mapas de caminos de OpenStreetMap y mapa de cobertura y uso de tierra del MAGAP.

1.2 Delimitación

El Distrito Metropolitano de Quito que en siglas es DMQ, se encuentra ocupando un 44,6% de superficie de la provincia de Pichincha según los datos del Municipio de Quito (2011), se encuentra limitando al sur limita con Cotopaxi, al norte con Imbabura, al este con la provincia de Napo y limita al oeste con Sto Domingo de clima cambiante y la época de verano se presenta entre los meses de julio hasta septiembre. Para realizar este trabajo se ha escogido 9 zonas del DMQ como de alta y critica susceptibilidad ante incendios forestales.

Tabla 1 *Áreas de estudio*

Parroquia	Zona
1. Amaguaña	1.1 Volcán Pasochoa
2. Lloa	2.1 Volcán Atacazo
3. Nono-Lloa	3.1 Cerro Guagua Pichincha
4. Santa Ana	4.1 Volcán Casitahua
5. La Merced	5.1 Cerro Ilaló
6. San Antonio	6.1 San Antonio de Pichincha
7. Puellaro	7.1 Puellaro
8. Pintag	8.1 Volcán Sincholagua
9. Atahualpa	1.1 Atahualpa

Nota. Elaborado por la Autora, 2022

1.2.1 Volcán Pasochoa

Este volcán se encuentra en Ecuador, provincia de Pichincha, al sureste de Quito y al noreste del Valle de Machachi. Se puede localizar su cima en el punto $0^{\circ}26'51''\text{S}$ y $78^{\circ}29'35''\text{W}$, alcanza 4200 altura snm, formando parte de la Cordillera Oriental de los Andes, su clima es frío con una temperatura entre 3°C y 12°C , y su ecosistema es un bosque húmedo que se conforma por gran variedad de arbustos y pequeños árboles.

Figura 1.

Zona de estudio Pasochoa.



Nota. Elaborado por la Autora, 2022.

1.2.2 Volcán Atacazo

El volcán Atacazo localizado en Ecuador, formando parte de la provincia Pichincha, en la Parroquia de Cutuglagua al sur del DMQ y al límite con el cantón Mejía. Su cima se ubica en el punto 0.361°S ; $78, 62^{\circ}\text{W}$, con una altura de 4750 m snm. El cerro Atacazo forma parte de la Cordillera Occidental, su temperatura media es de 10°C , presentando dos estaciones según el

Instituto Geofísico de Escuela Politécnica Nacional (2022) las cuales son invierno y verano en los meses de marzo hasta octubre.

Figura 2.

Volcán Atacazo.



Nota. Elaborado por la Autora, 2022.

1.2.3 Cerro Guagua Pichincha

Este cerro se encuentra en Ecuador, provincia de Pichincha, al oeste de Quito y al noreste del Valle de Machachi. Su cima se ubica en las coordenadas 0, 171° S, 78, 609° W, alcanza 477 m snm de altura , formando parte de la Cordillera Occidental de los Andes, su clima es frio con una temperatura media es 12°C, y su ecosistema es herbazal de páramo.

Figura 3.

Guagua Pichincha.



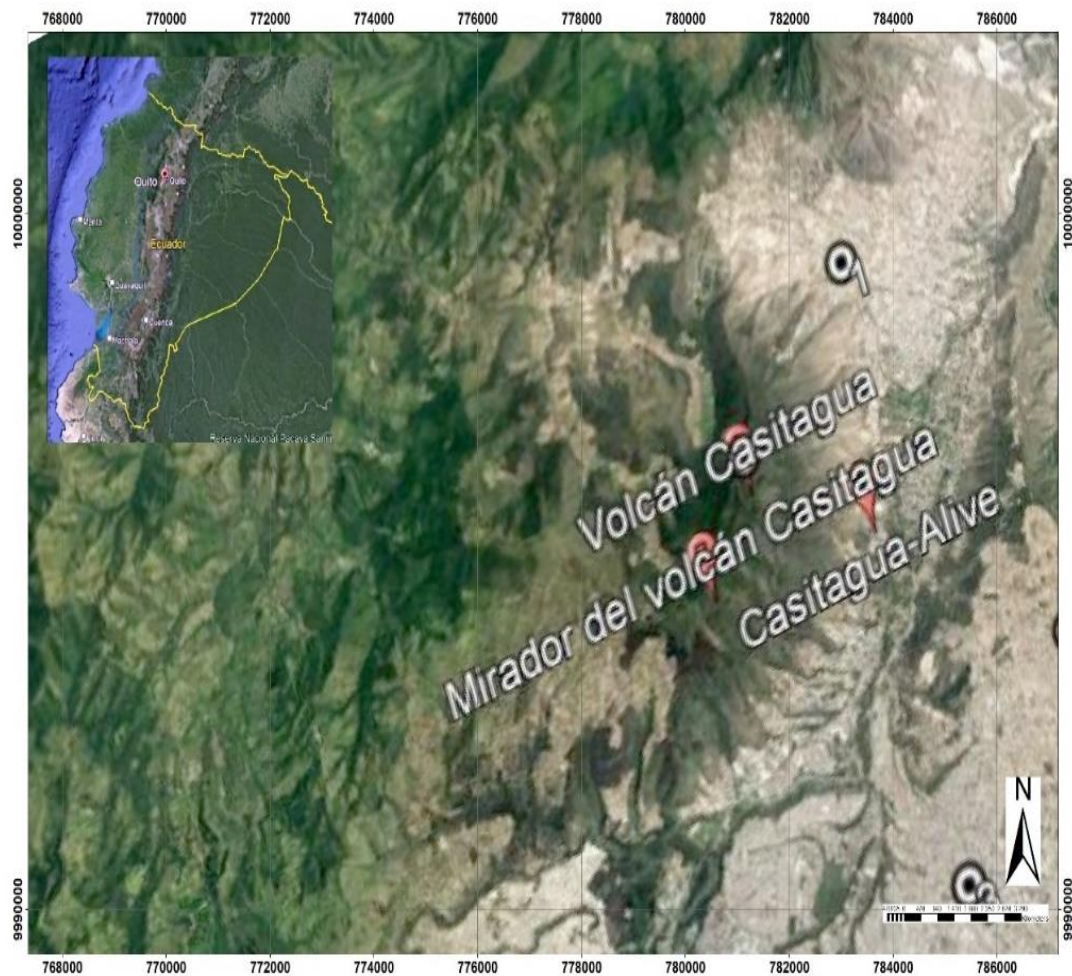
Nota. Elaborado por la Autora, 2022.

1.2.4 Volcán Casitahua

Este cerro se encuentra en Ecuador, provincia de Pichincha, ubicado cerca de la Mitad del Mundo y Calacalí. Su cima se ubica en las coordenadas $0^{\circ} 1'47.86''S$, $78^{\circ}28'34.44''O$ alcanza 3519 metros de altura sobre el nivel del mar, sus laderas están conformada por vegetación casi desértica, en la cima hay matorrales.

Figura 4.

Volcán Casitahua



Nota. Elaborado por la Autora, 2022.

1.2.5 Cerro Ilaló

Este volcán se encuentra en Ecuador, provincia de Pichincha, ubicado en Tumbaco. Su cima se ubica en el punto $0^{\circ}15'28.37''S$ y $78^{\circ}25'11.66''O$, alcanza 3161 metros de altura sobre el nivel del mar, su clima esta entre cálido y frio, teniendo así temperatura media entre $3^{\circ}C$ y $12^{\circ}C$, y en su ecosistema se puede encontrar árboles como eucalipto y pino.

Figura 5.

Cerro Ilaló



Nota. Elaborado por la Autora, 2022.

1.2.6 San Antonio de Pichincha

San Antonio también conocido como la Mitad del Mundo se encuentra en Ecuador, forma parte de la provincia Pichincha, ubicado al noroccidente de Quito, está en las coordenadas $0^{\circ} 0'16.45''N$ y $78^{\circ}26'48.39''O$, está a 2439 metros de altura sobre el nivel del mar, su clima cambia entre cálido y frío, con una temperatura media que varía entre $9^{\circ}C$ y $13^{\circ}C$, y en su ecosistema se consideraría un bosque seco.

Figura 6.

San Antonio de Pichincha



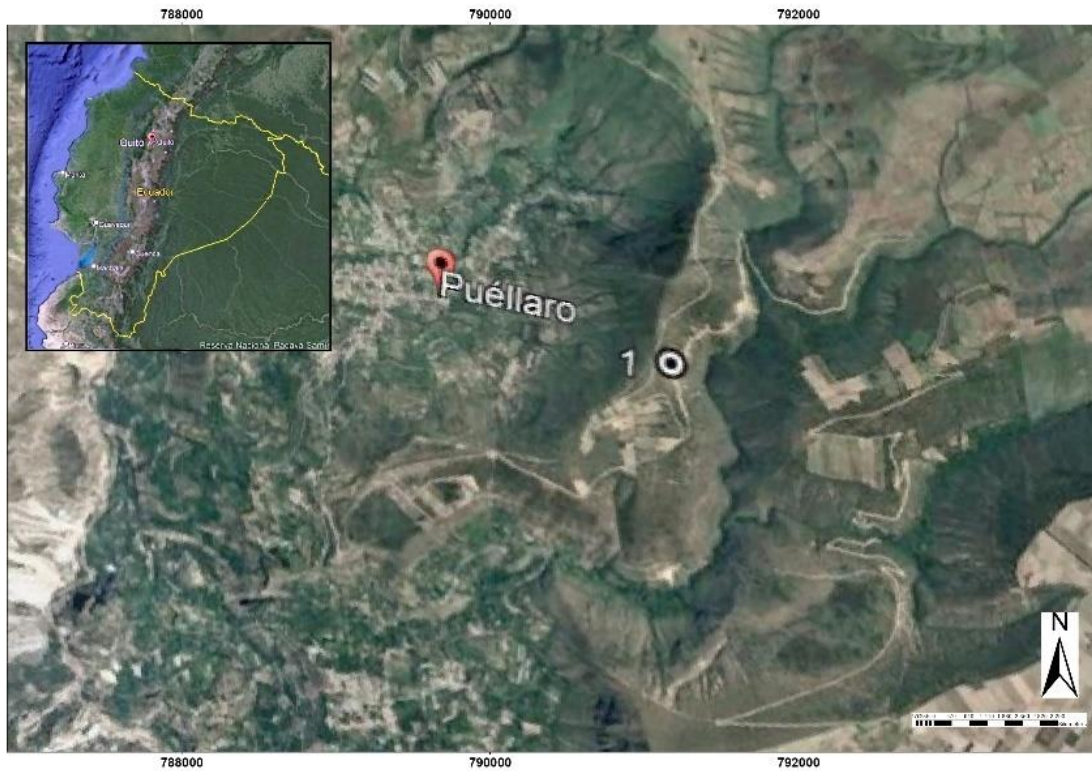
Nota. Elaborado por la Autora, 2022.

1.2.7 Puellaro

Esta parroquia se encuentra en Ecuador, dentro de la provincia Pichincha, ubicado en la parte Norcentral de la ciudad de Quito, en las coordenadas $0^{\circ} 4'0.00''N$ y $78^{\circ}23'60.00''O$, está entre 1500 a 2063 metros de altura sobre el nivel del mar, su clima es templado con una temperatura media que oscila entre $18^{\circ}C$ y $20^{\circ}C$, y presenta tres tipos de suelos en donde se encuentra formaciones boscosas y en mayor porcentaje pastizales.

Figura 7.

Puellaro



Nota. Elaborado por la Autora, 2022.

1.2.8 Sincholagua

Se encuentra en Ecuador, dentro de la provincia Pichincha ubicado en el sur oriente de la ciudad de Quito, en las coordenadas $0^{\circ} 4'0.00''N$ y $78^{\circ}23'60.00''O$, está entre 2400 a 4500 metros de altura sobre el nivel del mar, su clima es templado húmedo con una temperatura media de $12^{\circ}C$, y presenta ecosistema tipo paramo con matorrales húmedos y presencia de árboles como el eucalipto en mayor porcentaje.

Figura 8.

Sincholagua



Nota. Elaborado por la Autora, 2022.

1.2.9 Atahualpa

Esta parroquia se encuentra en Ecuador, provincia de Pichincha, ubicado en la parte Norcentral de la ciudad de Quito, en las coordenadas $0^{\circ} 9'20.12''N$ y $78^{\circ}21'0.32''O$, está entre 200 hasta los 5790 metros de altura snm, su clima es variado entre tropical templado, la temperatura fluctúa entre $5^{\circ}C$ a $26^{\circ}C$, y presenta bosque nativo y pastizal mayor porcentaje.

Figura 9.

Atahualpa



Nota. Elaborado por la autora, 2022.

1.2 Pregunta de investigación

- ¿Qué zonas presentan mayor vulnerabilidad ante incendios forestales en la época de verano?
- ¿Cuál es la conducta frente a un incendio de las zonas de alta y crítica susceptibilidad del DMQ?
- ¿Cuáles son las estrategias de mitigación aplicables en las zonas de alta y crítica susceptibilidad ante incendios forestales?

1.3 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Generar estrategias de mitigación y prevención ante incendios forestales en zonas de alta y crítica susceptibilidad en el Distrito Metropolitano de Quito, utilizando el software FlamMap para la prevención de los impactos de un incendio.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Crear rásteres de altura, pendiente, orientación, cobertura vegetal y combustibles, mediante la herramienta computacional ArcGIS utilizando información geográfica obtenida en fuentes de libre acceso y gubernamentales para la caracterización de las áreas de estudio.
- Realizar simulaciones de incendios forestales, utilizando el software FlamMap para la representación del comportamiento del incendio.
- Evaluar la similitud de la extensión simulada y extensión real de incendios forestales de las zonas de interés, empleando los coeficientes de Sorensen y kappa de Cohen para la validación del modelo.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Incendios Forestales

2.1.1 Definición

Se denomina incendio forestal al fuego que se expande sin control humano, estos ocurren en zonas terrestres con cobertura vegetal que no tienen uso agrícola ni urbano (Pausas, 2020), alterando el paisaje y ecosistemas desde tiempos ancestrales (Castillo, 2003).

2.1.2 Origen

Su origen suele suceder por causas naturales como épocas de sequías, rayos de tormentas secas y erupciones volcánicas, pero, frecuentemente es ocasionado por la negligencia humana, y son más voraces que los que ocurren de manera natural (Mataix y Guerrero, 2007).

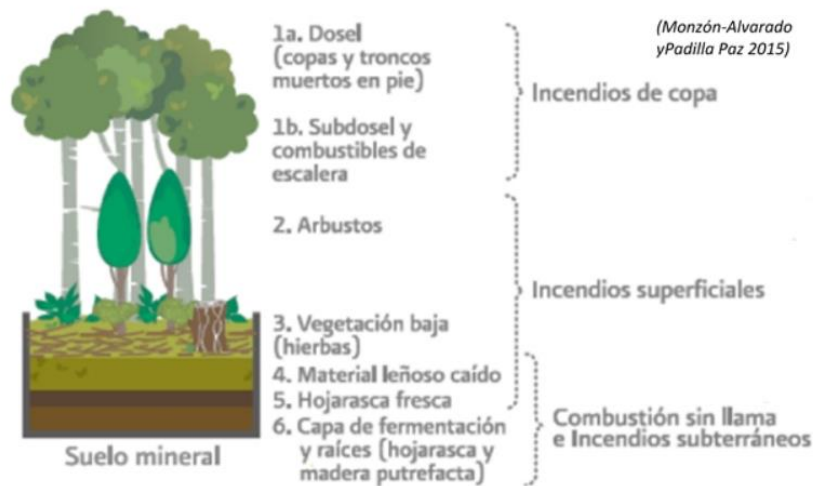
2.1.3 Clasificación

El material vegetal como hojas caídas, ramas y otras biomásas, se les denomina combustibles y tienen la capacidad prenderse en fuego después de ser expuesto al calor, entonces según (Sánchez, 1991), podemos clasificar los incendios forestales basándonos en el estrato en que se encuentra el combustible en las siguientes categorías:

- a) Fuego de superficie, el cual afecta a al lecho del bosque por la combustión de ramas, pasto, arboles pequeños, arbustos, matorral.
- b) Fuego de copa, perjudica a nivel de árboles debido a que se da en la parte superior de los árboles, se suele desarrollar este incendio en conjunto con un fuego de superficie.
- c) Fuego de subsuelo, este tipo de incendio afecta a los suelos pues avanzan por el sistema radicular. Su extinción es dificultosa debido a que no es muy visible y se propaga lentamente.

Figura 10.

Clasificación de acuerdo al combustible.



Nota. Se presentan los tres tipos de incendios. Tomado de *Guía para modelos de combustible de comportamiento de fuego en ecosistemas tropicales* (p. 4) por Tricone y Anderson, 2018.

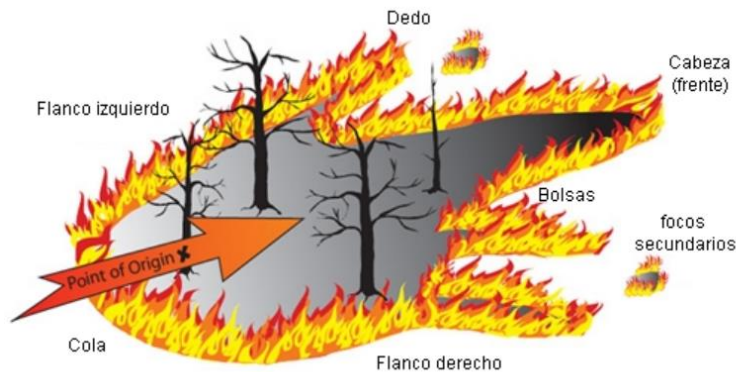
2.1.4 Anatomía

Para entender cómo se extiende el fuego en los incendios forestales, es importante diferenciar los elementos que componen la llama, los cuales son tres: fuego de frente, cola y flancos (Velázquez, 2013), y se los describe a continuación:

- Fuego de frente; tiene la tasa de propagación alta, al encontrarse en la parte delantera del fuego se beneficia del viento.
- Fuego de cola: tiene tasa de propagación baja, y como indica su nombre es la parte de atrás del fuego.
- Fuego de flancos: es la parte lateral del fuego, y suele estar en transición a fuego de frente y fuego de cola dependiendo la dirección del viento.

Figura 11.

Partes de un incendio.



Nota. Se presentan cabeza, flancos y cola de un incendio forestal. Tomado de *Guía para modelos de combustible de comportamiento de fuego en ecosistemas tropicales* (p. 3) por Tricone y Anderson, 2018.

Consecuencias

Dependiendo la intensidad y frecuencia con que ocurra un incendio forestal, puede tener diversas consecuencias como la fertilización del suelo, y en otros casos puede llegar a ocasionar efectos negativos como la desertificación, erosión del suelo y pérdida de ecosistemas. Estos efectos negativos significan cuantiosas pérdidas económicas (Rodenés, 2017).

2.2 Mecanismos que influyen en la propagación del incendio

El clima es determinante dado que de este factor depende la vegetación que exista en cada zona, en Quito por sus bajas temperaturas y constantes lluvias existen varios tipos de vegetación como por ejemplo la boscosa, paramos, matorrales secos, entre otros (MECN, 2015). Es importante conocer el tipo de vegetación, porque es el único factor que puede ser controlado por el ser humano a diferencia de otros factores que influyen en el punto de ignición y comportamiento de un incendio forestal como lluvia, viento, temperatura y topografía.

Figura 12.

Triada del fuego.



Nota. Se presentan factores para que se inicie un incendio (topografía, clima y combustibles). Tomado de *Guía para modelos de combustible de comportamiento de fuego en ecosistemas tropicales* (p. 1) por Tricone y Anderson, 2018.

Topografía

Los incendios tienen una mejor propagación en terrenos inclinados debido a la columna de convección, es por ello que es importante estudiar la pendiente porque entre mayor inclinación haya, la posibilidad de que el incendio se eleve a copas es mayor, por último, influye también en la velocidad del viento pues se propaga más rápido la llama en terrenos inclinados que en planos.

Las barreras que haya en el terreno también jugarán un papel importante en la propagación del incendio, ya sean naturales o artificiales detendrán al fuego porque actúan como obstáculo.

2.2.1 Combustibles

Es importante la influencia de los vegetales vivos o muertos debido a que esta vegetación clasificará y caracterizará al combustible, y van a existir en relación a la exposición al sol, latitud, clima, actividad Bonilla (2001) nos menciona los tipos de combustibles:

- Ligeros
- pesados
- y verdes

Podemos clasificar a los combustibles de acuerdo a su ubicación de la siguiente manera: superficiales los que se encuentran hasta una altura de metro y medio, de copas los que sobrepasan el metro y medio, mientras que los que se encuentran a nivel de suelo como las raíces son subterráneos. Cuando la continuidad en sentido horizontal es de manera uniforme el fuego se expande libremente mientras que si no es uniforme la continuidad el fuego puede llegar a extinguirse más fácilmente.

2.2.2 Factores atmosféricos

Los factores que están en relación con el riesgo de que inicie y se propague un incendio son la temperatura, viento y humedad. Por ello se debe mantener un control mediante los registros meteorológicos que se tenga disponible.

La temperatura influye debido a no solo calienta el aire sino también los combustibles haciendo que la humedad de estos vaya disminuyendo al igual que la humedad del medioambiente, facilitando que se inicie un incendio.

El aire y los vegetales intercambian humedad, es por esto que el vapor de agua que se encuentra presente en el ambiente influye en si un combustible esta seco o presenta cierto porcentaje de humedad, porque los vegetales secos absorben humedad del ambiente.

Y, el viento por su parte aporta oxígeno al fuego, menciona Bonilla (2001) que este factor atmosférico se encarga de transportar por el aire pequeñas chispas y material del incendio hacia otros lados pudiendo dar inicio a un nuevo incendio, además, tiene dos características importantes a tomar en cuenta ante un incendio: dirección y velocidad, debido a que estas características direccionaran el fuego e influirá en el avance del mismo.

2.3 Modelamiento de incendios forestales

Actualmente existen variedad de modelos que predicen el comportamiento del fuego generalmente su velocidad de propagación e intensidad, y ayudan a obtener dimensiones de la llama. Cada modelamiento para la propagación del fuego toma un enfoque diferente respecto a las características del incendio forestal y utiliza métodos distintos también (Guzmán et al.,2013), tenemos las siguientes categorías de modelos: físicos, empíricos y semi empíricos o mixtos.

El incendio forestal tiene dos competentes, la parte física y química, procesos que ocurren durante la combustión, estos modelos se representan mediante ecuaciones numéricas que surgen de las leyes físicas para poder predecir la propagación de un incendio. Sus ecuaciones son complejas. Este tipo de modelos son lentos a escala real por lo que no son muy usados.

Y los modelos empíricos se basan en la observación ya sea mediante laboratorio, o quemas ocurridas en campo, estudian las relaciones que se producen entre la vegetación y el incendio, mediante datos obtenidos de la observación y cálculos sencillos permite aproximar el comportamiento que tendrá el fuego.

Se suele usar la representación a nivel de paisaje para un mayor entendimiento, esto con ayuda de programas computacionales (Velázquez, 2013), aplicando conocimientos experimentales y teóricos, llamados semi empíricos siendo el más utilizado el modelo de Rothermel (1972) (Guzmán et al.,2013)

2.3.1 Modelo de Rothermel

Este modelo semi empírico ha sido aceptado mayormente para crear programas de simulación como Behave, FARSITE y FlamMap que sirven para predecir la tasa de propagación, la intensidad de fuego y la longitud de la llama (Ervilha et al., 2017).

Los datos de entrada necesarios para este modelo, son de combustibles, topográficos y meteorológicos. Para tener un mejor entendimiento los datos de combustibles comprenden el

tipo de combustible y la humedad del mismo, mientras que los datos topográficos se tratan de la pendiente y características del terreno, y la velocidad del viento hace referencia a datos meteorológicos.

Este modelo de propagación de fuego relaciona el calor que hay entre el calor que recibe el combustible y el calor que se necesita para empezar el incendio, y se lo define de acuerdo a Andrews (2018) mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \phi_W + \phi_S)}{\rho_B \varepsilon Q_{ig}}$$

donde:

R = Velocidad de propagación (m/min)

I_R = Intensidad de la reacción ($\frac{J}{m^2 \min}$)

ξ = Fracción del flujo de propagación (adimensional)

ϕ_W = Coeficiente para evaluar el efecto del viento sobre la propagación del frente

ϕ_S = Coeficiente evaluador del efecto de la pendiente del terreno en la propagación del fuego.

ρ_B = Densidad aparente del combustible seco ($\frac{kg}{m^3}$)

ε = Número de calentamiento efectivo en la ignición (adimensional)

Q_{ig} = Calor de ignición ($\frac{J}{kg}$)

Esta ecuación la determinó Rothermel en ecuaciones que las dedujo de la experimentación y es útil para propagación de fuego en superficies.

2.4 Mitigación y prevención de incendios forestales

El modelamiento de un incendio se incorpora a la mitigación, ya que la predicción realizada en estos programas ayuda a la toma de decisiones sobre los recursos asignados para prevenir y extinguir un incendio, creando prácticas a utilizar para modificar la vegetación con el fin de disminuir el riesgo de incendios, para modificar características de la vegetación, también

se puede generar barreras estructurales o no estructurales, y quemas prescritas, estos proyectos de mitigación se pueden diseñar mediante una simulación empleando tecnologías de información geográfica (Chuviecoa et al.,2007), para determinar qué porcentaje de éxito tendrá sobre el paisaje que será sometido, de tal manera se mejora la gestión y se ahorra recursos económicos.

2.4.1 Cortafuegos

Se diseña con el objetivo de crear límites para frenar los incendios o evitar su propagación debido a que son espacios libres de combustibles vegetales y pueden ser creados o artificiales como por ejemplo caminos o áreas con siembras estratégicas, o naturales como ríos o terrenos que presentan características especiales con poca vegetación como desiertos.

2.4.2 Barreras Vivas

La barrera vegetativa es un método para mitigar los incendios forestales, se trata de franja de vegetación con una pequeña cantidad de combustible que tienen el objetivo de separar zonas pobladas de árboles de zonas compuestas por arbustos densos que significan que son combustibles más inflamables, además ayuda a crear áreas más pequeñas dentro del bosque, generalmente se trata de franjas de pasto debido a que es fácil de controlar, reducir y además presenta mayor resistencia ante el fuego, esto se realiza a fin de eliminar combustibles vegetales pesados como bosques y arbustos, con esto se logra interrumpir el incendio cuando se presenta. El uso de este tipo de corta fuego es recomendable por su costo además que ayuda a prevenir la erosión del suelo.

“Las barreras cortafuego herbáceas son, por consiguiente, instalaciones permanentes de pre-ataque, ubicadas estratégicamente para la lucha contra posibles incendios” (Green y Bentley, 1967).

Las vías a de más de permitir tener acceso para combatir el fuego, ayudan a separar las secciones y que el incendio no continúe extendiéndose a superficies mayores.

Figura 13.

Barrera natural frente al fuego



Nota: Se evidencia una barrera viva compuesta por pasto, que también sirve como camino. Tomado de *Cortafuegos abierto y saneado* [Fotografía] por Chirivella. L, 2017, Las provincias (<https://bit.ly/3Ors4Ze>).

2.4.3. *Quema prescrita*

Esta herramienta ayuda a controlar la vegetación que es inflamable en un incendio, reduciendo su carga como combustible (Hidalgo, 2000), se trata de quemas que se planifican basándose en la predicción del comportamiento del incendio con ayuda de algún software, las quemas se realizan a fin reducir el riesgo de que un incendio abra paso, y en caso de inicie un

incendio, se logre controlar más rápido y no genere consecuencias graves debido a que al momento de reducir los combustibles la propagación e intensidad de un incendio se ve afectada porque es directamente proporcional al porcentaje de combustibles que haya en el terreno.

Para lograr su objetivo se debe tener en cuenta el tipo de combustible que hay en el área a ser quemada, la topografía y el clima en los días que se vaya a llevar a cabo, para poder aplicar métodos adecuados a las características que se presenten (Pérez, 2018). Además, menciona Becerra et. Al (2004) que esta práctica no solo ayuda con el control de incendios, si no también que es útil para la regeneración de algunas especies de manera natural.

Figura 14.

Quema prescrita



Nota: Se muestra una quema controlada realizada en Australia. Adaptado de An Analysis of the Australian Literature on Prescribed Burning (p. 31-37), por B. Oliveras, 2008, Journal of Forestry, 106

2.5 Modelos de combustibles

Un modelo de combustibles sirve para la predicción de incendios, siendo un conjunto de entradas de los tipos de combustibles, los modelos de combustibles son 13 modelos estándar que fueron definidos por Anderson que más adelante Scott y Burgan ampliarían a 40 modelos

(Domènech, 2013), aunque se puede definir un modelo nuevo para una región con vegetación diferente a la de Estados Unidos.

Los modelos se definieron en base a las características de los combustibles, las propiedades que se toma en cuenta en los modelos de combustibles varían de acuerdo al programa computacional y al modelo de propagación de incendio, se menciona a continuación las propiedades para propagación de fuego para superficies:

- Diámetro de la materia orgánica muerta que se clasifica de acuerdo a su punto de ignición 1h, 10h o 100h.
- Carga de combustible de material vivo y muerto que con el contenido calórico sobre unidad de masa es un indicador de la energía que puede a llegar a liberar el material [kg/m²]
- Relación de área superficial con relación al volumen, indica el grosor de la materia orgánica y sirve para determinar la resistencia de un combustible frente al fuego [m⁻¹]
- Contenido calórico es la energía que llega a liberar un combustible vegetal durante la combustión[kJ/kg].
- Profundidad del combustible, se trata de la dimensión vertical del lecho. [m]
- Humedad de extinción del lecho de combustible.

2.6 Modelos elegidos

Los modelos de combustibles utilizados son Anderson y Scott-Burgan de manera combinada para obtener una caracterización de la vegetación de manera más heterogénea, además se eligen estos modelos porque son compatibles como entradas en FlamMap que usa modelos de propagación de incendios de superficies.

2.6.1 Anderson

Estos modelos en un inicio fueron 11 los cuales fueron desarrollados por Rothermel, posteriormente, Albini en 1976 modificó y completo este modelo añadiendo 2 modelos más, finalmente Anderson realizo una compilación de estos modelos de combustibles acompañado de fotografías para un mejorar la comprensión del lector y pueda elegir correctamente el modelo.

Tabla 2 *Modelo de combustibles de Anderson (1981)*

Modelo	Modelo de combustible	Descripción	Profundidad (m)
	1	Pasto corto y seco, se propaga el fuego rápidamente por hierba fina. Llega a cubrir hasta un tercio de la superficie.	0.3048
PASTO	2	Pastizal, la propagación del fuego es rápida es por hierba fina o muerta. Cubre la superficie entre un tercio y dos tercios	0.3048

Tabla 2 *Modelo de combustibles de Anderson (1981)*

	Pasto alto y espeso, la propagación se da por medio de cuerpos de agua pequeños.	0.762
3	Cubre más de un metro de la superficie.	
	Matorral denso, el fuego se propaga rápidamente sobre copas que contienen ramas.	1.8
4	La superficie se cubre de matorral joven, poco material muerto por lo que la llama no es tan intensa.	
5	Modelo similar al 5, con la diferencia que el matorral es más alto.	0.6
MATORRAL		
6	Se presenta mayor inflamabilidad de los matorrales.	0,7
7	Superficie semi cubierta de hojas caídas, presencia de coníferas de punta corta.	0.06
8	La superficie esta cubierta por una capa esponjosa de hojas caídas de coníferas de punta.	
9		0.06
ÁRBOL		

Tabla 2 *Modelo de combustibles de Anderson (1981)*

TALA	10	En la superficie se encuentra restos leñosos y vegetación herbácea.	0.3
	11	Bosque compuesto por leves restos de tala que forma una capa de poca altura. Fuego activo.	0.3
	12	Capa con mayor altura que el modelo 11 formada de restos de tala. Se presenta fuego intenso.	0.7
	13	Restos de tala gruesos, los diámetros llegan a ser mayor a 0,75 m, cubre la superficie del suelo totalmente. El fuego es prolongado y se propaga rápidamente	0.9

Nota. Se detalla los 13 modelos de combustibles con características de material seco.

Tomado de (Anderson, 1981). Adaptado: por la Autora, 2022

2.6.2 Scott-Burgan

Los modelos detallados anteriormente presentan limitaciones debido a que no toma en cuenta la humedad que pueden a llegar presentar los combustibles debido a las diferentes estaciones climáticas que se pueden presentar al momento del incendio forestal.

Es por ello que, en el año 2005, Scott y Burgan crean 40 modelos más 5 modelos no quemables, que se los puede usar en cualquier estación del año según mencionan los autores

Tricone y Anderson (2018) esto gracias a que se añadió humedad dinámica al combustible con la finalidad de que las simulaciones sean más confiables.

Este conjunto de modelo es dinámico porque contiene materia viva y muerta, a continuación, se describe brevemente los modelos herbáceos de Scott&Burgan (2005) en categorías.

Tabla 3 Modelos de combustibles Scott-Burgan dividido en categorías.

	Modelo	Código	Descripción
	101	GR1	Pasto corto, irregular y pastado. La propagación de fuego es moderada, mientras que la longitud de llama es baja.
	102	GR2	Pasto moderadamente grueso y continuo, profundidad aproximada 0.30 m. La propagación de fuego es alta, longitud de llama moderada
PASTO	103	GR3	Pasto muy grueso, profundidad de 0.61 m. Propagación alta, longitud de llama moderada.
	104	GR4	Pasto grueso y continuo, profundidad aproximada de 0.61 m. La propagación de fuego es muy alta, la llama tiene longitud alta.
	105	GR5	Pasto grueso y espesa, profundidad de 0.30 a 0.61 m. Propagación de fuego muy alto y longitud de llama alta.
	105	GR6	Pasto de tierra seca, profundidad entre

			0.30 y 0.61 m. La propagación de fuego es muy alta y la longitud de llama es alta
			Pasto ligeramente grueso y continuo, profundidad aproximada de 0.91 m. La propagación del fuego es muy alta, la llama tiene longitud alta.
	107	GR7	
			Pasto denso, grueso y continuo con profundidad entre 0.91 y 1.52 m. la propagación de fuego es muy alta, longitud de llama muy alta.
	108	GR8	
			Pasto continuo, grueso y muy pesado, profundidad entre 1.52 y 2.44 m. Propagación extrema, y longitud de llama extrema.
	109	GR9	
			Los arbustos miden alrededor de 0.3 m de alto, poca carga de hierba. Tasa de propagación moderada;
	121	GS1	longitud de llama baja.
PASTO			Los arbustos son de 0.3 a 0.91 m de altura, carga moderada de hierba. Tasa de dispersión alta;
ARBUSTO	122	GS2	longitud de llama moderada
			Carga moderada de pasto/arbustos, profundidad promedio de pasto/arbustos de menos de 0.61 m.
	123	GS3	

			Tasa de dispersión alta; longitud de llama moderada
	124	GS4	Carga pesada de pasto/arbustos, profundidad superior a 0.61 m. Tasa de dispersión alta; longitud de llama muy alta.
	141	SH1	Baja carga de combustible de arbustos, profundidad del lecho de combustible de aproximadamente 0.30 m; algo de hierba puede ser presente. Tasa de dispersión muy baja; longitud de llama muy baja.
	142	SH2	Carga de combustible moderada (superior a SH1), profundidad de aproximadamente 0.30 m, sin césped
ARBUSTO			combustible presente. Tasa de dispersión baja; longitud de llama baja.
	143	SH3	Carga de arbustos moderada, posiblemente con cubierta de pinos o combustible herbáceo, profundidad del lecho de combustible de 0.6 a 0.9 m. Tasa de dispersión baja; longitud de llama baja.
	144	SH4	Carga de arbustos y hojarasca de baja a moderada, posiblemente con un dosel de

		pinos,
		profundidad de la cama de combustible alrededor de 0.9 m. Tasa de dispersión alta; longitud de llama moderada
145	SH5	Carga pesada de arbustos, profundidad de 1.2 a 1.8 m. Tasa de propagación muy alta; fuego longitud muy alta.
146	SH6	Arbustos densos, poco o ningún combustible de hierbas, profundidad de aproximadamente 0.6 m. tasa de propagación alto; longitud de llama alta.
147	SH7	Carga muy pesada de arbustos, profundidad de 1.2 a 1.8 m. Tasa de propagación inferior a SH5, pero la longitud de la llama es similar. Tasa de dispersión alta; longitud de llama muy alta.
148	SH8	Arbustos densos, poco o ningún combustible de hierbas, profundidad de aproximadamente 0.9 m. Tarifas de propagación alto; longitud de llama alta.
149	SH9	Arbustos densos, finamente ramificados

			<p>con una cantidad significativa de combustible muerto fino, alrededor 1.2 a 1.8 m de altura; algo de combustible herbáceo puede estar presente. Tasa de propagación alta, longitud de llama muy alta.</p> <p>El lecho de combustible es una carga baja de hierba y/o arbustos con hojarasca.</p>
	161	TU1	<p>Tasa de dispersión baja; longitud de llama baja</p> <p>El lecho de combustible es una carga de hojarasca moderada con un componente de arbustos. tasa de propagación moderado; longitud de llama baja.</p>
	162	TU2	<p>El lecho de combustible es una carga de hojarasca moderada con componentes de pasto y arbustos.</p>
SOTOBOSQUE	163	TU3	<p>Tasa de dispersión alta; longitud de llama moderada</p> <p>El lecho de combustible son árboles de coníferas bajos con sotobosque de hierba o musgo. Tasa de propagación moderada; longitud de llama moderada.</p>
	164	TU4	<p>El lecho de combustible es basura de coníferas de alta carga con sotobosque de</p>
	165	TU5	

			arbustos. tasa de propagación moderado; longitud de llama moderada.
			Carga ligera a moderada, combustibles de 0.3 a 0.6 m de profundidad. Tasa de dispersión muy baja; longitud de llama muy baja
	181	TL1	
			Baja carga, compacto. Tasa de dispersión muy baja; longitud de llama muy baja.
	182	TL2	
			El lecho de combustible es una carga de hojarasca moderada con componentes de pasto y arbustos. Tasa de dispersión alta; longitud de llama moderada.
	183	TL3	
HOJARASCA			El lecho de combustible son árboles de coníferas bajos con sotobosque de hierba o musgo. Propagación moderada; longitud de llama moderada.
DE BOSQUE	184	TL4	
			El lecho de combustible es basura de coníferas de alta carga con sotobosque arbustivo. tasa de propagación moderado; longitud de llama moderada.
	185	TL5	
			Carga moderada, menos compacta. Tasa de propagación moderada; longitud de llama baja.
	186	TL6	
			Carga pesada, incluye troncos caídos de mayor diámetro. Propagación baja;
	187	TL7	

			longitud de llama baja.
			La carga moderada y la compacidad pueden incluir una pequeña cantidad de carga herbácea. Tasa de propagación moderada; longitud de llama baja.
	188	TL8	
			Carga muy alta, esponjoso. Tasa de propagación moderada; longitud de la llama moderada.
	189	TL9	
			La carga de combustible fino es de 24.7 a 49.4 t/ha, ponderada hacia combustibles de 0.3 a 0.9 m de diámetro, la profundidad es inferior a 0.3 m. Tasa de propagación moderada; longitud de la llama bajo
	201	SB1	
			La carga de combustible fino es de 17.3 a 29.7 t/ha, distribuida uniformemente entre diámetros de 0 a 0.64, 0.64 a 2.5, y
RESIDUOS			
TALA Y			
ESCOMBROS	202	SB2	2.5 a 7.5 cm, la profundidad es de aproximadamente 0.30 m. La tasa de propagación es moderada; longitud de llama moderada.
	203	SB3	La carga de combustible fino es de 17.3 a 29.7 t/ha, con 0 a 0.64 cm de diámetro, la profundidad es más de 0.30 m. Tasa de propagación es alta; longitud de la llama

			alta
			Los escombros son la totalidad, la cama de combustible no está compactada, el follaje aún está adherido.
	204	SB4	Tasa de propagación muy alta; longitud de llama muy alta.
			Desarrollo urbano o suburbano;
	91	NB1	insuficiente combustible forestal para transportar incendio forestal
AMBIENTES			
	92	NB2	Hielo/nieve.
NO			
QUEMABLES			
	93	NB3	Campo agrícola, mantenido en condiciones no combustibles.
	98	NB8	Cuerpos hídricos.
	99	NB9	Suelo descubierto.

Nota. Se presenta el costo de la inversión para el desarrollo del proyecto experimental.

Tomado de (Scott&Burgan, 2005). Adaptado: por la autora, 2022

2.7 Simuladores

Es conveniente que las autoridades encargadas de la gestión urbana usen herramientas para analizar incendios forestales pues les facilitará tomar decisiones respecto a la planificación urbana, planificar programas de prevención en las zonas susceptibles, capacitarse ante estos eventos y sus consecuencias. Es importante estudiar la meteorología, la variabilidad climática, la topografía y los combustibles vegetales del DMQ porque así se puede conocer las consecuencias que puede provocar incendio forestal, porque zonas tiene más facilidad de extenderse, además se puede trazar una ruta aérea o por la tierra para extinguir un incendio basándonos en la topografía, es determinante conocer además la situación meteorológica del lugar donde se esté presentando un incendio porque se relaciona directamente con el progreso

de este tipo de eventos, la humedad que existe en los combustibles y puede también interferir en el proceso de apagar un incendio las condiciones de la atmosfera, por otro lado conocer los combustibles es determinante porque por medio de ellos se propaga el fuego.

Es por ello que los programas destinados a la simulación de incendios forestales a través de una computadora para contribuir en el estudio de estos, trabajan con datos de las variantes anteriormente descritas, para de proceder a recrear un incendio forestal y crear alternativas de soluciones que pudieron aplicarse en el pasado, y que se pueden aplicar en eventos similares en el futuro.

Hay varias técnicas de simulación para incendios forestales, ArcGIS es un sistema de información geográfica el cual permite al usuario tratar la información como topografía para que pueda ser ingresada a un software de simulación, por ejemplo, a la aplicación FlamMAP, “que es un programa de mapeo y análisis del comportamiento del fuego que calcula las características potenciales del comportamiento del fuego (tasa de propagación, longitud de la llama, intensidad de la línea de fuego, etc.)” (Finney, 2006). “Cabe recalcar que las simulaciones deben ser validadas, de manera que la metodología que se está utilizando compruebe que puede usarse como un modelo predictivo en condiciones reales, para estos eventos” (Hees, 2013).

En este trabajo se usará los softwares ArcGIS y FlamMAP, a partir de datos topográficos, meteorológicos y de vegetación presente, para poder simular la propagación de un incendio forestal. Para poder validar la simulación se comparará la extensión obtenida el FlamMAP con el incendio real, además para complementar la metodología se simulará posibles alternativas para evitar y contener los incendios con la finalidad mitigar las consecuencias que puedan causar estos eventos.

2.8 Software Utilizados

2.8.1 *FlamMap*

“Es un sistema de mapeo y análisis de incendios que calcula el comportamiento del fuego para cada píxel dentro del archivo del paisaje de forma independiente, por lo que no calcula el fuego que se extiende a lo largo de un paisaje” (Finney, 2006). Este es un software que se usa para la propagación de fuego, iniciación de fuego en la corona y propagación del fuego en la corona, para lo cual usa los modelos de Rothermel 1972, Rothermel 1991 y Nelson 2000 respectivamente. Además, en conjunto con los modelos ya mencionados incorpora los siguientes modelos según Mollocana et al (2021), mencionados a continuación:

- Modelo de propagación del fuego en la superficie de Rothermel (1972),
- Modelo de iniciación de fuego de copa de Van Wagner (1977),
- Modelo de propagación de incendios de copa de Rothermel (1991),
- Modelo de detección de Albin (1979),
- Método de cálculo de fuego de copa de Finney (1998) o Scott y Reinhardt (2001), y
- Modelo de humedad de combustible muerto de Nelson (2000).

Esto permite acondicionar los combustibles muertos en cada píxel en función de la pendiente, el sombreado, la elevación, el aspecto y el clima.

“Una limitante de este programa comúnmente usado para apoyar actividades destinadas a controlar incendios, es que no simula variaciones temporales en el comportamiento del fuego causadas por las fluctuaciones climáticas y diurnas” (United State Department of Agriculture, 2019)

2.8.2 Capas de entrada de FlamMap

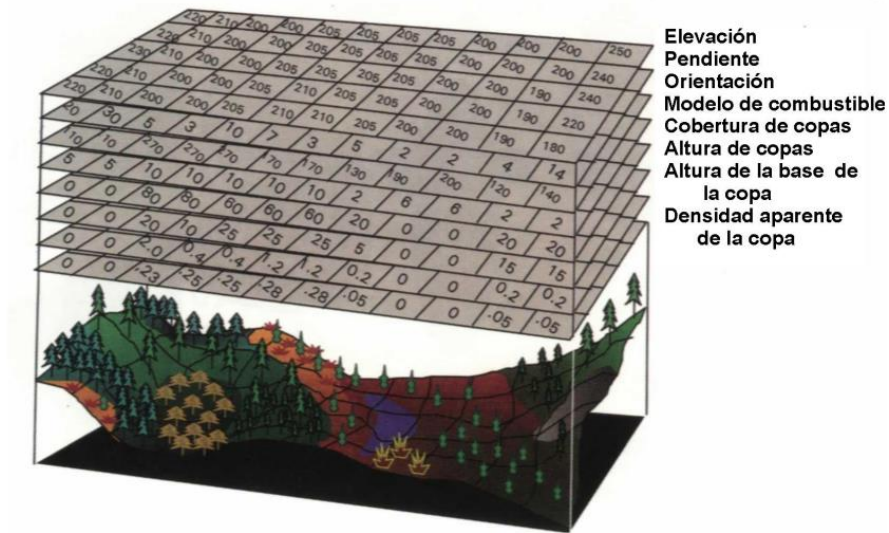
Menciona Finney (2006) que este programa para crear un archivo de paisaje requiere de las siguientes entradas:

- Topográfico (Elevación, Pendiente, Orientación)
- Modelos de Combustible de Comportamiento del Fuego
- Cubierta del dosel del bosque
- Altura del dosel del bosque

- Altura de la base del dosel del bosque
- Densidad aparente de la dosis anticipada

Figura 15.

Capas del archivo LANDSCAPE



Nota. Se presentan imagen con los raster de entrada para FlamMap. Adaptado de An Analysis of the Australian Literature on Prescribed Burning (p. 31-37), por B. Oliveras, 2008, Journal of Forestry, 106

Sin embargo, nos mencionan Mollocana et al (2021) que se puede crear un archivo de paisaje valido con cinco entradas:

- Elevación
- Mapa de pendientes
- Mapa de orientación
- Cobertura vegetal
- Modelo de combustibles

Es importante que todos los raster tengan el mismo tamaño de pixeles, que coincidan las celdas y cubran la misma zona que se está trabajando.

2.8.3 ArcGIS

Es un sistema para crear y utilizar sistemas de información geográfica, este programa permitirá crear los raster que será empleados como entrada en FlamMap.

2.9 Quito

El DMQ, se localiza en la provincia Pichincha, su extensión es de 4240 km cuadrados, por gran extensión y por estar situado en los Andes, posee variedad de climas y amplia biodiversidad.

2.9.1 Incendios forestales en Quito

La época de verano en el Ecuador se presenta entre los meses julio y agosto, el DMQ es susceptible a la ocurran incendios forestales recurrentemente debido a que es esos meses no existe no existen lluvias y por ende la temperatura ambiente suele estar por encima la temperatura media que registra el INAMHI en el año, sin embargo desde el año 2010 las épocas de verano e invierno como tal han sido inconsistentes en cuanto a su duración provocando épocas de fuertes lluvias y de sequias, lo que ha provocado que los incendios sean frecuentes en esta ciudad (Estacio, y Narváez, 2012).

El año anterior se registró en la época de verano 206 incendios, la flora y fauna de estas zonas puede tardar hasta 10 años en recuperarse.

2.9.2 Zonas susceptibles a forestales en Quito

El tener datos sobre eventos ocurridos anteriormente ayuda a delimitar las zonas susceptibles a incendios forestales. Es importante localizar estas áreas mediante la creación de mapas de riesgo, para mantener un monitoreo en aquellos territorios.

Las zonas con alto grado de inflamabilidad y combustibilidad hacen que se las denomine susceptibles ante incendios forestales, y estas zonas pueden cambiar espacialmente, y de condiciones como la temperatura o humedad, es por ello la necesidad de mantener un constante monitoreo por la variabilidad de las condiciones.

En un estudio realizado por el Municipio del DMQ (2020), se definió como zonas más propensas a incendios forestales a los bosques que se encuentran en la parte oriental, los bosques centrales y los que recorren de norte a sur la ciudad.

Tabla 4.

Sectores susceptibles a incendios en el DMQ en el año 2020

Sector
Parroquia Atahualpa
Parroquia Puéllaro
Cerro Puntas
Cashaloma, Itulcachi, Inga, Anga y Anga Alto
Lalagachi Alto y Cerro Cuturco
San José de Minas
Laguna de Mojanda: Barrio Mojanda Chico
Parque Nacional Cayambe Coca
Pululahua
Casitahua, Rumiloma, Rayocucho y Yunguillas
Catzuquí de Velasco, Colinas del Norte y Pisulí
Protección El Condado, Rancho Alto, Rancho San Antonio, San José Obrero y Tenerías Alto
Oyacoto, San Francisco de Oyacoto
Zámbiza y Nayón
El Armero, parque Teleférico, Santa Clara y San Millán
Protección San Juan y Atucucho
Protección Monjas, Panecillo y el Trébol
Cerro Auqui. Av. Simón Bolívar entrada a Guápulo

Lumbisí, entrada a la Universidad Internacional

Iguñaro, San José del Quinche, San Vicente del Quinche

Tababela y Guambi

Chaupi Molino, El Chiche y El Arenal (polígono de tiro)

Cerro Ilaló: La Toglla, Sorialoma, Guagopolo, Angamarca, La Mercerd y Cruz de Ilaló

Amaguaña: Balvinas, Cuendina, Protección Pasochoa

Píntag (vía Píntag, Sincholagua, Reserva Antisana)

Guayllabamba

Conocoto: Camino antiguo de Conocoto, Ontaneda, Monserat y San José del Valle

Protección La Libertad, La Libertad Alto y La Cantera

San Francisco de Churoloma y Collaquí

Atacazo

Lloa

Protección Chillogallo y Protección La Mena (Cerro Ungui)

Tablón (vía Papallacta)

Cochapamba, La Pulida y El Pinar Alto

Parque Itchimbía

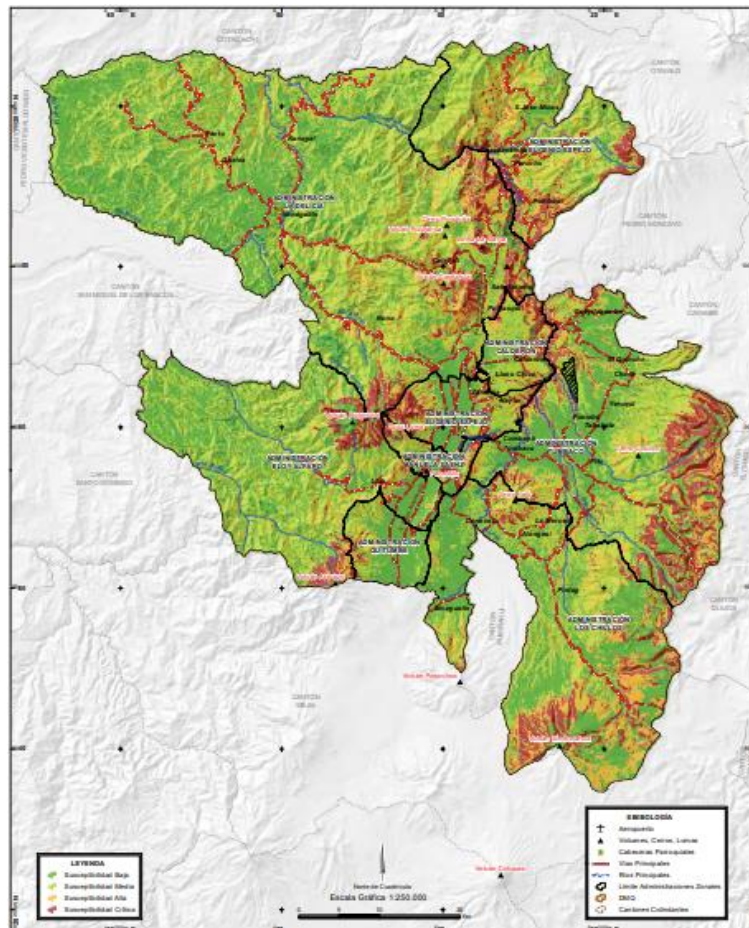
Parque Metropolitano Norte

Parque Metro Sur y El Troje

Nota. Se presenta Los sectores susceptibles a incendios forestales según el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (2020). Tomado de (MDMQ, 2020). Adaptado por la Autora, 2022

Figura 16.

Mapa de riesgo a incendios forestales



Nota. Adaptado de *Mapa 4- 5* de MDMQ, 2020, Atlas de Amenazas Naturales y Exposición de Infraestructura del Distrito Metropolitano de Quito.

2.9.3 Gestión para prevenir y mitigar incendios

En el DMQ se desea emplear la quema prescrita dentro del plan de mitigación que maneja, por ello en el año 2020 ha creado el plan piloto para quemas controladas que se lo realizara meses antes de la época de verano, se realizara las quemas con énfasis en los bosques ubicados en la parte norte occidental y norte central de la ciudad, los cuales son considerados

susceptibles a incendios según eventos pasados y de acuerdo a las características del combustible presente.

Para ello la municipalidad de Quito en conjunto con el Ministerio del Ambiente debe estudiar las zonas, y los combustibles disponibles.

2.9.4 Fuentes de información para modelado de medidas mitigación

Para realizar este trabajo, y generar simulaciones de mitigación para diferentes zonas susceptibles del DMQ, se utilizó información proporcionada por los siguientes entes gubernamentales y otras fuentes de libre acceso:

- INAMHI: Se trata del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología que se encarga de trabajar con la información meteorológica del Ecuador.
- REMMAQ: en la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico también se puede obtener los datos meteorológicos.
- IGM: El Instituto Geográfico Militar se encarga de generar datos geográficos del país, en base a las hojas topográficas se crearán los mapas de interés para FlamMap.
- MAGAP: El Ministerio de Agricultura y Ganadería contiene datos del tipo de vegetación y uso del suelo, aunque no está diseñada la información como datos para gestión de incendios, se puede adaptar para usar como información de combustibles en FlamMap.
- FIRMS: Es una página web de la NASA que contiene información sobre incendios que sirve para gestionar los recursos, tiene datos de incendios ocurridos a nivel mundial casi en tiempo real, además se puede visualizar incendios forestales pasados. Permite descargar la información en formato SHP, KML, TXT, WMS.
- OSM: OpenStreetMap, se usará para cargar los caminos, es un programa gratuito que ayuda a crear mapas a nivel mundial y también permite descargar los mapas creados por colaboración de usuarios. Permite descargar la información de mapas en distintos formatos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En base al mapa de Susceptibilidad a Incendios Forestales obtenido del Atlas de Amenazas Naturales y Exposición de Infraestructuras del Distrito Metropolitano de Quito se definió 9 zonas de estudio que presentan susceptibilidad alta y crítica, las cuales son San Antonio, Puellaro, Atahualpa, Sincholagua, Casitagua, Paschoa, Atacazo, Guagua Pichincha e Ijaló.

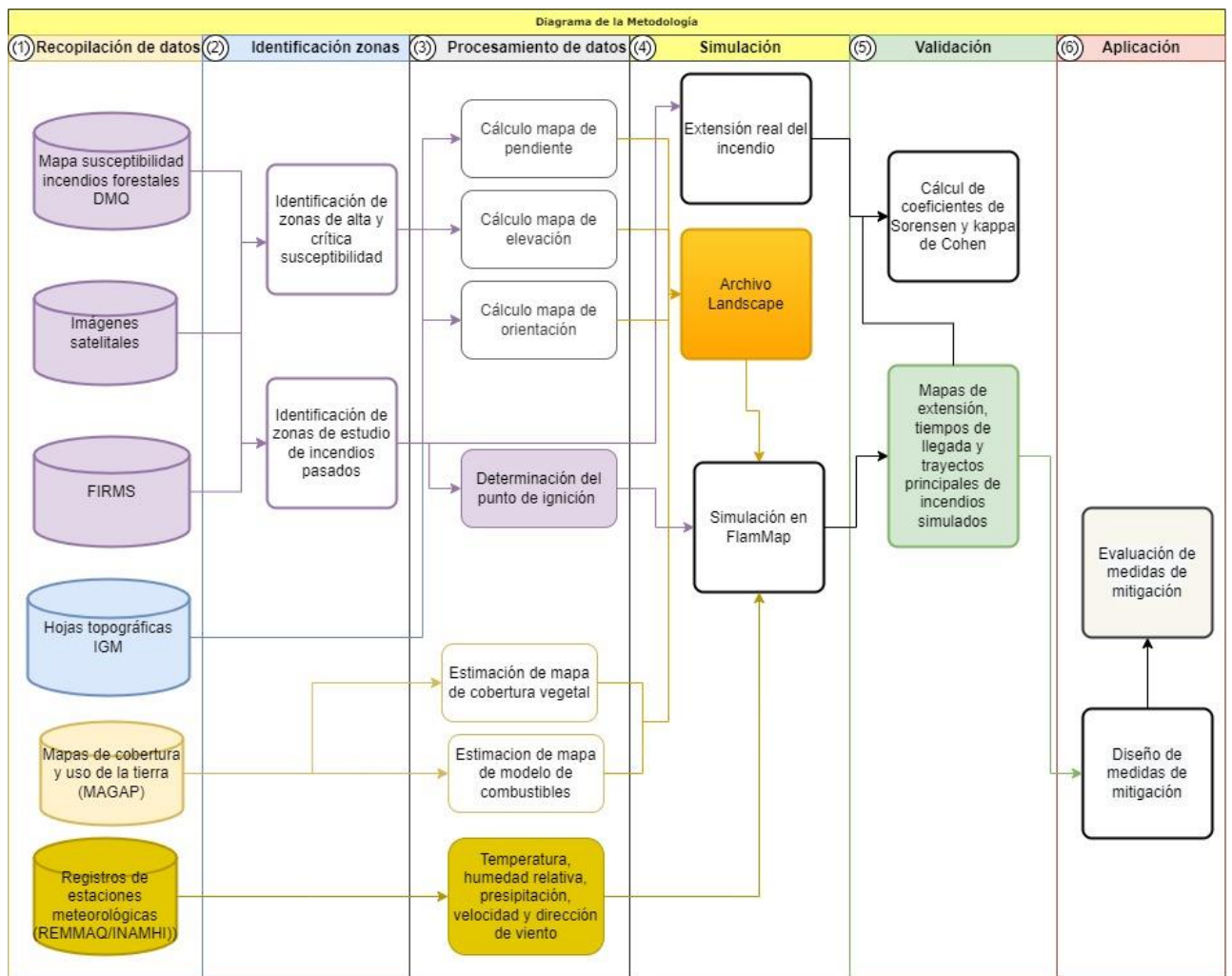
Para cada zona se obtuvo información topográfica desde el portal del Instituto Geográfico Nacional, sobre la cual se trabajó para generar ráster de altura, pendiente y orientación, mientras que del MAGAP se obtuvo el mapa de cobertura y uso de suelo que se lo utilizó para generar ráster de cobertura vegetal y de modelos de combustibles, finalmente la información meteorológica se obtuvo de las estaciones Carapungo, Guamaní, San Antonio, Tumbaco y El Camal pertenecientes a la REMMAQ, toda esta información es utilizada como entrada para generar la simulación en FlamMap, de las simulaciones se obtiene mapa de tiempo de llegada en minutos que permite determinar el área consumida por el incendio y shapes de los trayectos principales del incendio permite identificar los puntos donde se puede realizar tratamientos de combustibles para mitigar los incendios forestales.

Se evalúa las medidas de mitigación mediante una comparación de área de incendio con barrera vs área de incendio sin barrera, y obtener la diferencia de estas áreas para cuantificar cuantos m² disminuye el incendio. Además, se calcula los coeficientes de kappa Cohen y Sorensen para validar el modelo, como caso de estudio para incendio ocurrido se usa el cerro Casitagua.

El proceso, se describe a continuación en la Figura 17:

Figura 17.

Diagrama de metodología.



Nota. El diagrama muestra las fases a seguir para conseguir los objetivos planteados en este trabajo. Elaborado por la autora, 2022.

3.1 Zona de estudio

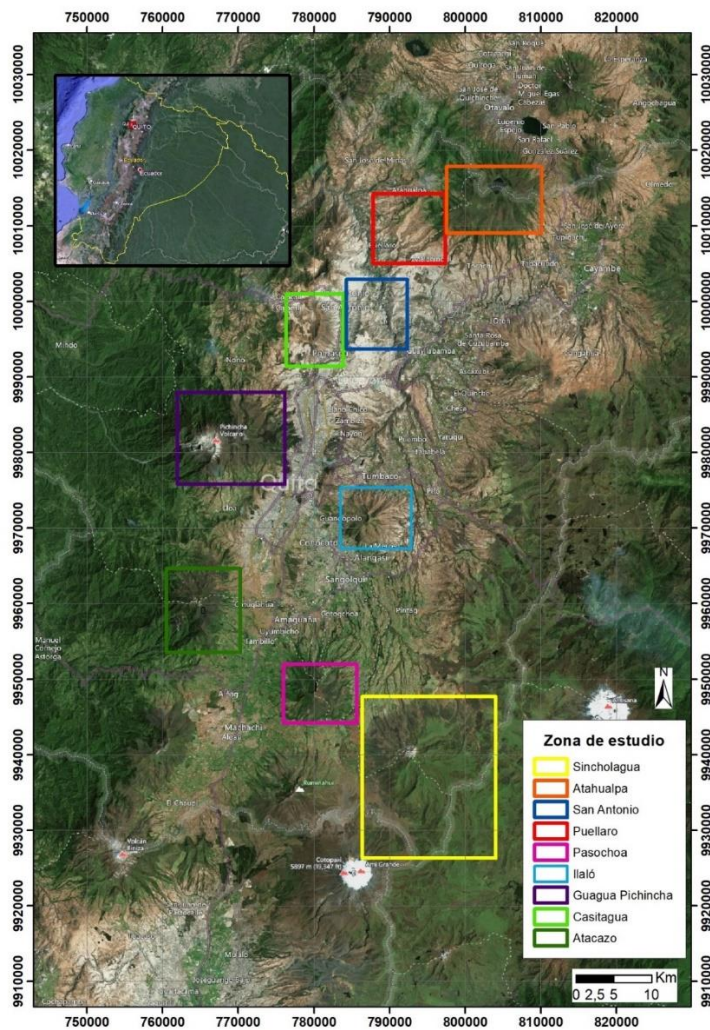
Para realizar el presente trabajo investigativo se ha seleccionado 9 zonas basadas en el mapa de susceptibilidad de incendios forestales del DMQ presentado en la Figura 18, con la finalidad de crear simulaciones de incendios en cada una de las zonas, estas zonas de estudio son:

- Volcán Pasochoa
- Volcán Atacazo

- Cerro Guagua Pichincha
- Volcán Casitahua
- Cerro Ilaló
- San Antonio
- Puellaro
- Pintag
- Atahualpa

Figura 18.

Zonas de estudio



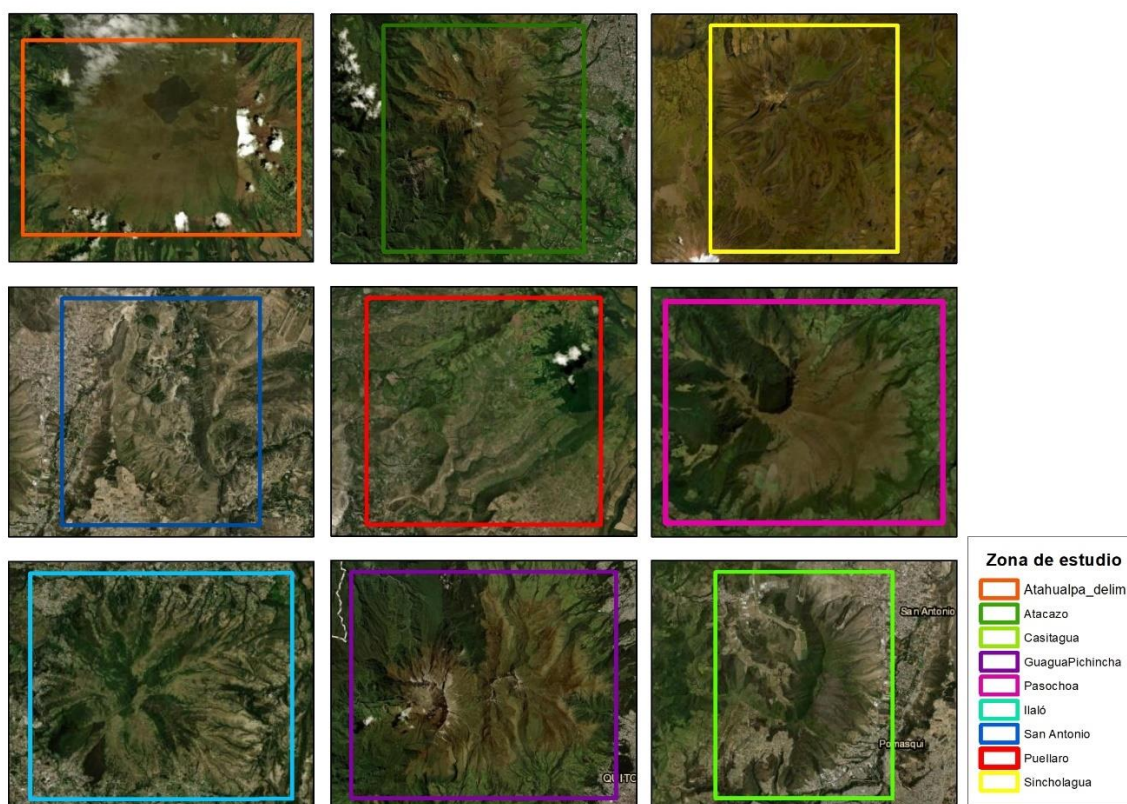
Nota. Mapa de ubicación de las zonas de estudio en el DMQ. Elaborado por la autora, 2022.

3.2 Delimitación de la zona

Se realizó la delimitación de cada zona de estudio determinando la presencia la cobertura vegetal propensa a incendios forestales de manera visual. La fecha seleccionada para realizar la simulación es del mes 01-07-2019 al 31-08-2029, debido a que estos meses pertenecen a la época de verano en Quito. Las fechas elegidas tienen gran importancia para estudiar la susceptibilidad antes incendios forestales

Figura 19.

Zonas de estudio



Nota: Se puede apreciar en el mapa la zona de estudio. Elaborado por la autora, 2022.

3.3 Recopilación de información

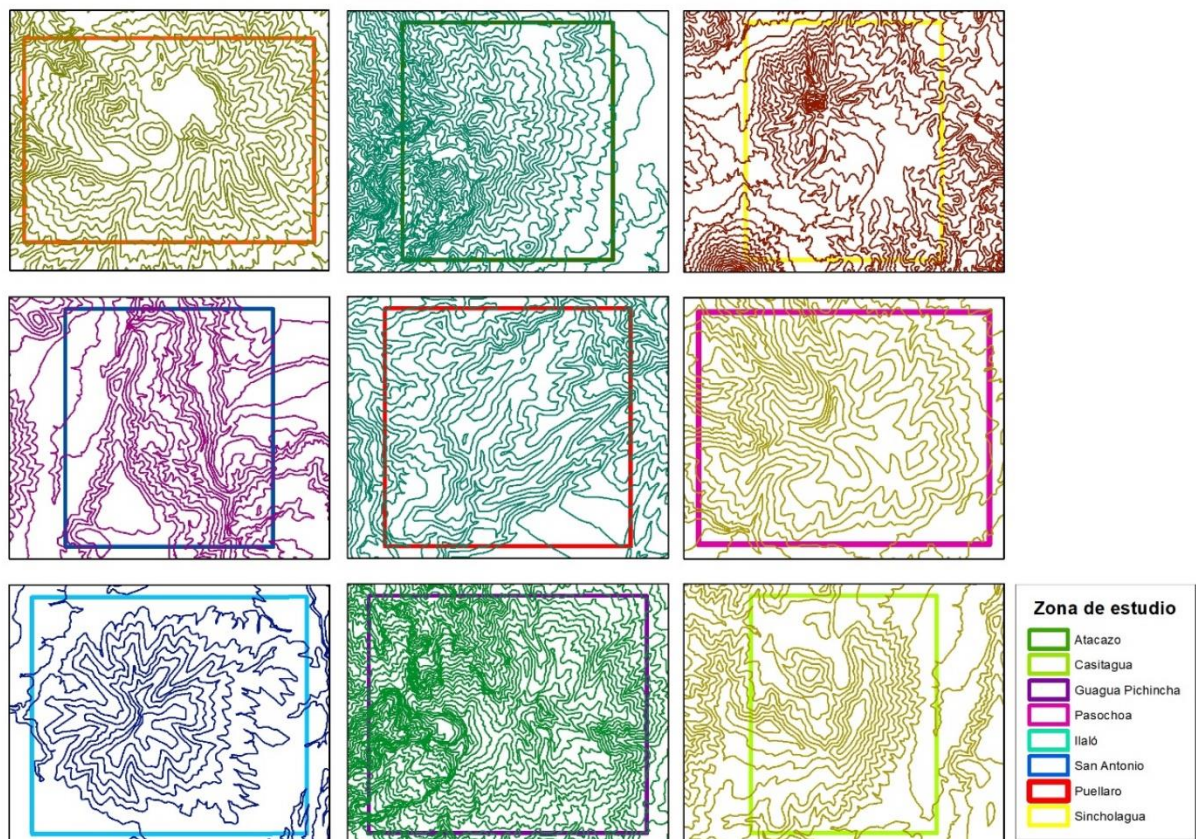
La información obtenida de diversas fuentes referentes al DMQ, se han en coordenadas WGS84 17S. Los datos son utilizados por FlamMap para realizar la simulación se describen a continuación.

3.3.1 Carta topográfica de Quito

Este archivo contiene las curvas de nivel que representan la elevación, pues las curvas de nivel son levantamientos topográficos procesados, por lo tanto representan la superficie real, “ya que permiten visualizar de manera simultánea las áreas planas y empinadas (distancia entre las curvas de nivel), así como crestas y valles (polilíneas convergentes y divergentes)” (ArcGIS, s.f.).

Figura 20.

Curvas de nivel del DMQ



Nota. Se presenta las curvas de nivel de las zonas de estudio dentro de Quito, se ha tomado mapa de IGM en escala 1:50000. Elaborado por la autora, 2022.

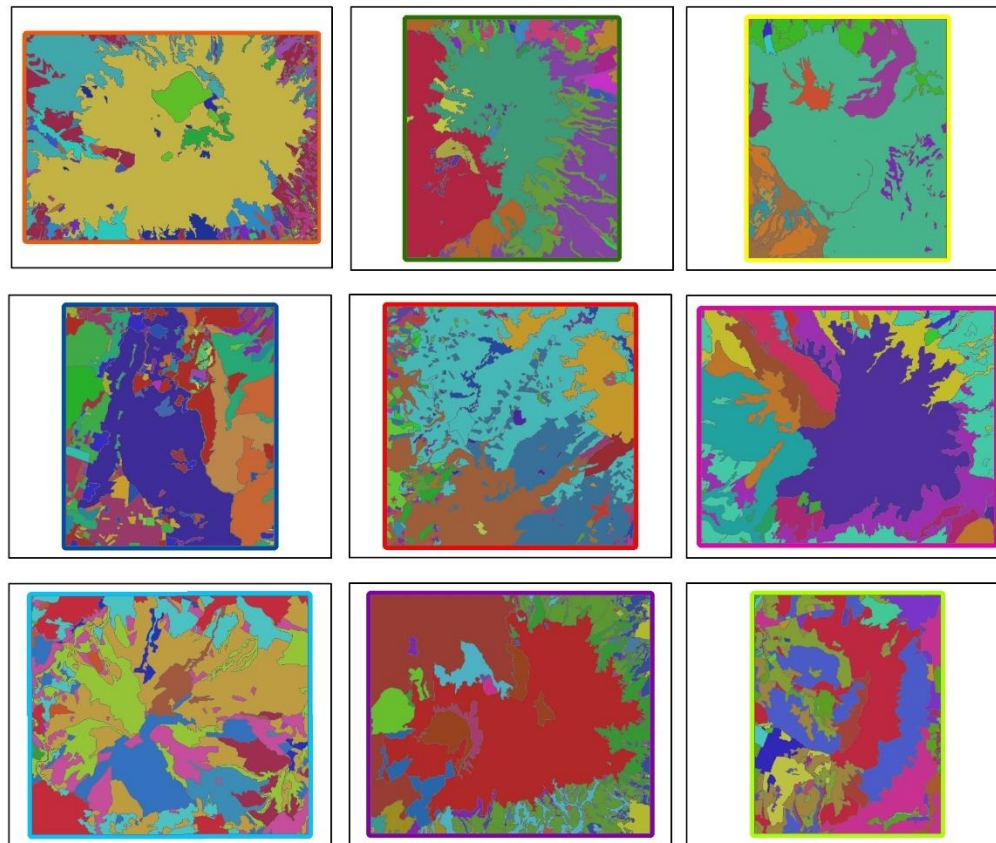
3.3.2 Cobertura y uso del suelo

Se toma como base para elaborar los rásters de combustibles el mapa de uso homologado del suelo de MAGMAP que contiene 99 categorías que estará relacionado con el

modelo de combustibles elegido para este trabajo, el ráster de combustible contendrá 4 categorías basadas en el porcentaje de cobertura vegetal.

Figura 21.

Cobertura de suelo de zonas de estudio



Nota: Mapa de cobertura y uso vegetal para las nueve zonas de estudio. Elaborado por la autora, 2022.

3.3.3 Datos meteorológicos

Se necesita crear un archivo con extensión wxs que sirva de entrada en FlamMAP para calcular la humedad de los combustibles vegetales, para este fin se usa las siguientes variables: “temperatura, humedad relativa, nubosidad, precipitaciones, velocidad de viento y dirección de viento” (Mollocana et al,2021). Toda la información se la consultará en fuentes gubernamentales como REMMAQ, INAMHI. Se toma la información meteorológica correspondiente al año 2019 de las estaciones Carapungo, El Camal, Guamaní, Tumbaco y San Antonio de la REMMAQ, debido a que estas estaciones son las más cercanas a cada zona de estudio detallada en la Tabla 5.

Tabla 5 Estaciones utilizadas

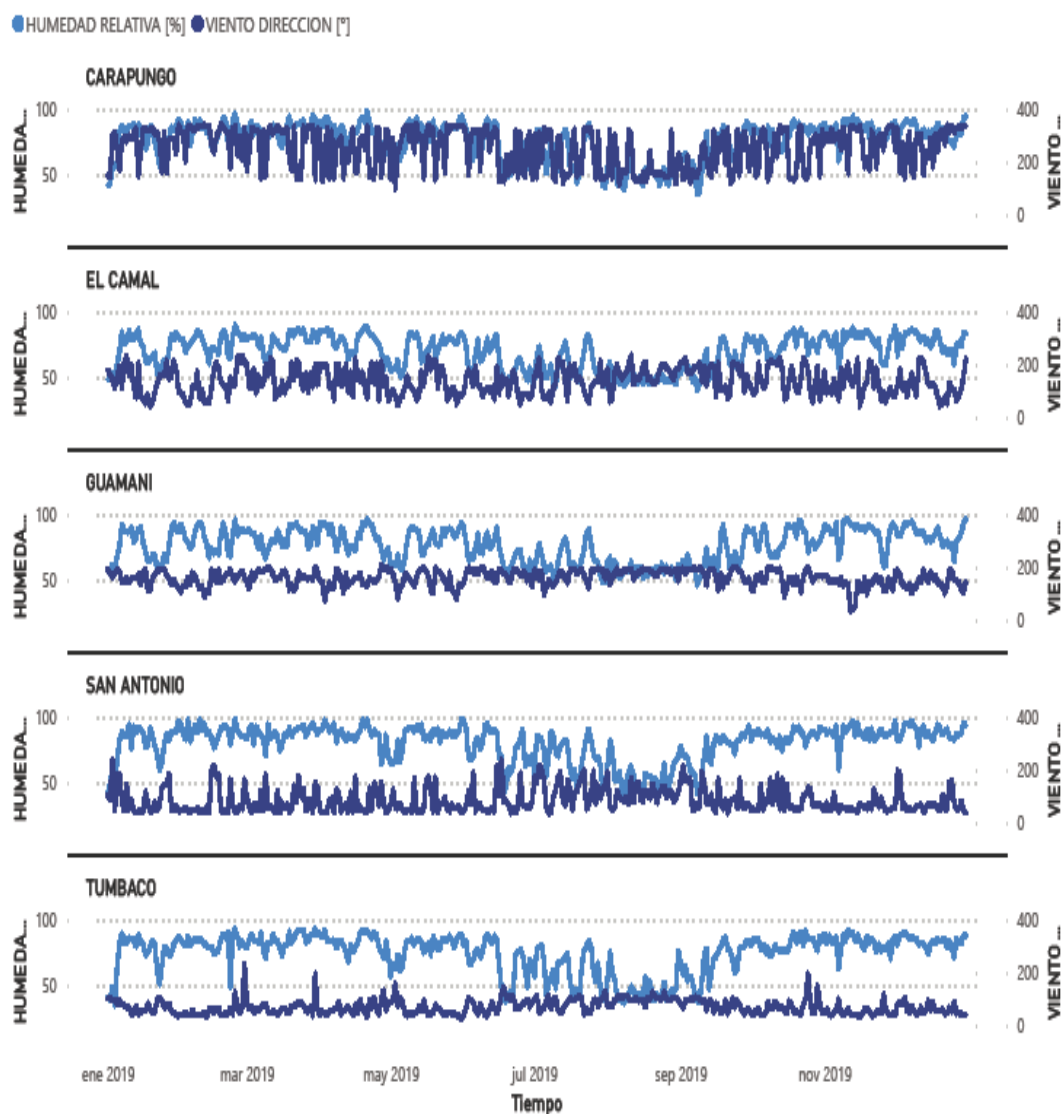
Estación	Zona de estudio	Distancia estimada(km)
Carapungo	Casitagua	5,4
El Camal	Guagua Pichincha	12
Guamaní	Atacazo	6,14
	Pasochoa	16
	Sincholagua	30
Tumbaco	Ilaló	5
San Antonio	San Antonio	2,3
	Atahualpa	22
	Puellaro	9

Nota. Se presenta las estaciones correspondientes a cada zona y la distancia entre ellas.

Elaborado por la autora, 2022.

Figura 22.

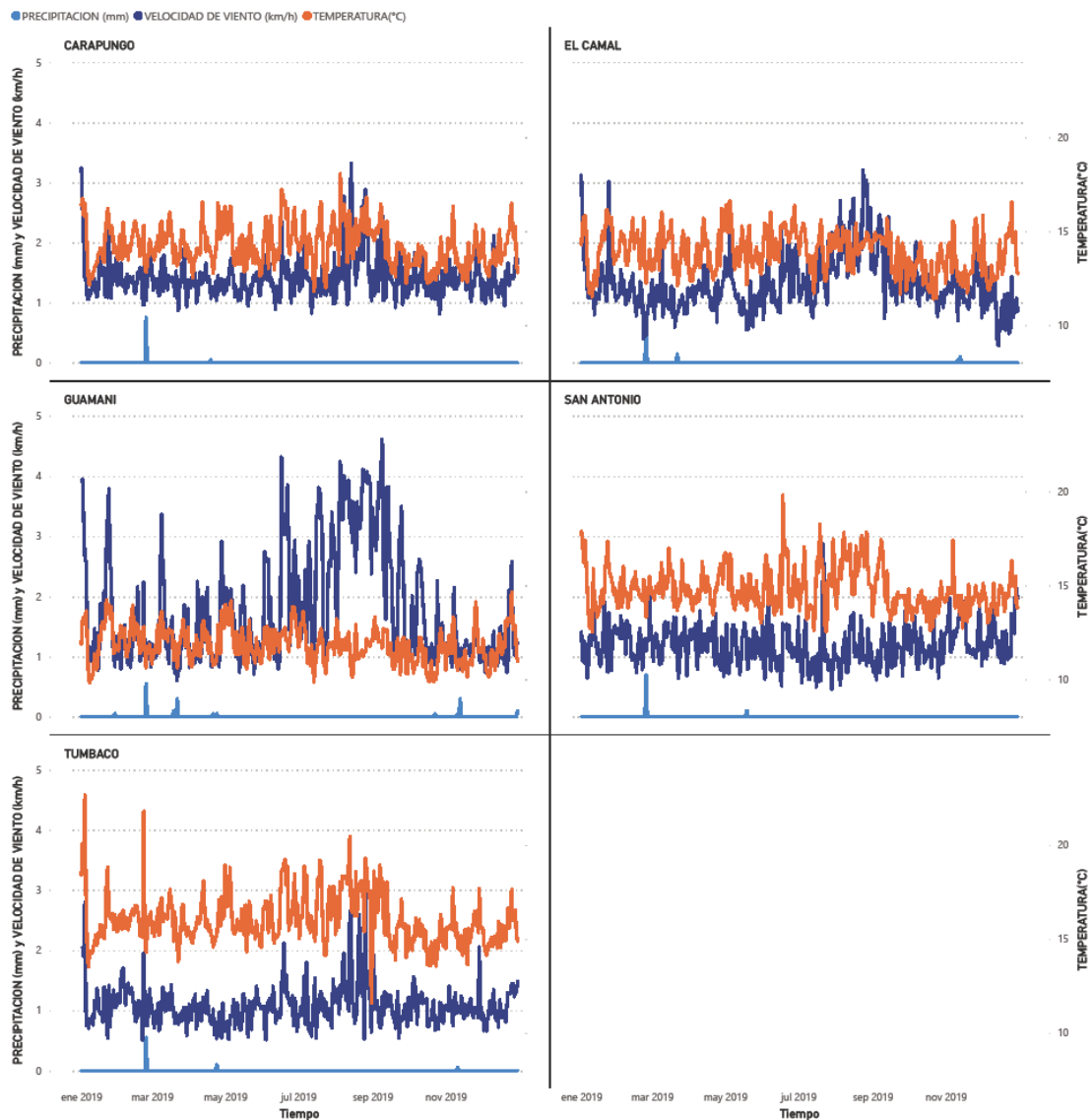
Datos meteorológicos año 2019



Nota: Se presenta la humedad relativa y dirección del viento de las estaciones interés de la REMMAQ para el año 2019. Elaborado por la autora, 2022.

Figura 23.

Datos meteorológicos



Nota: Se presenta precipitaciones, temperatura y velocidad de viento en la estación Guamaní de la REMMAQ en el periodo 2019. Elaborado por la autora, 2022.

3.4 Procesamiento de información

La información se procesará para que sea aceptada por el software FlamMap, se realizará el proceso para cada zona de estudio.

3.4.1 Archivo Landscape

Para generar este archivo, a partir de la información recopilada se genera 5 ráster que tengan las mismas características en el tamaño de píxeles(20x20m), estos ráster según (Mollocana et al ,2021) son los siguientes: “elevación o altura, pendiente, orientación, cobertura vegetal y modelos de combustible”, estos ráster deben ser de la misma zona de estudio.

3.4.1.1 Ráster: altura, pendiente y orientación

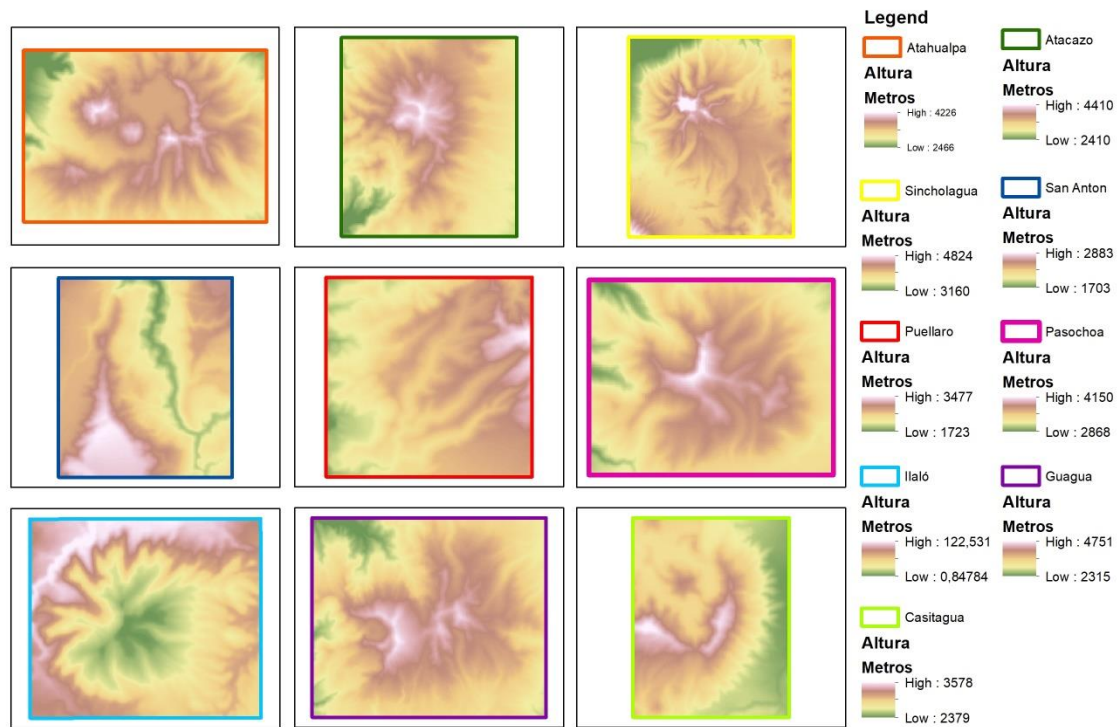
La hoja topográfica de DMQ contiene las curvas de nivel a partir de las cuales se creará los ráster de altura, pendiente y elevación, para crear estos ráster se utilizará un sistema de información geográfica (SIG) en este caso se trata de ArcGIS.

En el software se dispone de varias herramientas que serán de utilidad como: Topo to raster, Slope, Aspect, con estas herramientas de ArcGIS se irá generando los ráster anteriormente mencionados. Entonces los pasos a seguir para cada zona de estudio delimitada son los siguientes:

- Ingresar la hoja topográfica con los datos de curvas de nivel de cada zona respectivamente en ArcGIS.
- Con la herramienta Topo to Raster vamos a crear nuestro modelo de elevación digital, que contenga un tamaño de celda de 20. Esta herramienta usa como entrada la hoja cartográfica. (Figura 23).
- Ya teniendo el modelo de elevación digital, en la opción Raster Surface se va a usar la herramienta Aspect para crear ráster de orientación (Figura 25). La entrada es el raster con tamaño de celda de 20 m.
- Usar nuevamente la opción Raster Surface, con Slope creamos raster de pendiente (Figura 24). La entrada es el modelo de elevación digital con tamaño de celda de 20m.

Figura 24.

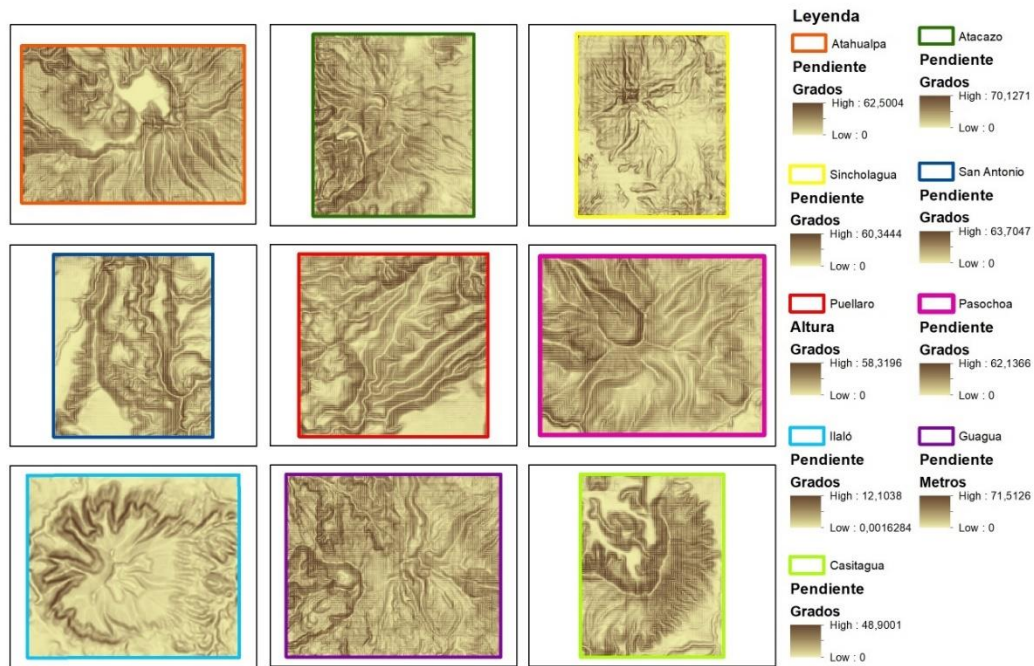
Raster de altura



Nota. Elaborado por la autora, 2022.

Figura 25.

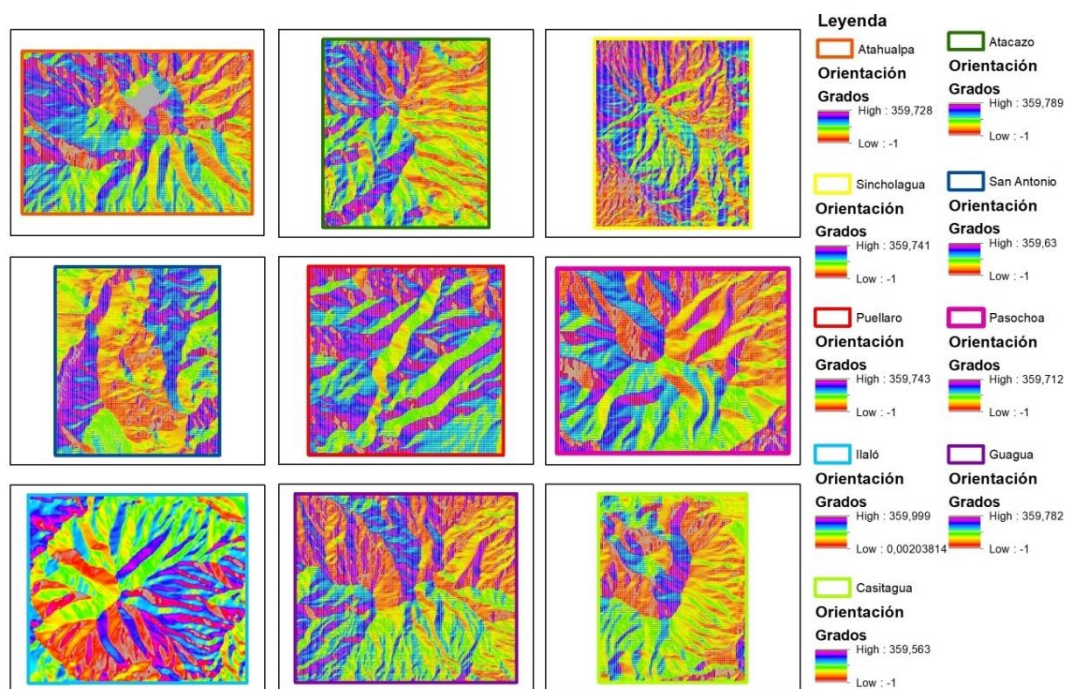
Raster de Pendiente



Nota. Elaborado por la autora, 2022.

Figura 26.

Raster de Orientación



Nota. Elaborado por la autora, 2022.

3.4.1.2 Ráster: modelo de combustibles vegetales y porcentales de cobertura vegetal

Se usa el mapa de cobertura y uso de tierra obtenido de MAGAP el cual está en formato shape y contiene diversas categorías de cobertura de suelo de las cuales se han extraído 99 categorías que están presentes en las zonas de estudio, las categorías de las clasificará guiándonos en los modelos de combustibles de Scott-Burgan mediante una comparación de las características y de manera visual.

Siendo así los modelos no quemables los descritos a continuación, NB1 los que se considere pertenecen a desarrollo urbano o suburbano tales como casas, campamentos, centros poblados entre otros, NB2 se asignó a glaciación, NB3 se le asignó a todo tipo de cultivo presente en la zona, a NB8 pertenecen cuerpos de agua como lagunas o ríos, NB9 se asigna a áreas sin cubierta vegetal como zonas erosionadas o zonas rocosas. Se asignó los modelos TU1, TU2, TU3 para los bosques de matorral húmedo, bosque nativo y bosque seco por la composición del combustible. Para matorrales se asignó diversos modelos los cuales son SH4, TU1, GH4 y GS3, considerando el nivel de alteración que presenta el matorral, si es húmedo o seco y comparando visualmente los combustibles de la zona y los ejemplos que muestra Scott-Burgan. Para los páramos se consideró el nivel de alteración, al páramo herbáceo se asignó los modelos GR2, GR3 y GR5 mientras que para los arbustivos se asigna GS2, GS3 y GS4. Se asigno a la vegetación herbácea húmeda el modelo GR1 y GR5 de acuerdo al nivel de alteración, a la vegetación herbácea seca se asignó los modelos GR1, GR2 y GR4. Para realizar la asignación de modelo a la cobertura vegetal se basó en las características de cada modelo indicado en la Tabla3, de allí mismo se toma el código perteneciente a cada modelo.

En base a estas nuevas categorizaciones se elabora una base de datos conformada por la categoría cobertura, y se añadió 3 filas que contienen el modelo de combustible más su propio código, y se asignó una clase de cobertura vegetal que va en un rango del 0 al 4, el 0 corresponde a 0% de cobertura, en cada clase va aumentando un 24% hasta llegar a 99%.,

entonces, la clase 1 corresponde a un rango de 1% hasta 25%, la clase 2 corresponde desde 26% a 50%, la clase 3 va desde 51% hasta 75%, finalmente la clase 4 va desde 76% hasta 100%.

Con estos valores se creará un archivo con extensión csv de cada zona de estudio representado en la Tabla 5, luego se ingresará este archivo a ArcGIS, se unirá esta información con el mapa de cobertura y uso de tierra mediante la herramienta Joins and Relates usando el atributo “cobertura”.

Con la herramienta Feature to ráster se creará dos ráster con el mismo tamaño de píxeles que el ráster de altura, estos ráster van a contener:

- Código del modelo de combustible en números en cada celda (Figura 26).
- La cobertura vegetal en cada celda (Figura 27).

Tabla 6 Base de datos para cobertura vegetal y modelo de combustibles

cobertura	fuel_type	fuel_value	cc_class
AFLORAMIENTO ROCOSO	NB9	99	0
AGUACATE	NB3	93	0
ALBARRADA/RESERVORIO	NB9	99	0
ALFALFA	NB3	93	0
AREA DE INUNDACION	NB8	98	0
AREA EN PROCESO DE EROSION	NB9	99	0
AREA EN PROCESO DE URBANIZACION	NB9	99	0
AREA EROSIONADA	NB9	99	0
ARVEJA	NB3	93	0
AVENA FORRAJERA	NB3	93	0
BANCO DE ARENA	NB9	99	0
BOSQUE HUMEDO MEDIANAMENTE ALTERADO	TU2	162	3
BOSQUE HUMEDO MUY ALTERADO	TU1	161	1
BOSQUE HUMEDO POCO ALTERADO	TU3	163	4
BOSQUE NATIVO	TU5	165	4
BOSQUE SECO MUY ALTERADO	TU2	162	2
CAMPAMENTO EMPRESARIAL	NB1	91	0
CANTERA	NB8	98	0
CASA DE HACIENDA	NB1	91	0
CEBADA	NB3	93	0
CEBOLLA BLANCA	NB3	93	0
CEMENTERIO	NB1	91	0
CENTRO POBLADO	NB1	91	0

Tabla 6 Base de datos para cobertura vegetal y modelo de combustibles

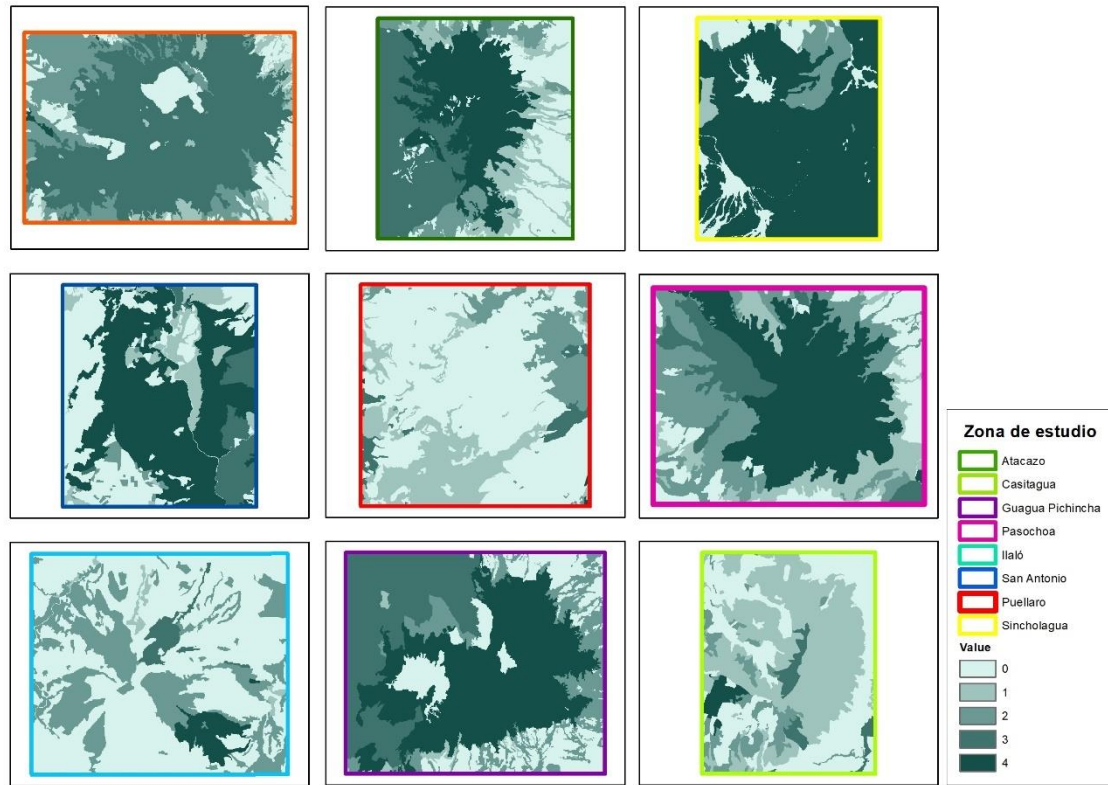
CHOCHO	NB3	93	0
COMPLEJO ARQUEOLOGICO	NB1	91	0
COMPLEJO DE COMUNICACIONES	NB1	91	0
COMPLEJO EDUCACIONAL	NB1	91	0
COMPLEJO HIDROELECTRICO	NB1	91	0
COMPLEJO INDUSTRIAL	NB1	91	0
COMPLEJO MILITAR	NB1	91	0
COMPLEJO RECREACIONAL	NB1	91	0
CUERPO DE AGUA NATURAL	NB8	98	0
ERIAL	NB9	99	0
EUCALIPTO	TU4	164	2
FLORES ANDINAS DE VERANO	NB3	93	0
FREJOL	NB3	93	0
FRUTILLA	NB3	93	0
GLACIAR	NB2	92	0
GRANJA AVICOLA	NB1	91	0
GYPSOPHILA	NB3	93	0
HABA	NB3	93	0
HIPODROMO	NB8	98	0
INFRAESTRUCTURA ANTROPICA	NB9	99	0
INVERNADERO	NB3	93	0
LADRILLERA	NB1	91	0
LAGO/LAGUNA	NB8	98	0
LIMON	NB3	93	0
MAIZ	NB3	93	0
MAIZ-ARVEJA	NB3	93	0
MAIZ-FREJOL	NB3	93	0
MAIZ-PAPA	NB3	93	0
MANDARINA	NB3	93	0
MATORRAL HUMEDO MEDIANAMENTE ALTERADO	SH4	144	3
MATORRAL HUMEDO MUY ALTERADO	TU1	161	1
MATORRAL HUMEDO POCO ALTERADO	GH4	144	3
MATORRAL SECO MEDIANAMENTE ALTERADO	GS3	123	3
MATORRAL SECO MUY ALTERADO	TU1	161	2
MATORRAL SECO POCO ALTERADO	GH4	144	4
MINA	NB9	99	0
MISCELANEO DE CEREALES	NB3	93	0
MISCELANEO DE CICLO CORTO	NB3	93	0
MISCELANEO DE FRUTALES	NB3	93	0
MISCELANEO DE HORTALIZAS	NB3	93	0
MISCELANEO FORESTAL	NB3	93	0

Tabla 6 Base de datos para cobertura vegetal y modelo de combustibles

PAPA	NB3	93	0
PARAMO	GR5	105	4
PARAMO ARBUSTIVO MEDIANAMENTE ALTERADO	GS4	124	3
PARAMO ARBUSTIVO MUY ALTERADO	GS3	123	1
PARAMO ARBUSTIVO POCO ALTERADO	GS2	122	4
PARAMO HERBACEO MEDIANAMENTE ALTERADO	GR3	103	3
PARAMO HERBACEO MUY ALTERADO	GR2	102	2
PARAMO HERBACEO POCO ALTERADO	GR5	105	4
PASTIZAL	GR8	108	4
PASTO CULTIVADO	NB3	93	0
PASTO CULTIVADO CON PRESENCIA DE ARBOLES	NB3	93	0
PASTO CULTIVADO CON PRESENCIA DE MAIZ	NB3	93	0
PEPINILLO	NB3	93	0
PINO	TU2	162	2
QUINUA	NB3	93	0
RELLENO SANITARIO	NB1	91	0
RIO DOBLE	NB8	98	0
ROSAS	NB3	93	0
SUBESTACION ELECTRICA	NB3	93	0
TIERRA AGRICOLA SIN CULTIVO	NB9	99	0
TOMATE DE ARBOL	NB3	93	0
TOMATE RI	NB3	93	0
TOMATE RI ^벽 ON	NB3	93	0
TRIGO	NB3	93	0
URBANO	NB1	91	0
VEGETACION ARBUSTIVA	GS2	122	4
VEGETACION HERBACEA	GR5	105	4
VEGETACION HERBACEA DE HUMEDAL POCO ALTERADA	GR5	105	4
VEGETACION HERBACEA HUMEDA MEDIANAMENTE ALTERADA	GR3	103	4
VEGETACION HERBACEA HUMEDA MUY ALTERADA	GR1	101	4
VEGETACION HERBACEA HUMEDA POCO ALTERADA	GR5	105	4
VEGETACION HERBACEA SECA MEDIANAMENTE ALTERADA	GR4	104	4
VEGETACION HERBACEA SECA MUY ALTERADA	GR1	101	4
VEGETACION HERBACEA SECA POCO ALTERADA	GR5	105	4

Figura 28.

Cobertura vegetal



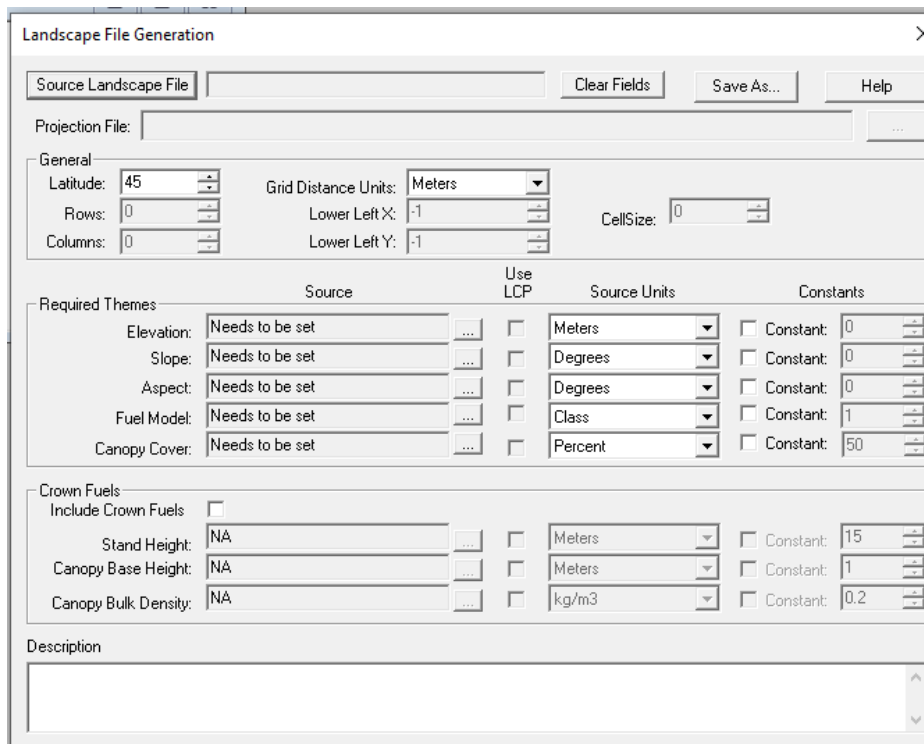
Nota. Elaborado por la autora, 2022.

3.4.1.3 Generación de archivo Landscape

La herramienta *Create Landscape* de FlamMap permitirá crear el archivo con extensión lcp, para ello se necesita cargar al programa FlamMap los cinco ráster creados en ArcGIS que corresponden a altura, slope que es la pendiente del terreno, aspect corresponde a la orientación, fuel pertenece al código del modelo de fuego y Canopy Cover pertenece a la cobertura vegetal, los mismo que deben ser exportados desde ArcGIS en formato asc o tif para que el programa FlamMap los pueda leer. Además, se ingresará un archivo con extensión prj que contenga la proyección que se está utilizando, debemos especificar la latitud en UTM y las unidades de distancia de cada pixel. Después de que los datos son cargados se debe guardar con la extensión “lcp”.

Figura 29.

Interfaz de FlamMap para crear Landscape



Nota. Se presenta la interfaz donde cargar los datos de entrada para generar el archivo con extensión lcp. Nota. Elaborado por la autora, 2022.

3.4.2 Archivo wxs: datos meteorológicos

Este archivo contendrá las variables obtenidas de las distintas estaciones meteorológicas (humedad relativa, temperatura, precipitación, velocidad del viento, dirección del viento, nubosidad), unidad del sistema métrico y valor medio. La REMMAQ no proporciona datos de nubosidad, para cumplir con el formato de entrada de FlamMap, por consiguiente se colocará el valor de nubosidad en cero.

Teniendo los datos de interés, se colocará el formato para que sea leído por FlamMap, colocando las unidades en que se va a trabajar en este caso son metros, se debe colocar la elevación estimada de la zona de estudio correspondiente, y el número de columnas que contiene el archivo como se evidencia en la Tabla 7, además se puede encontrar los datos

usados para cada zona en el Anexo 1. Finalmente, para que este archivo sea usado como dato de entrada para la simulación se lo guarda con la extensión wxs.

Tabla 7 *Datos meteorológicos usados*

RAWS_UNITS: Metric
RAWS_ELEVATION: 3021
RAWS: 8759

Year	Mth	Day	Time	Temp	RH	HrlyPcp	WindSpd	WindDir	CloudCov
2019	1	1	0000	10	66	0.00	4	195	0

Nota. Se presenta los datos en el formato que fueron trabajados en Excel, en la tabla se ejemplifica el formato que se le dio a la zona del volcán Casitagua. Tomado de (Mollocana et al, 2021). Adaptado por la autora, 2022.

3.4.3 *Punto de ignición*

Para cada zona de estudio, se creará el punto de ignición a partir de la imagen satelital, se creará un shape de polígono que contenga el área del punto de ignición la cual está colocada estratégicamente en el punto con mayor cobertura vegetal susceptible a incendio.

3.5 Simulación

Se crea la simulación para observar el comportamiento posible a ocurrir en las zonas de alta y crítica susceptibilidad de incendios forestales, y de los incendios ya ocurridos. La simulación para ambos casos se hará en base al tiempo de viaje mínimo (MTT Arrival Time) para generar el mapa de tiempo de llegada y los trayectos principales del fuego (MMT Major Paths).

Para crear la simulación con FlamMap se abre el archivo lcp, y proceder a la sección *Runs*, en la ventana Inputs se va a configurar los datos de entrada, en esta sección se debe generar en el mismo programa un archivo de humedad combustible. En la sección de wind que corresponde a vientos se seleccionó la opción Wind Ninja la cual contiene una resolución de 20m, y demás meteorológicos. En la sección de características de cobertura se trabajará con el contenido de humedad foliar al 100% debido a que la época seleccionada para la simulación fue en verano, el método de cálculo se trabajará con la opción Finney (2004), finalmente se va a configurar la

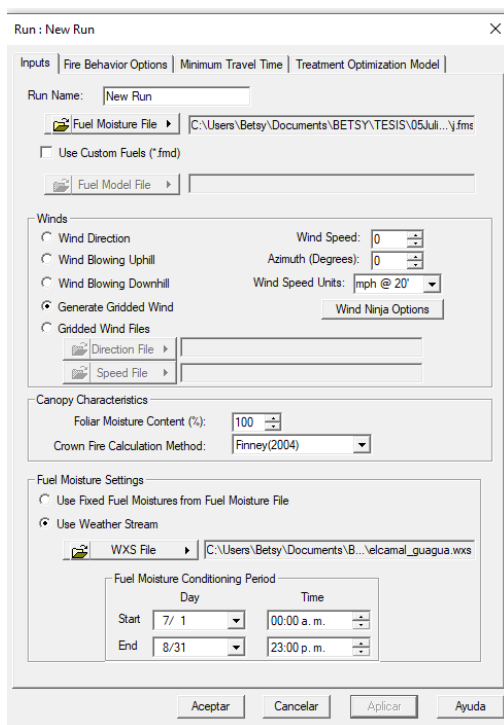
humedad de combustible seleccionando el archivo wxs como entrada y se seleccionará el periodo que va entre las 00:00 del 1/07/2019 hasta 23:00 del 01/08/2019 como se observa en la figura 30.

Después de aplicar la configuración de los datos de entrada, se dirigirá a la ventana *Minimum Travel Time*, y aquí se deberá ingresar el shape que contiene el punto de ignición, se definió el tiempo máximo de simulación en 2400 min por cuestiones de practicidad y porque a mayor tiempo el programa se vuelve más lento, finalmente para las salidas se elegirá las opciones que corresponden a tiempo de llegada y trayectos principales que sigue el incendio como se muestra en la figura 31.

Ya configurado estos datos se procede a crear la simulación con *Launch MMT*, la cual genera las salidas seleccionadas.

Figura 30

Inputs de FlamMap

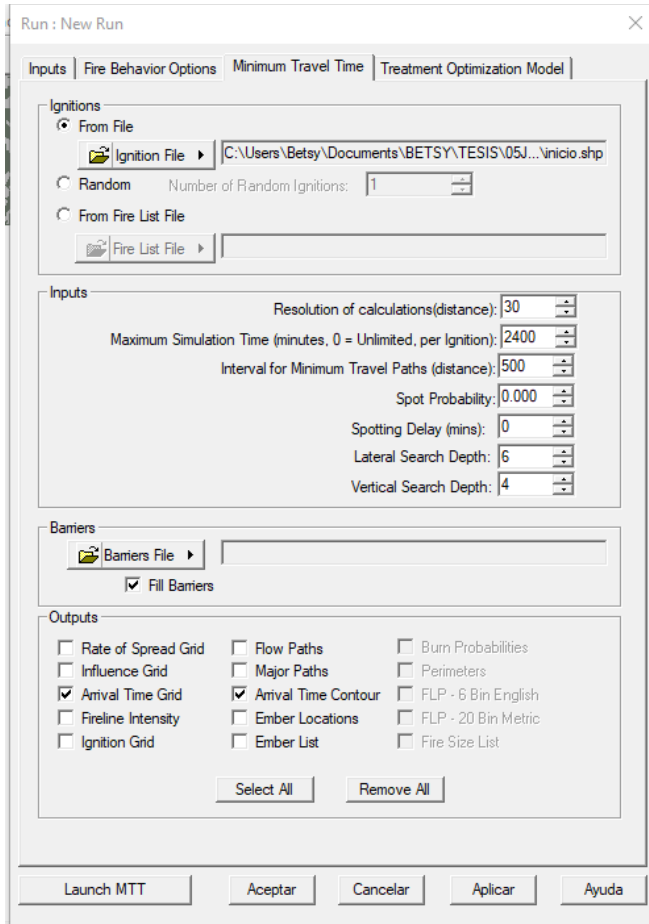


Nota: Se presenta la ventana de Input para configurar los datos utilizados en FlamMap.

Elaborado por la autora, 2022.

Figura 31.

Inputs de FlamMap



Nota: Se presenta la ventana de Tiempo de viaje mínimo para configurar los datos utilizados en FlamMap. Elaborado por la autora, 2022

3.6 Validación del modelo

Para este punto se trabajará con el volcán Casitagua debido a que el 14 de enero del año 2020, en horas de la mañana anteriormente un incendio forestal el cual duró varias horas hasta que se logró extinguir a las 11:00 del 15 de febrero del mismo año, usando esta zona se

comparará con simulación que será realizada en FlamMap con la finalidad visualizar la similitud en cuanto a la extensión del incendio, además de visualizar, servirá para obtener datos que se usará para calcular el error mediante el coeficiente de Sorensen y kappa Cohen.

3.6.1 Medidas estadísticas de similitud

“Las medidas de similitud permiten detectar las partes de la imagen objetivo que tienen correspondencia con otras de la imagen de referencia” (Eduardo, 2007). Se busca encontrar la tendencia estadística de similitud entre dos muestras para determinar la precisión del modelo de propagación del incendio, analizando un factor en común, en este trabajo se tomará en cuenta las zonas quemadas y no quemadas.

Coeficiente de Sorensen

Es un coeficiente estadístico que ayuda a encontrar similitud entre dos muestras, la fórmula permite aplicar a datos de presencia/ausencia de la muestra:

Formula 1

$$SC = \frac{2a}{2a+b+c} \quad (1)$$

Donde:

SC = coeficiente de Sorensen.

a = número de píxeles quemadas de las dos simulaciones.

b = número de píxeles quemadas en la simulación y no quemadas en el incendio real.

c = número de píxeles no quemadas en la simulación y quemadas en el incendio real.

Los valores de a , b y c para aplicar la Formula 1, se los obtiene con ayuda de ArcGis, donde se va a generar raster con extensión de incendio real y la extensión de incendio simulado como se muestra en la Figura 32. Con la herramienta *Reclassify* que servirá para que nuestro

raster contenga un solo valor con todos los pixeles del incendio, luego para encontrar de manera individual los datos de pixeles de interés se usará la herramienta *Raster Calculator*.

Coefficiente kappa de Cohen

Es una medida estadística de error para elementos cualitativos, se puede derivar de una matriz de error que relaciona las categorías de pixeles quemados y no quemados, que se obtiene de los ráster de la simulación del incendio y el incendio real, se usa los mismos datos de pixeles ya generados para la Formula 1.

Formula 2:

$$KC = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})} \quad (2)$$

Donde:

KC = coeficiente kappa de Cohen.

r = número filas de la matriz de error.

N = número total de observaciones.

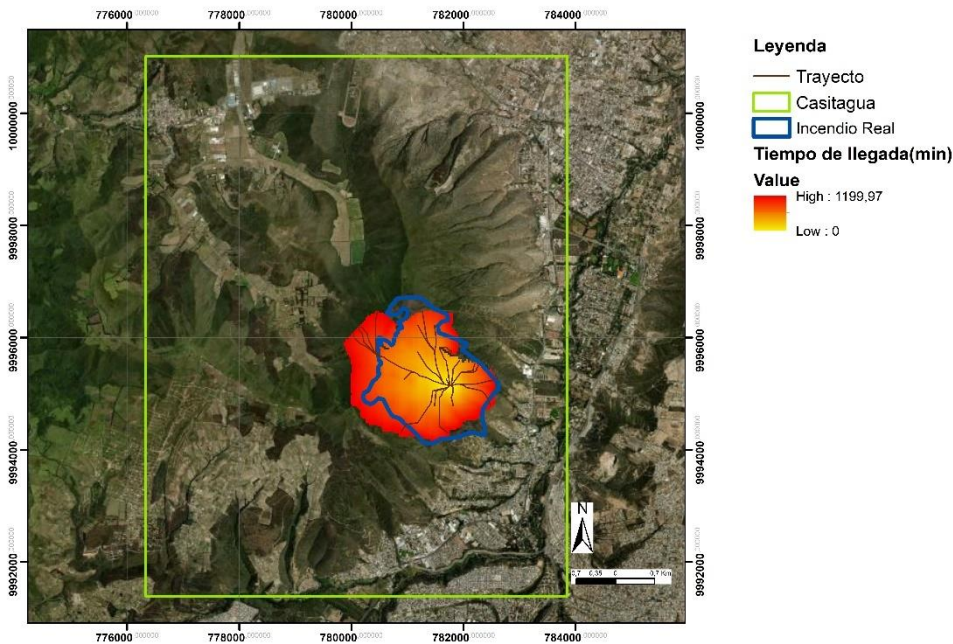
x_{ii} = número de observaciones en la fila i y columna i de la matriz de error.

x_{i+} = total marginal de la fila i .

x_{+i} = total marginal de la columna i

Figura 32.

Casitagua, incendio real y simulado.



Nota. Elaborado por la autora, 2022

3.7 Aplicación de medidas de mitigación

Se definirá barreras corta fuego utilizando datos proporcionados por OSM, y para evaluar las medidas diseñadas se realizará una nueva simulación aplicando estas barreras cortafuegos en FlamMap, de tal manera se observará como el fuego no se propaga porque barreras de fuego se lo impedirá.

Usando caminos, senderos, ríos y otra información que sea aplicable como barrera cortafuego se generará un shape en ArcGis que una polígonos de cuerpo de agua, rocas con líneas que representan caminos de diferente orden y senderos, este archivo que contiene las barreras será ingresado en FlamMap con la opción *Barries File* en la ventana de MTT, para posterior realizar la simulación con Launch MMT con la misma configuración de Inputs y punto de ignición.

Tabla 8 Barreras cortafuego por zona

Zona	Atributo
1. Volcán Pasochoa	Unclassified, path, track, wáter, bare_rock
2. Volcán Atacazo	Unclassified, path, track, wáter, bare_rock
3. Cerro Guagua Pichincha	Unclassified, path, track, scree, bare_rock
4. Volcán Casitahua	Unclassified, path, track, wáter
5. Cerro Ilaló	Unclassified, path, track, water
6. San Antonio de Pichincha	Track, unclassfield,track
7. Puellaro	Unclassified, path, track
8. Volcán Sincholagua	Path, track,unclassified, wáter, bare_rock, wetland
9. Atahualpa	Unclassified, path, track, water

Nota. Atributos usados como barrera cortafuego. Elaborado por la autora, 2022

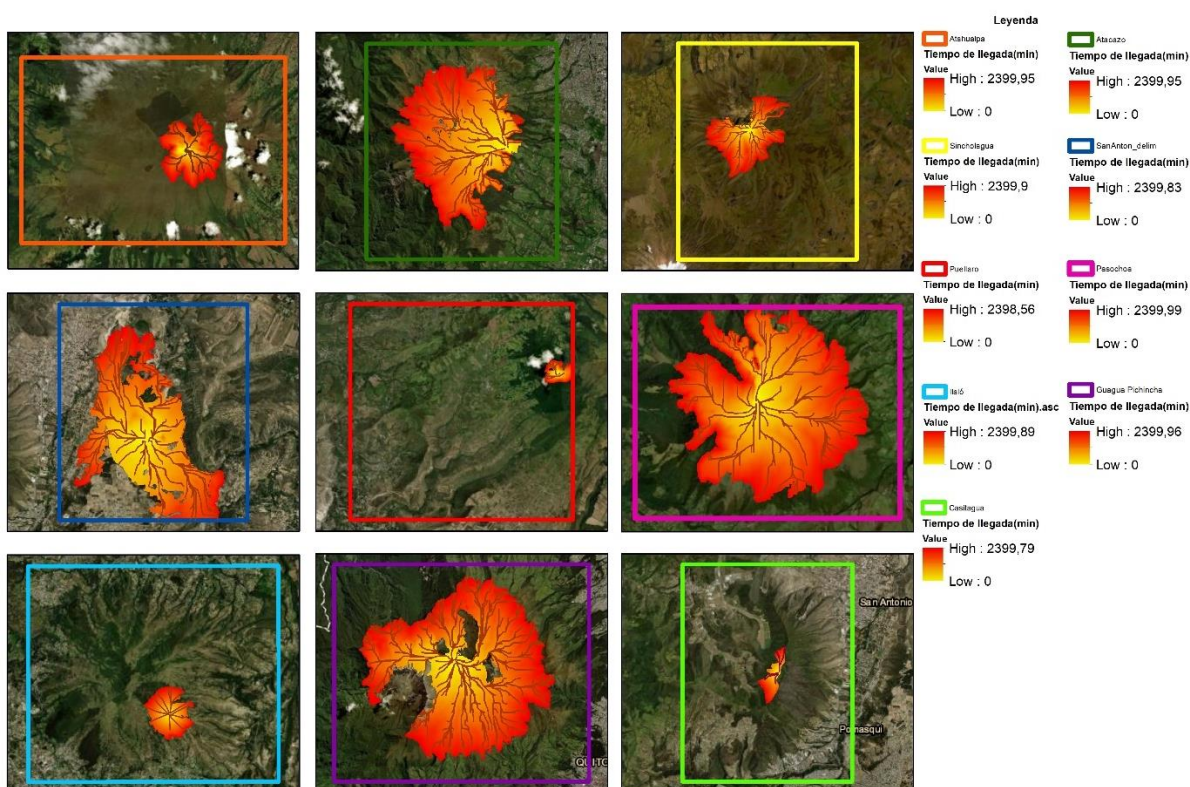
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Simulación de incendios forestales en 9 zonas de DMQ

En la imagen 32 se muestra cómo se propagaría el incendio forestal en cada zona de estudio sin la existencia de barreras cortafuegos, todas las zonas de estudio presentan pendientes, y mayormente vegetación arbustiva y herbácea.

Figura 33.

Tiempo de llegada en minutos



Nota: En los mapas se muestra el trayecto y tiempo de llegada del incendio en minutos, las líneas dentro del área naranja son los trayectos. Elaborado por la autora,2022

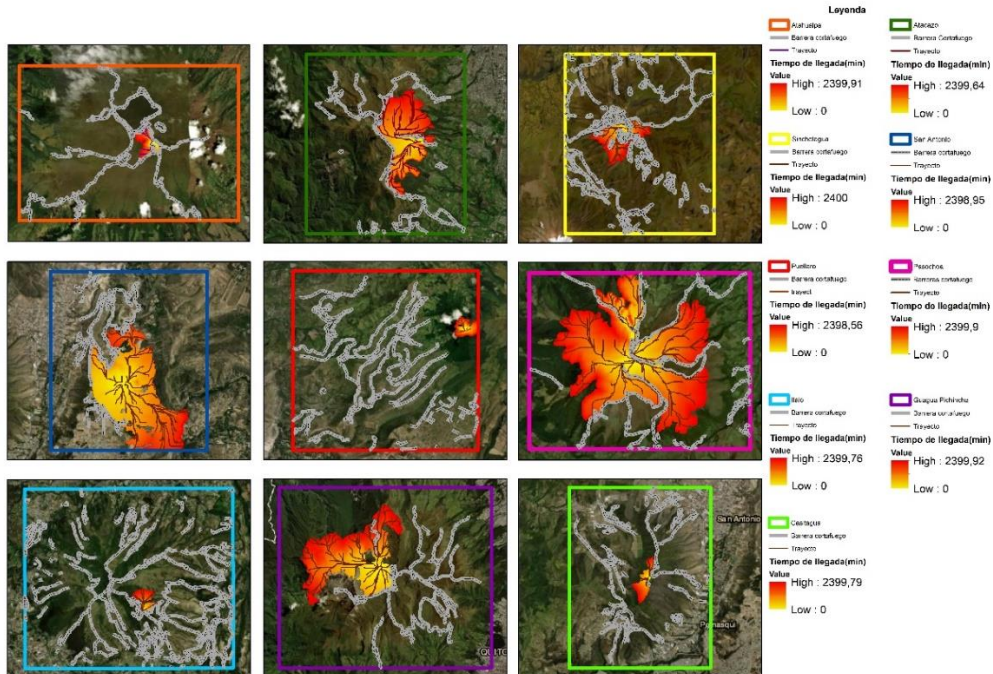
4.2 Medidas de mitigación

En la figura 34 se visualiza como ha disminuido la extensión del incendio considerablemente en 7 de las 9 zonas trabajadas luego de realizar la simulación con las barreras corta fuego ya existente en cada zona, a excepción de las zonas donde se encuentra el volcán

Casitagua y Puellaro esto debido a que las barreras no actúan como limitante a la extensión del incendio porque no llegan a interceptar con el incendio.

Figura 34.

Barreras cortafuego existentes

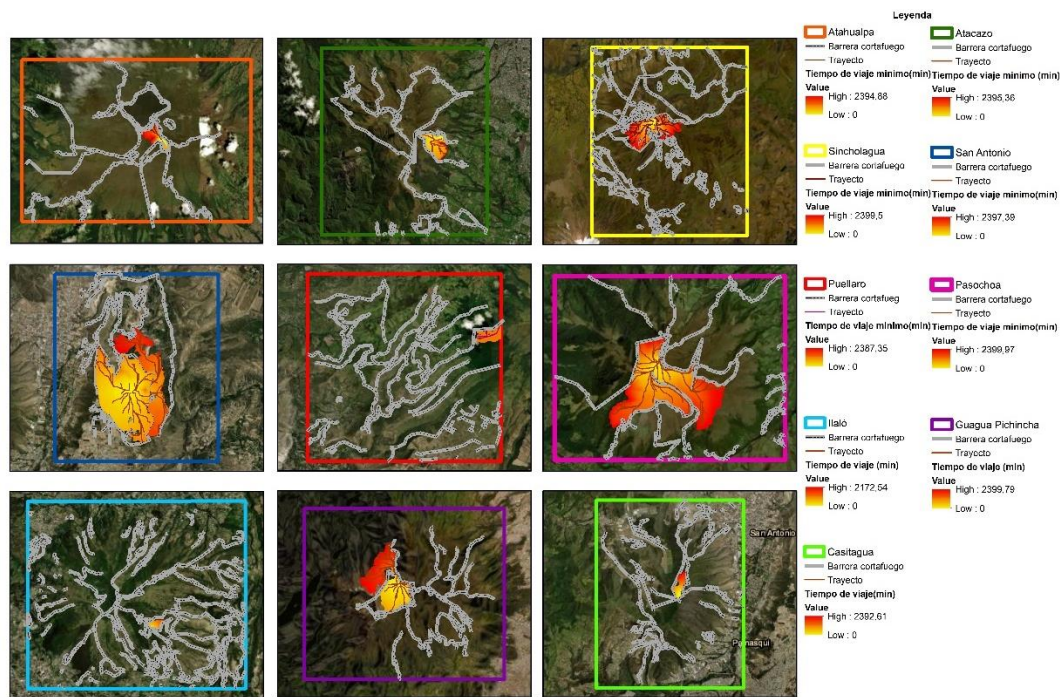


Nota. En los mapas se muestra el trayecto y tiempo de llegada del incendio en minutos después de haber aplicado barreras cortafuego. Elaborado por la autora, 2022

Luego de implementar senderos en lugares estratégicos, que conectan con los caminos ya existentes en cada zona, se puede evidenciar visualmente como la extensión de los incendios tiende a reducirse diferencia de la simulación con barreras ya existentes (Figura 35), debido a que los senderos actúan como barreras cortafuego logrando así mitigar el incendio porque intercepta con el trayecto principal del incendio (Figura 35), y no permite que siga avanzando por el terreno.

Figura 35.

Barreras cortafuego creadas



Nota. Elaborado por la autora, 2022

Tabla 9 Área de incendio simulado

Zona de estudio	Área incendio sin barrera cortafuego	Área incendio con barrera cortafuego existente	Área incendio con barrera generada	Mitigaciones barreras existentes (%)	Mitigaciones barreras creadas (%)
Atahualpa	221520	47730	33810	78	85
Atacazo	1134600	402210	54960	65	95
Casitagua	39780	39390	14340	1	64
Guagua Pichincha	2058780	705120	275820	66	87
Ilaló	78900	21810	7470	72	91
Sincholagua	1036860	566460	380280	45	63
Paschocha	1123860	849270	278820	0,24	0,75

Puellaro	30690	30690	24180	0,00	0,21
San Antonio	824250	567300	405810	0,31	0,51

Nota. Elaborado por la autora, 2022

4.3 Validación del modelo

El número de píxeles obtenidos para a,b y c fueron respectivamente 3554, 477 y 1437. Con estos datos de píxeles se aplicó la Formula 1, obteniéndose como resultado un valor para el coeficiente de Sorensen de 0.79.

Con los mismos datos de píxeles a,b y c, se construye una matriz de error (Tabla 9) que generará información necesaria para aplicar la Formula 2, dando como resultado el coeficiente kappa de Cohen con valor de 0.79.

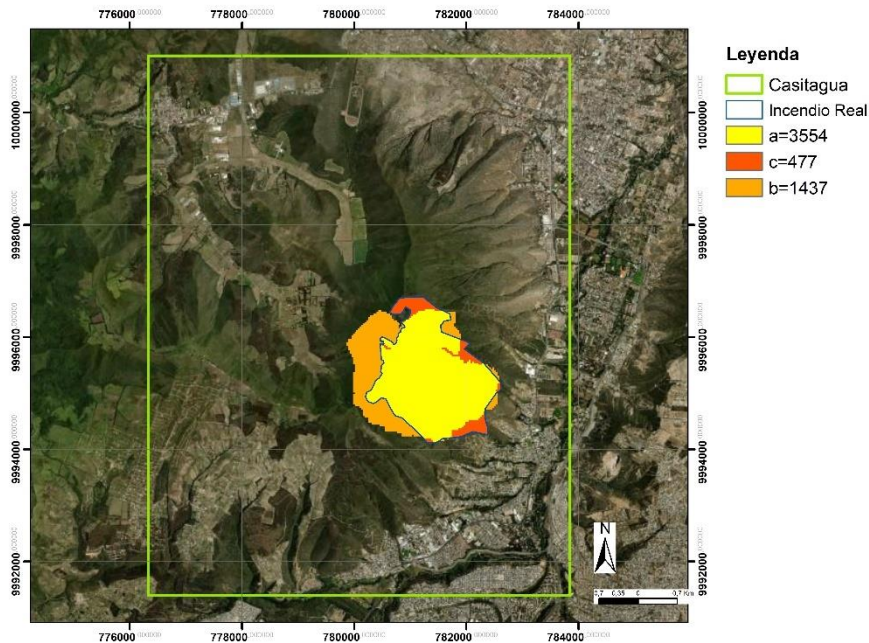
Tabla 10 *Matriz de error para el coeficiente kappa de Cohen*

		Incendio simulado		
		Celda quemada (Simulación)	Celda no quemada (Simulación)	Total
Incendio Real	Celda quemada (Real)	3554	1437	4991
	Celda no quemada (Real)	477	75103	75580
	Total	4037	76540	80571

Nota. Tomado de (Mollocana et al, 2021). Adaptado por la Autora, 2022.

Figura 36.

Cálculo de pixeles



Nota. Elaborado por la autora, 2022.

El programa FlamMap fue desarrollado en Estados Unidos por tal motivo aplica modelo de combustibles que fueron desarrollados por el mismo país, debido a eso los resultados obtenidos no pueden representar la realidad porque los modelos de combustibles fueron adaptados para la vegetación que es presente en el DMQ, esto para cubrir la necesidad de datos de entrada del programa, se obtendría mejores resultados con base de datos creados exclusivamente para simulaciones, o tomando directamente los datos de cobertura vegetal en cada zona de estudio aplicando una correcta metodología para no obtener un rango de error alto, generando así un modelo de combustible más fiable que represente la vegetación de los páramos, volcanes y cerros del DMQ.

Adicional, en la Tabla 9, los resultados demuestran que la importancia de caminos o senderos en este tipo zonas que están clasificadas como susceptibles a incendios forestales porque en la simulación donde se ha retirado las barreras se observan incendios con gran extensión, mientras que al agregar a la simulación las barreras cortafuegos ya existentes, que pertenecen a elementos naturales o caminos, se visualiza como los trayectos e incendio

disminuye, pero aún así los incendios siguen teniendo un área similar a la que no presenta barreras, entonces la importancia de crear más caminos o senderos púes en la simulación donde se agrega más senderos a los ya existentes el porcentaje de mitigación es mayor y la extensión del incendio disminuye, y además estos senderos implementados tienen la función de permitir a los transeúntes visitar estos lugares, a el cuerpo de bomberos permitiría llegar con mayor facilidad en caso de incendio.

4.4 Discusión

Este trabajo fue posible evidenciar la importancia de las barreras cortafuego, debido a que se estimó el porcentaje del área que se lograría mitigar, el área de incendio sin barreras vs el área con barreras implementadas tiene una gran diferencia por ello se hace hincapié en que es recomendable invertir económicamente en prevención esto se evidencia en otros trabajos realizados como el de los investigadores Molina, Castellano y Plant (2001), que analizaron la efectividad de implementar o modificar los combustibles, en el trabajo presente se analizó la creación de senderos o caminos que también es considerada una medida de mitigación contra incendios forestales, aunque al momento de ocurrir incendios forestales suele presentarse lluvias por ende deslizamientos, los caminos pueden volverse inaccesibles por la topografía propia del terreno y esto puede ser obstáculo para la movilización de personal destinado a extinguir incendios por lo tanto se puede realizar simulaciones de otras medidas de mitigación tomando en consideración la topografía y clima en caso de ocurrir un incendio.

Para poder gestionar incendios forestales en base a simulaciones en software es necesario que haya información adecuada para que los resultados tengan mayor nivel de confianza, por ejemplo las estaciones meteorológicas utilizadas se encuentran a kilómetros del lugar de estudio, no se usó un modelo diseñado para vegetación propia de la zona de estudio, todo esto genera que la simulación no represente la realidad, aún así el modelo es dinámico debido a los datos del archivo wxs lo que hace que aproxime a la realidad. (Mollocana et al, 2021).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se logró crear los ráster de altura, pendiente y orientación con ArcGIS, para crear la simulación para identificar las zonas más susceptibles a incendios forestales tomando como fecha de estudio los meses de julio y agosto del año 2019.
- Las zonas más susceptibles según la extensión de incendio fueron Pasochoa y Guagua Pichincha, debido a que presentan mayor cobertura vegetal en donde el fuego logra expandirse rápidamente y además la pendiente favorece al incendio forestal ocurrido.
- Las barreras cortafuego disminuyen la extensión del incendio pues evitan que el incendio siga propagándose, en zonas donde no hay gran cobertura vegetal y además no existe mucha pendiente las barreras no tuvieron gran impacto sobre el incendio.
- El modelo logró ser validado utilizando como caso de estudio el incendio forestal ocurrió en 2020 sobre el Casitagua, los errores obtenidos fueron de 0.79 y 0.78 respectivamente para coeficiente de kappa y Sorensen.

5.2 Recomendaciones

- Para la elaboración de los mapas de altura, pendiente y orientación es importante investigar la disponibilidad de cartas topográficas de la zona de estudio que posean una escala adecuada para que la simulación sea más precisa.
- Realizar trabajos que involucren la creación de modelos de combustibles adaptadas al tipo de vegetación que posee el DMQ.
- Analizar diferentes medidas de mitigación además de las naturales que puedan ser implementadas en el programa FlamMap.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ONU. (s.f). *Forest Fire*. <https://www.un-spider.org/category/disaster-type/forest-fire>
- FAO. (2001). *International handbook on forest fire protection. Technical guide for the countries of the Mediterranean basin*. <https://www.fao.org/forestry/27221-06293a5348df37bc8b14e24472df64810.pdf>
- Ouahiba Meddour-Sahar¹ , Raffaella Lovreglio² , Rachid Meddour¹ , Vittorio Leone³ , Arezki Derridj¹ (2012). *Fire and People in Three Rural Communities in Kabylia (Algeria): Results of a Survey*. *Scientific Research*(3,1)(30-40). https://www.scirp.org/pdf/OJF_2013012913500819.pdf
- UNISDR. (2017). *Wildfire Hazard and Risk Assessment* https://www.preventionweb.net/files/52828_06wildfirehazardandriskassessment.pdf
- WWF. (2017). *FORESTS ABLAZE Causes and effects of global forest fires*. <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Study-Forests-Ablaze.pdf>
- NWCG.(2006). *Fire Education, Prevention, and Mitigation Practices* [.https://gacc.nifc.gov/swcc/dc/azpdc/operations/documents/prevention-education/Reference-Material/Chapter%209_Fire%20Mitigation.pdf](https://gacc.nifc.gov/swcc/dc/azpdc/operations/documents/prevention-education/Reference-Material/Chapter%209_Fire%20Mitigation.pdf)
- Finney, M. A. (2006). An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In In: Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. 2006. *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings*. 28-30 March 2006; Portland, OR. *Proceedings RMRS-P-41*. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 213-220 (Vol. 41).

- Salis, S., Arca, B., Bacciu, V., Duce, D., & Spano, D. (2009, October). Assessment of fire severity in a Mediterranean area using FlamMap Simulator. In Eighth Symposium on Fire and Forest Meteorology (pp. 13-15).
- Van Hees, P. (2013). Validation and Verification of Fire Models for Fire Safety Engineering. *Procedia Engineering*. 62. 154-168. 10.1016/j.proeng.2013.08.052.
- SNGRE. (2014, 20 de agosto). El incendio más grave del año en Quito ocurrió ayer.
- MiAmbiente, (2015). *Metodología de investigación de causas que provocan los incendios forestales*.http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2902/Technical/INVESTIGACION%20DE%20CAUSAS%20DE%20OCURRENCIA%20DE%20INCENDIOS%20FORESTALES.pdf
- Silvae, y Rodríguez, F. (1999). A Forest fire simulation tool for economic planning in fire suppression management models: an application of the Arcar-Cardin strategic model. *Fire Economics, Planning, and Policy: Bottom Lines*, 143.
- Ferry, G. (1999). Federal Funding of Wildland Fire Management Programs: What Will One Billion Dollars Buy. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-173.
- Pedernera, P., y Julio, G. (1999, December). Improving the economic efficiency of combatting forest fires in Chile: The KITRAL system. In Proceedings of Symposium on Fire Economics, *Planning and Policy: Bottom Lines*, 173, 149-155.
- Encinas, A. H., Encinas, L. H., White, S. H., del Rey, A. M., & Sánchez, G. R. (2007). Simulation of forest fire fronts using cellular automata. *Advances in Engineering Software*, 38(6), 372-378.
- Kanga, S., y Singh, S. K. (2017). Forest Fire Simulation Modeling using Remote Sensing & GIS. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(5), 326- 332.
- Proaño Avilés, J. S., Trujillo Hidalgo, E. N., & López Pazmiño, R. A. (2021). Simulación de la propagación de incendios forestales utilizando barreras cortafuegos en el Volcán Ilaló,

Quito – Ecuador. *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*, 13(2), 20.
<https://doi.org/10.18272/aci.v13i2.2328>

Kılıç, S. (2015). Kappa Testi. *Journal of Mood Disorders*, 5(3), 142-144

Pausas, J. G. (2020). *Incendios forestales, una visión desde la ecología*. Madrid: Catarata.

Sánchez, J. J. M., de las Heras Ibáñez, J., & Sanz, J. M. H. (1991). Impacto ecológico de los incendios forestales. *Al-Basit: Revista de estudios albacetenses*, (29), 105-117.

Castillo, M., Pedernera, P., & Pena, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 19(3), 44-53.

Fernández, I., Morales, N., Olivares, L., Salvatierra, J., Gómez, M., & Montenegro, G. (2010). Restauración ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales. Chile: Grafica Lom

Mataix-Solera, J., y Guerrero, C. (2007). Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. *Incendios forestales, suelos y erosión hídrica*, 5-40.

MECN - INB. 2015. Plantas de los páramos del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. Quito-Ecuador: Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales del Instituto Nacional de Biodiversidad.

Rodenas Bou, G. (2016). Estudio del peligro de incendio forestal en el Parque Natural de Els Ports (Tarragona). [Universitat Politècnica de València].
<http://hdl.handle.net/10251/76135>

Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Martín, P., Vilar, L., ... & Salas, J. (2007). Generación de un Modelo de Peligro de Incendios Forestales mediante Teledetección y SIG. *Teledetección-Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Madrid: Editorial Martín, 19-26.

Velásquez, D. F. (2013). *Modelamiento y simulación de propagación de incendios forestales en los Cerros Orientales de la ciudad de Bogotá DC usando Farsite*. [tesis de doctorado,

Universidad de Murcia]. Repositorio Institucional

UM.<https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/10878/TYAR1de5.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Hidalgo, J. A. V., Olmedo, P. C., Lliteras, M. T. F., & Filgueira, C. F. (2000). Planificar la prescripción para reducir combustibles y disminuir el impacto sobre el suelo en las quemas prescritas. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (9), 189-198.
- Pérez-Salicrup, D. R., Ortíz Mendoza, R., Garduño Mendoza, E., Martínez-Torres, H. L., Ocegüera Salazar, K. A., Quintero Gradilla, S., ... & González Cabán, A. (2018). Coordinación institucional para la realización de quemas prescritas y quemas controladas en México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(49), 252-270.
- Becerra, L. M., Rodríguez, M. R., Martínez, I. C., Vichot, M. B., & Sospedra, R. S. (2004). Efectos de quemas prescritas sobre las propiedades del suelo en bosques de *Pinus tropicalis* Morelet, en Cuba. *Revista Chapingo. Serie Ciencias forestales y del ambiente*, 10(1), 31-35.
- Domènech Jardí, R., Pastor Ferrer, E., Agueda Costafreda, A., Sans, A., Navascués, P., & Planas Cuchi, E. (2013). Modelos de combustible para caracterizar el comportamiento de los incendios en regenerados clareados de pino carrasco. *Montes*, (115), 22-29.
- 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.
- Ervilha, A. R., Pereira, J. M. C., & Pereira, J. C. F. (2017). On the parametric uncertainty quantification of the Rothermel's rate of spread model. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 37-53.
- Guzmán, M. G., Hernando, C., Galilea, C. D., & Olmo, J. M. (2004). Modelización del comportamiento del fuego en los incendios forestales: modelos empíricos de predicción

- de la velocidad de propagación desarrollados en túnel de viento. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (18), 269-274.
- Green, L., y Bentley, R. (1967). BARRERAS CORTAFUEGO HERBÁCEAS PARA EL CONTROL DE LOS INCENDIOS FORESTALES. *Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los EE.UU.*, Riverside. https://www.produccion-animal.com.ar/incendios_y_uso_del_fuego/12-barreras_cortafuego_herbaceas.pdf
- Finney, M. A. (2006). An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In *In: Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. 2006. Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings. 28-30 March 2006; Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 213-220 (Vol. 41).*
- Mollocana Lara, J. G., Álvarez Mendoza, C. I., & Jaramillo Coronel, L. (2021). EVALUACIÓN DE INFORMACIÓN RELACIONADA CON COMBUSTIBLES EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO PARA EL MODELADO Y SIMULACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES, CASO DE ESTUDIO: INCENDIO DEL CERRO ATACAZO. *La Granja: revista de ciencias de la vida* 34(2). <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20848>
- Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. Departamento de Agricultura de EE. UU., Estación experimental de bosques y pastizales entre montañas. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/32533>
- Tricone, F and Anderson, T. R (2018) Guía para modelos de combustible de comportamiento de fuego en ecosistemas tropicales. *Sarteneja, Belize*,31.
- Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. Estados Unidos: Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture.

- Anderson, H. E. (1981). *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*. Estados Unidos: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Andrews, P. L. (2018). The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation. *Gen. Tech.*, 121, 371.
- Bonilla, R. (2001). Guía técnica en prevención y control de incendios forestales. *PROPETEN-Conservación Internacional. 2001*. Guatemala: GT.
- Finney, M. A. (2006). An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In In: Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. 2006. *Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station*, 41, 213-220.
- Oliveras, I., Bell, T. (2008) An Analysis of the Australian Literature on Prescribed Burning. *Journal of Forestry*, 106, 31 - 37.
- Incendios forestales tienen alto impacto ambiental. (2018). Quito Informa
<https://bit.ly/3aVR4KH>
- Jimenez, E. (2019). Taller de comportamiento del fuego: Guía para el empleo de simuladores de comportamiento del fuego [presentación de diapositivas]. Plirifor.
<https://bit.ly/3Qf25X6>
- Chirivella, L. (2017, 17 de Julio). Barreras naturales frente a incendio, *Las Provincias*.
<https://bit.ly/3Ors4Ze>

7. ANEXOS

Anexo 1. Datos meteorológicos de muestra de julio del 2019 por estaciones

Guamaní

Year	Mth	Day	Time	Temp	RH	HrlyPcp	WindSpd	WindDir	CloudCov
2019	7	1	0000	16	53	0.00	0	39	0
2019	7	1	0100	15	65	0.00	0	344	0
2019	7	1	0200	15	62	0.00	1	78	0
2019	7	1	0300	15	61	0.00	0	248	0
2019	7	1	0400	14	65	0.00	0	141	0
2019	7	1	0500	13	68	0.00	0	182	0
2019	7	1	0600	13	69	0.00	1	93	0
2019	7	1	0700	14	64	0.00	0	238	0
2019	7	1	0800	17	53	0.00	0	236	0
2019	7	1	0900	20	40	0.00	1	243	0
2019	7	1	1000	22	34	0.00	1	138	0
2019	7	1	1100	22	33	0.00	4	96	0
2019	7	1	1200	23	31	0.00	5	97	0
2019	7	1	1300	24	30	0.00	4	99	0
2019	7	1	1400	23	34	0.00	3	96	0
2019	7	1	1500	23	33	0.00	3	98	0
2019	7	1	1600	22	37	0.00	3	93	0
2019	7	1	1700	21	38	0.00	2	97	0
2019	7	1	1800	19	47	0.00	1	76	0
2019	7	1	1900	17	68	0.00	2	72	0
2019	7	1	2000	16	71	0.00	1	53	0
2019	7	1	2100	15	82	0.00	1	61	0

San Antonio

2019	7	1	0000	15	53	0.00	0	69	0
2019	7	1	0100	14	56	0.00	0	315	0
2019	7	1	0200	14	56	0.00	0	291	0
2019	7	1	0300	14	55	0.00	1	277	0
2019	7	1	0400	13	58	0.00	0	253	0
2019	7	1	0500	13	62	0.00	0	260	0
2019	7	1	0600	12	64	0.00	0	188	0
2019	7	1	0700	13	60	0.00	0	199	0
2019	7	1	0800	16	53	0.00	1	163	0
2019	7	1	0900	20	39	0.00	2	151	0
2019	7	1	1000	21	37	0.00	3	165	0
2019	7	1	1100	22	35	0.00	2	151	0
2019	7	1	1200	22	35	0.00	2	44	0
2019	7	1	1300	22	45	0.00	3	34	0
2019	7	1	1400	21	52	0.00	3	358	0
2019	7	1	1500	20	57	0.00	2	34	0
2019	7	1	1600	19	60	0.00	2	336	0
2019	7	1	1700	18	65	0.00	2	324	0
2019	7	1	1800	16	73	0.00	2	357	0
2019	7	1	1900	15	78	0.00	2	357	0
2019	7	1	2000	14	89	0.00	2	24	0
2019	7	1	2100	13	94	0.00	2	31	0
2019	7	1	2200	13	96	0.00	1	24	0
2019	7	1	2300	13	93	0.00	0	95	0

El Camal

Year	Mth	Day	Time	Temp	RH	HrlyPcp	WindSpd	WindDir	CloudCov
2019	7	1	0000	13	49	0.00	1	161	0
2019	7	1	0100	13	49	0.00	1	183	0
2019	7	1	0200	13	49	0.00	0	304	0
2019	7	1	0300	12	52	0.00	1	248	0
2019	7	1	0400	12	54	0.00	1	233	0
2019	7	1	0500	12	54	0.00	1	215	0
2019	7	1	0600	12	56	0.00	1	228	0
2019	7	1	0700	13	55	0.00	1	227	0
2019	7	1	0800	15	48	0.00	1	154	0
2019	7	1	0900	16	47	0.00	2	151	0
2019	7	1	1000	17	43	0.00	2	151	0
2019	7	1	1100	18	41	0.00	2	115	0
2019	7	1	00	18	40	0.00	2	106	0
2019	7	1	1300	18	40	0.00	2	118	0
2019	7	1	1400	19	39	0.00	2	111	0
2019	7	1	1500	19	41	0.00	3	71	0
2019	7	1	1600	18	40	0.00	2	99	0
2019	7	1	1700	17	46	0.00	2	135	0
2019	7	1	1800	16	48	0.00	2	133	0
2019	7	1	1900	15	49	0.00	2	140	0
2019	7	1	2000	14	51	0.00	2	190	0
2019	7	1	2100	14	54	0.00	1	220	0
2019	7	1	2200	13	64	0.00	1	56	0
2019	7	1	2300	13	65	0.00	1	253	0

Carapungo

Year	Mth	Day	Time	Temp	RH	HrlyPcp	WindSpd	WindDir	CloudCov
2019	7	1	0000	13	60	0.00	2	327	0
2019	7	1	0100	13	56	0.00	1	324	0
2019	7	1	0200	13	56	0.00	1	320	0
2019	7	1	0300	13	56	0.00	1	302	0
2019	7	1	0400	12	56	0.00	1	301	0
2019	7	1	0500	12	57	0.00	0	231	0
2019	7	1	0600	13	57	0.00	0	166	0
2019	7	1	0700	14	54	0.00	0	105	0
2019	7	1	0800	15	49	0.00	2	133	0
2019	7	1	0900	18	41	0.00	3	152	0
2019	7	1	1000	19	37	0.00	3	137	0
2019	7	1	1100	19	36	0.00	2	128	0
2019	7	1	1200	20	33	0.00	3	130	0
2019	7	1	1300	21	31	0.00	3	148	0
2019	7	1	1400	20	36	0.00	3	72	0
2019	7	1	1500	20	45	0.00	2	342	0
2019	7	1	1600	18	54	0.00	3	347	0
2019	7	1	1700	17	59	0.00	3	337	0
2019	7	1	1800	16	66	0.00	3	317	0
2019	7	1	1900	14	76	0.00	3	299	0
2019	7	1	2000	14	77	0.00	2	318	0
2019	7	1	2100	13	83	0.00	2	301	0
2019	7	1	2200	13	82	0.00	1	331	0
2019	7	1	2300	12	89	0.00	1	351	0

Tumbaco

Year	Mth	Day	Time	Temp	RH	HrlyPcp	WindSpd	WindDir	CloudCov
2019	7	1	0000	16	53	0.00	0	39	0
2019	7	1	0100	15	65	0.00	0	344	0
2019	7	1	0200	15	62	0.00	1	78	0
2019	7	1	0300	15	61	0.00	0	248	0
2019	7	1	0400	14	65	0.00	0	141	0
2019	7	1	0500	13	68	0.00	0	182	0
2019	7	1	0600	13	69	0.00	1	93	0
2019	7	1	0700	14	64	0.00	0	238	0
2019	7	1	0800	17	53	0.00	0	236	0
2019	7	1	0900	20	40	0.00	1	243	0
2019	7	1	1000	22	34	0.00	1	138	0
2019	7	1	1100	22	33	0.00	4	96	0
2019	7	1	1200	23	31	0.00	5	97	0
2019	7	1	1300	24	30	0.00	4	99	0
2019	7	1	1400	23	34	0.00	3	96	0
2019	7	1	1500	23	33	0.00	3	98	0
2019	7	1	1600	22	37	0.00	3	93	0
2019	7	1	1700	21	38	0.00	2	97	0
2019	7	1	1800	19	47	0.00	1	76	0
2019	7	1	1900	17	68	0.00	2	72	0
2019	7	1	2000	16	71	0.00	1	53	0
2019	7	1	2100	15	82	0.00	1	61	0
2019	7	1	2200	14	87	0.00	1	49	0
2019	7	1	2300	14	85	0.00	1	69	0