



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**DETERMINACIÓN DE ÁREAS VULNERABLES A INCENDIOS
FORESTALES Y CÁLCULO DE PROBABILIDAD DE
OCURRENCIA MEDIANTE LÓGICA FUZZY APLICANDO
HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS, EN EL DISTRITO
METROPOLITANO DE QUITO**

REALIZADO POR:

**MARÍA JOSÉ COLUMBA TALLANA
WENDY ALEXANDRA QUISILEMA RON**

SANGOLQUÍ – ECUADOR

SEPTIEMBRE, 2013

CERTIFICACIÓN

Ing. Oswaldo Padilla

PhD. Theofilos Toulkeridis

Certifican:

Que la investigación titulada **“DETERMINACIÓN DE ÁREAS VULNERABLES A INCENDIOS FORESTALES Y CÁLCULO DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA MEDIANTE LÓGICA FUZZY APLICANDO HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS, EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”**, realizada por las señoritas María José Columba Tallana y Wendy Alexandra Quisilema Ron ha sido revisado prolijamente y cumple con los requerimientos: teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la ESPE, por lo que nos permitimos acreditarlo y autorizar su entrega al Ing. Francisco León, en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente.

Sangolquí, Septiembre 2013.

ING. OSWALDO PADILLA
DIRECTOR

PhD. THEOFILOS TOULKERIDIS
CODIRECTOR

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD

María José Columba Tallana
Wendy Alexandra Quisilema Ron

Declaramos que:

El proyecto de grado titulado “**DETERMINACIÓN DE ÁREAS VULNERABLES A INCENDIOS FORESTALES Y CÁLCULO DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA MEDIANTE LÓGICA FUZZY APLICANDO HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS, EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO**”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas bibliográficas correspondientes.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Septiembre 2013.

María José Columba Tallana

Wendy Alexandra Quisilema Ron

AUTORIZACIÓN

María José Columba Tallana
Wendy Alexandra Quisilema Ron

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado **“DETERMINACIÓN DE ÁREAS VULNERABLES A INCENDIOS FORESTALES Y CÁLCULO DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA MEDIANTE LÓGICA FUZZY APLICANDO HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS, EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Septiembre 2013.

María José Columba Tallana

Wendy Alexandra Quisilema Ron

DEDICATORIA

“No hay verdad absoluta. No la busques en los libros, no la busques en los demás.

La verdad muta, como todo en el Universo.

Si algo se ajusta a tu corazón, esa es tu verdad”.

A mi madre Beatriz y a Fernando (+), por ser los principales guías en mi formación como ser humano, porque para mí no hay ejemplo más grande de superación y entrega como el de ustedes, por el apoyo incondicional en cada una de mis decisiones, por enseñarme a luchar y nunca darme por vencida, a ustedes va dedicada esta meta cumplida.

A mi hermano Daniel, por ser el eterno compañero de risas y lágrimas, por llenar mi vida de alegría y ser mi mayor fuerza para vencer cualquier obstáculo.

A mi hermana Illiary, el lazo que nos une es más fuerte que la distancia que hoy nos separa.

María José Columba

DEDICATORIA

*“Cuando alguien desea algo, debe saber que corre riesgos
y por eso la vida vale la pena”*

Paulo Coelho

A mis padres Luis y Fernanda, por ser quienes me han guiado siempre en este largo caminar, que aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado apoyándome y brindándome todo su amor, gracias por sus consejos, gracias por estar a mi lado y por enseñarme que lo que se empieza se debe terminar, gracias al ejemplo que ustedes me han dado es que he logrado culminar esta meta que me propuse.

A mi hermana Angie, por ser mi fiel amiga quien siempre ha estado a mi lado, apoyándome siendo uno de los pilares que nunca me han dejado caer, con quien he compartido tantos momentos de felicidad y en los momentos de tristeza nos hemos apoyado mutuamente, gracias por estar a mi lado ñaña.

A mi hermano Noé, por ser mi inspiración, quien con su sonrisa me alegra la vida, motivándome a ser mejor cada día, gracias ñaño porque tú eres mi pequeño a quien quiero tanto.

Wendy Quisilema

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento principalmente a Dios por estar a nuestro lado iluminando y guiando cada uno de nuestros pasos en las diferentes etapas de nuestra vida.

A nuestros padres y hermanos, un profundo y eterno agradecimiento por ser ellos nuestra principal fuente de inspiración para lograr culminar con éxito esta meta.

A la Escuela Politécnica del Ejército, por su inigualable aporte a la comunidad al formar profesionales con conocimientos sólidos, capaces y comprometidos con el desarrollo del Ecuador.

Al componente humano y profesional que integra la Carrera de Ingeniería Geográfica y de Medio Ambiente por compartir su experiencia y conocimiento a lo largo de esta etapa formativa, en especial al Ing. Oswaldo Padilla y PhD. Theofilos Toulkeridis quienes fueron nuestros principales guías y colaboradores en el desarrollo del presente proyecto.

A nuestros compañeros y amigos por los buenos momentos compartidos en este largo caminar.

Y finalmente a cada una de las personas que de una u otra forma colaboraron en la culminación de este proyecto.

María José Columba Tallana
Wendy Alexandra Quisilema Ron

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1

PRESENTACION 1

1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	1
1.1.1 GENERALIDADES DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO (DMQ)	1
1.1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	1
1.1.3 ÁREA DE INFLUENCIA	2
1.2 ANTECEDENTES	3
1.3 DEFINICIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	5
1.5 OBJETIVO GENERAL	6
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
1.7 METAS (CUANTIFICABLES)	7

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO 9

2.1 CONCEPTOS BÁSICO EN LA GESTIÓN DE RIESGOS.....	9
2.2 INCENDIOS FORESTALES.....	12
2.2.1 CONCEPTO INCENDIO FORESTAL.....	12
2.2.2 GEOMETRÍA Y DINÁMICA DE UN INCENDIO	12
2.2.2.1 GEOMETRÍA	13
2.2.2.2 DINÁMICA	13
2.2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS INCENDIOS FORESTALES	14
2.2.4 CONCEPTO FUEGO	15

2.2.5 TRIÁNGULO Y TETRAEDRO DEL FUEGO	15
2.2.6 FORMAS DE PROPAGACIÓN DE CALOR	16
2.2.7 FASES DE INICIO DEL FUEGO	17
2.2.8 FACTORES QUE INFLUYEN EL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO	18
2.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	18
2.3.1 GENERALIDADES.....	19
2.4 ANÁLISIS MULTITEMPORAL.....	19
2.4.1 DEFINICIONES.....	19
2.4.2 TRATAMIENTO Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	23
2.5 ANÁLISIS DE REDES	31
2.5.1 CONCEPTO DE RED	31
2.5.2 COMPONENTES DE UNA RED.....	32
2.5.2.1 NODOS.....	32
2.5.2.2 EJES.....	33
2.5.3 APLICACIONES	34
2.5.4 TIPO DE REDES	35
2.5.4.1 REDES GEOMÉTRICAS	35
2.5.4.2 REDES DE TRANSPORTE	35
2.6 LÓGICA DIFUSA.....	36
2.6.1 APLICACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA	44
2.7 SISTEMAS Y MODELOS	44
2.7.1 SISTEMAS.....	44
2.7.2 MODELOS.....	45
2.7.3 RELACIÓN ENTRE SISTEMAS Y MODELOS	46
2.8 VALIDACIÓN DE MODELOS	47
2.8.1 PRUEBAS DE VALIDACIÓN.....	48
2.9 BASES DE DATOS	49
2.9.1 GENERALIDADES.....	49
2.9.2 CONSTRUCCIÓN DE BASES DE DATOS GEOGRÁFICAS	50
2.10 INFRAESTRUCTURA DE DATOS ESPACIALES.....	51
2.10.1 CONCEPTO.....	51
2.10.2 UTILIDADES DE UNA IDE	52
2.10.3 PRINCIPIOS DE UNA IDE.....	52
2.10.4 COMPONENTES DE UNA IDE.....	53
2.11 NORMATIVA	58
2.11.1 NORMAS ISO 19100	58
2.11.2 ESPECIFICACIONES OPEN GEOSPATIALCONSORTIUM-OGC	62

CAPITULO 3**METODOLOGIA 64**

3.1 ZONAS DE RECURRENCIA A INCENDIOS FORESTALES	64
3.1.1 TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES SATELITALES	65
3.1.2 IDENTIFICACIÓN Y EXTRACCIÓN DE ÁREAS QUEMADAS	71
3.2 VARIABLES	75
3.2.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	75
3.2.2 ANÁLISIS DE DATOS Y VARIABLES.....	76
3.2.3 INTERPOLACIÓN DE LOS DATOS	78
3.2.4 ANÁLISIS DE METODOLOGÍA DE LÓGICA FUZZY.....	85
3.2.5 ANÁLISIS DE VARIABLES SEGÚN CASOS DE LÓGICA FUZZY	85
3.3 METODOLOGÍA DE DESARROLLO EN SIG.....	91
3.3.1 MODELO DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES 1	91
3.3.2 MODELO DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES 2	93
3.3.3 MODELO DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES 1	94
3.4 CÁLCULO DEL AJUSTE DE LOS MODELOS	96
3.5 ANÁLISIS DE REDES	98
3.6 ZONAS DE RECURRENCIA.....	102

CAPITULO 4**RESULTADOS..... 105**

4.1 RECURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES	105
4.1.1 COMBINACIÓN DE BANDAS	105
4.1.2 ÍNDICES ESPECTRALES.....	106
4.1.3 ÁREAS DE RECURRENCIA A INCENDIOS FORESTALES.....	106
4.2 LÓGICA FUZZY	108
4.2.1 ANÁLISIS DE MODELOS OBTENIDOS.....	108
4.2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS	109

4.3 INFORME DE VALIDACIÓN DE LOS MODELOS	110
4.4 ANÁLISIS DE REDES	113
4.4.1 RUTAS ÓPTIMAS	113
4.4.2 ÁREAS DE SERVICIO	114
CAPITULO 5	
IMPLEMENTACIÓN.....	124
5.1 GENERACIÓN DE METADATOS.....	124
5.2 GENERACIÓN BASE DE DATOS EN POSTGRESQL	125
5.3 VISUALIZACIÓN EN LA IDEESPE	126
CAPITULO 6	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	128
6.1 CONCLUSIONES	128
6.2 RECOMENDACIONES.....	130
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	132
ANEXOS	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1.1. Mapa de Ubicación de la Provincia de Pichincha en el territorio de Ecuador (Distrito Metropolitano de Quito)

Figura. 1.2. Incendios Forestales en el DMQ

Figura. 2.1. Incendio Forestal

Figura. 2.2. Partes principales de un incendio.

Figura. 2.3. Clasificación de incendios forestales

Figura. 2.4. Triángulo del Fuego

Figura. 2.5. Tetraedro del Fuego

Figura. 2.6. Formas de propagación del calor en un incendio forestal

Figura. 2.7. Representación gráfica de un SIG

Figura. 2.8. Pre-Proceso

Figura. 2.9. Red

Figura. 2.10. Componentes de una red

Figura. 2.11. Nodos

Figura. 2.12. Ejes

Figura. 2.13. Red Geométrica

Figura. 2.14. Red de Transporte

Figura. 2.15. Probabilidad tomando una variable

Figura. 2.16. Puntos importantes del modelo

Figura. 2.17. Probabilidad Creciente

Figura. 2.18. Probabilidad total con más de dos variables

Figura. 2.19. Sistemas y Modelos

Figura. 2.20. Estructura de una IDE

Figura. 2.21. Componentes de una IDE

Figura. 2.22. Interoperabilidad

Figura. 2.23. Software IDE

- Figura. 3.1.** Corrección Geométrica
- Figura. 3.2.** Zona de estudio
- Figura. 3.3.** Corrección de gaps Landsat ETM+ 2009
- Figura. 3.4.** Conversión a reflectividad y corrección atmosférica
- Figura. 3.5.** Iluminación
- Figura. 3.6.** Corrección Topográfica
- Figura. 3.7.** Combinación de bandas
- Figura. 3.8.** Índice Normalizado de Variación de la Vegetación (NDVI)
- Figura. 3.9.** *Normalized Burn Ratio* (NBR)
- Figura. 3.10.** Índice Área Quemada (IAQ o BAI)
- Figura. 3.11.** Diferencia de Índices
- Figura. 3.12.** Clasificación No Supervisada
- Figura. 3.13.** Digitalización áreas quemadas
- Figura. 3.14.** Proceso de IDW
- Figura. 3.15.** Validación en el IDW
- Figura. 3.16.** Superficie suavizada con IDW
- Figura. 3.17.** Caso 2. Lógica Fuzzy. Precipitación.
- Figura. 3.18.** Caso 2. Lógica Fuzzy. Humedad relativa.
- Figura. 3.19.** Caso 3. Lógica Fuzzy. Temperatura.
- Figura. 3.20.** Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Vías de comunicación
- Figura. 3.21.** Caso 3. Lógica Fuzzy. Distancia red hídrica.
- Figura. 3.22.** Caso 3. Lógica Fuzzy. Pendiente.
- Figura. 3.23.** Caso 3. Lógica Fuzzy. Combustibilidad de la Vegetación.
- Figura. 3.24.** Atributos Red Vial
- Figura. 3.25.** Creación Network Dataset
- Figura. 3.26.** Zonas de mayor densidad de recurrencia de incendios forestales
- Figura. 3.27.** Aplicación de la herramienta *Closest Facility*
- Figura. 3.28.** Aplicación de la herramienta *Service Area*
- Figura. 4.1.** Combinación de bandas
- Figura. 4.2.** Comparación Índices Espectrales

Figura. 4.3. Recurrencia de Incendios Forestales

Figura. 4.4. Modelo Óptimo (julio, agosto, septiembre)

Figura. 4.5. Modelo Óptimo (octubre, noviembre, diciembre)

Figura. 4.6. Rutas Óptimas

Figura. 4.7. Áreas de servicio en 30 minutos

Figura. 4.8. Estaciones de bomberos cercanas a las zonas de mayor densidad de ocurrencia

Figura. 4.9 Áreas de servicio de la Estación Comandante Jorge Cabrera

Figura. 4.10. Áreas de servicio de la Estación Comandante Carlos Gálvez

Figura. 4.11. Áreas de servicio de la Estación Cabo Pablo Lemus

Figura. 4.12. Áreas de servicio de la Estación El Tingo

Figura. 4.13. Áreas de servicio de la Estación Pifo

Figura. 4.14. Áreas de servicio de la Estación Checa

Figura. 5.1. Metadatos

Figura. 5.2. Generación base de datos INCENDIO DMQ e incorporación de la información.shp

Figura. 5.3. Generación archivo MapFile

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. 2.1. Tipos de Amenaza

Tabla. 2.2. Unidad Mínima de Mapeo

Tabla. 2.3. Utilidades de una IDE

Tabla 3.1. Imágenes satelitales utilizadas

Tabla 3.2. Recopilación de Información

Tabla. 3.3. Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio para la variable Precipitación

Tabla. 3.4. Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio para la variable Humedad Relativa

Tabla. 3.5. Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio para la variable Temperatura

Tabla. 3.6. Casos Lógica Fuzzy

Tabla. 3.7. Pertenencia de la variable a cada función de Lógica Fuzzy

Tabla. 3.8. Desviaciones estándar de los modelos de la época seca (julio, agosto, septiembre)

Tabla. 3.9. Ajuste de los modelos (julio, agosto, septiembre)

Tabla. 3.10. Desviaciones estándar de los modelos de la época seca (octubre, noviembre, diciembre)

Tabla 3.11. Ajuste de los modelos (octubre, noviembre, diciembre)

Tabla 3.12. Límite Máxima de Velocidad

Tabla 3.13. Estaciones de Bomberos

Tabla. 4.1. Porcentaje área afectada

Tabla. 4.2. Validación de los modelos (época julio a septiembre)

Tabla. 4.3. Validación de los modelos (época octubre a diciembre)

Tabla. 4.4. Tiempo de respuesta

Tabla. 4.5. Áreas de servicio en 30 minutos

Tabla. 4.6. Áreas de servicio de la Estación Comandante Jorge Cabrera

Tabla. 4.7. Áreas de servicio de la Estación Comandante Carlos Gálvez

Tabla. 4.8. Áreas de servicio de la Estación Cabo Pablo Lemus

Tabla. 4.9. Áreas de servicio de la Estación El Tingo

Tabla. 4.10. Áreas de servicio de la Estación Pifo

Tabla. 4.11. Áreas de servicio de la Estación Checa

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo. 3.1. Características de las imágenes satelitales

Anexo. 3.2. Parámetros de calibración de las imágenes Landsat TM y ETM+

Anexo. 5.1. Archivo xml del metadato de la VIA

Anexo. 5.2. Archivo INCENDIODMQ.map

Anexo. 5.3. Archivo config_ INCENDIODMQ.xml

Anexo. 5.4. Archivo search.xml

Anexo. 5.5. Archivo layerinfo.xml

ABREVIATURAS

CBDMQ: Cuerpo de Bomberos del Distrito Metropolitano de Quito

CRID: Centro Regional de Información sobre Desastres para América Latina y El Caribe.

CSW: Servicio de Catálogo

DMQ: Distrito Metropolitano de Quito

GML: Lenguaje de Mercado Geográfico

IAQ: Índice de Área Quemada

IDE: Infraestructura de Datos Espaciales

IDEE: Infraestructura de Datos Espaciales España

IDEESPE: Infraestructura de Datos Espaciales de la Escuela Politécnica del Ejército.

IDEJAEN: Infraestructura de Datos Espaciales Jaén.

IGM: Instituto Geográfico Militar

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía- México

ISO: International Organization for Standardization

KML: Keyhole Markup Language

MAE: Ministerio de Ambiente Ecuador

MARN: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador.

NBR: Normalized Burn Ratio

ND: Nivel Digital

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

OGC: Open Geospatial Consortium

SIG: Sistema de Información Geográfica

SNGR: Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos

XML: Extensible Markup Language

WCS: Servicio de Coberturas en Web

WFS: Servicio de Fenómenos en la Web

WMS: Servicio de Mapas en Web

RESUMEN

En este proyecto se propone determinar las áreas vulnerables a incendios forestales y su cálculo de probabilidad de ocurrencia mediante la metodología de Lógica Fuzzy, generando modelos de la ocurrencia de incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito, que cada época seca es afectado por dicho fenómeno.

Cabe recalcar que también se determinará rutas óptimas de respuesta de las estaciones de servicio del Cuerpo de Bomberos para áreas con alta probabilidad de ser nuevamente quemadas.

La metodología es desarrollada con el análisis multitemporal a través de imágenes satelitales, también el uso de variables que son los parámetros para el estudio de la Lógica Fuzzy. Obteniéndose así algunos modelos, en donde se definirá cuál de ellos tiene un mejor ajuste acercado a la realidad. Otro resultado en este proyecto son las rutas óptimas que se propondrá al Cuerpo de Bomberos para llegar con mayor rapidez hacia las zonas de mayor densidad de recurrencia de incendios forestales, el tiempo de asistencia varía desde 5 hasta 40 minutos.

Posteriormente se procede a implementar en el portal de Infraestructura de Datos Espaciales de la Escuela Politécnica del Ejército (IDEESPE) para la visualización de la información generada mediante ISO 19100 y OGC.

Palabras Clave:

Lógica Difusa

Incendios Forestales

Probabilidad

Ocurrencia

Áreas Vulnerables

SUMMARY

This project proposes to identify vulnerable areas to forest fires and their calculate of occurrence's probability using the methodology of Fuzzy Logic, generating patterns of forest fires in the Metropolitan District of Quito, which dry season is affected by this phenomenon.

Also, it is noteworthy that determine optimal routes of response stations Fire Department for areas with high probability of being burned again.

The methodology is developed with multitemporal analysis through of satellite images, also the use of variables that are the parameters for the study of fuzzy logic. So, to obtain some models, where define which of them has a better fit closer to reality. Another result of this project are the optimal routes to be proposed to the Fire Department to get faster towards higher density areas of recurrent wildfires, assistance time varies from 5-40 minutes.

Later, we proceed to implement the portal Spatial Data Infrastructure of the Army Polytechnic School (IDEESPE) for displaying information generated by ISO 19100 and OGC

Keywords:

Fuzzy

Wildfires

Probability

Occurence

Vulnerable Areas

PROLOGO

La ocurrencia de incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito, es un escenario preocupante en el ámbito social, ambiental y económico, por lo cual la siguiente investigación, responde a la necesidad e interés de generar información cartográfica útil para las distintas autoridades competentes en el DMQ en la toma de decisiones de prevención y/o mitigación de incendios forestales.

En la presente investigación se detalla la metodología utilizada para determinar las zonas de recurrencia y ocurrencia de incendios forestales, adicionalmente se analiza el tiempo y áreas de servicio de cada estación del Cuerpo de Bomberos en el Distrito Metropolitano de Quito.

Finalmente los resultados obtenidos en esta investigación se los puede visualizar en el Geoportal IDEESPE.

CAPITULO 1

PRESENTACION

1.1 Descripción del Área de Estudio

1.1.1. Generalidades del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)

“El DMQ es un conjunto territorial con una superficie de 4228.02 Km², localizado en un entorno biodiverso, de múltiples contrastes en lo geográfico, ecológico y paisajístico; con una topografía irregular y con alturas que varían de 440 a 4840 metros sobre el nivel del mar (msnm) que influye directamente en el clima que posee” (Atlas de Amenazas Naturales del Distrito Metropolitano de Quito, 2010).

El paisaje accidentado es el resultado de los procesos geodinámicos con su compleja geología estructural y manifestaciones volcánicas, cuyos productos predominan en la zona de estudio.

1.1.2. Ubicación Geográfica

El DMQ perteneciente a la provincia de Pichincha, Ecuador, situada en la zona central norte de la Cordillera de los Andes, que atraviesa el ecuador de Norte a Sur. La provincia tiene un área de 953.590 hectáreas, de las cuales el Distrito Metropolitano comprende más de 422 802 hectáreas, incluyendo a la ciudad de Quito propiamente dicha así como 33 parroquias rurales que rodean al núcleo urbano (Ilustre Municipio Metropolitano de Quito, 2013).

1.1.3. Área de influencia

El área de estudio se encuentra dentro del Distrito Metropolitano de Quito (Figura. 1.1.). Sus límites son: al Norte: Provincia de Imbabura. Sur: cantones Rumiñahui y Mejía. Al Este: cantones Pedro Moncayo, Cayambe y Provincia de Napo. Oeste: cantones Pedro Vicente Maldonado, Los Bancos y Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas.

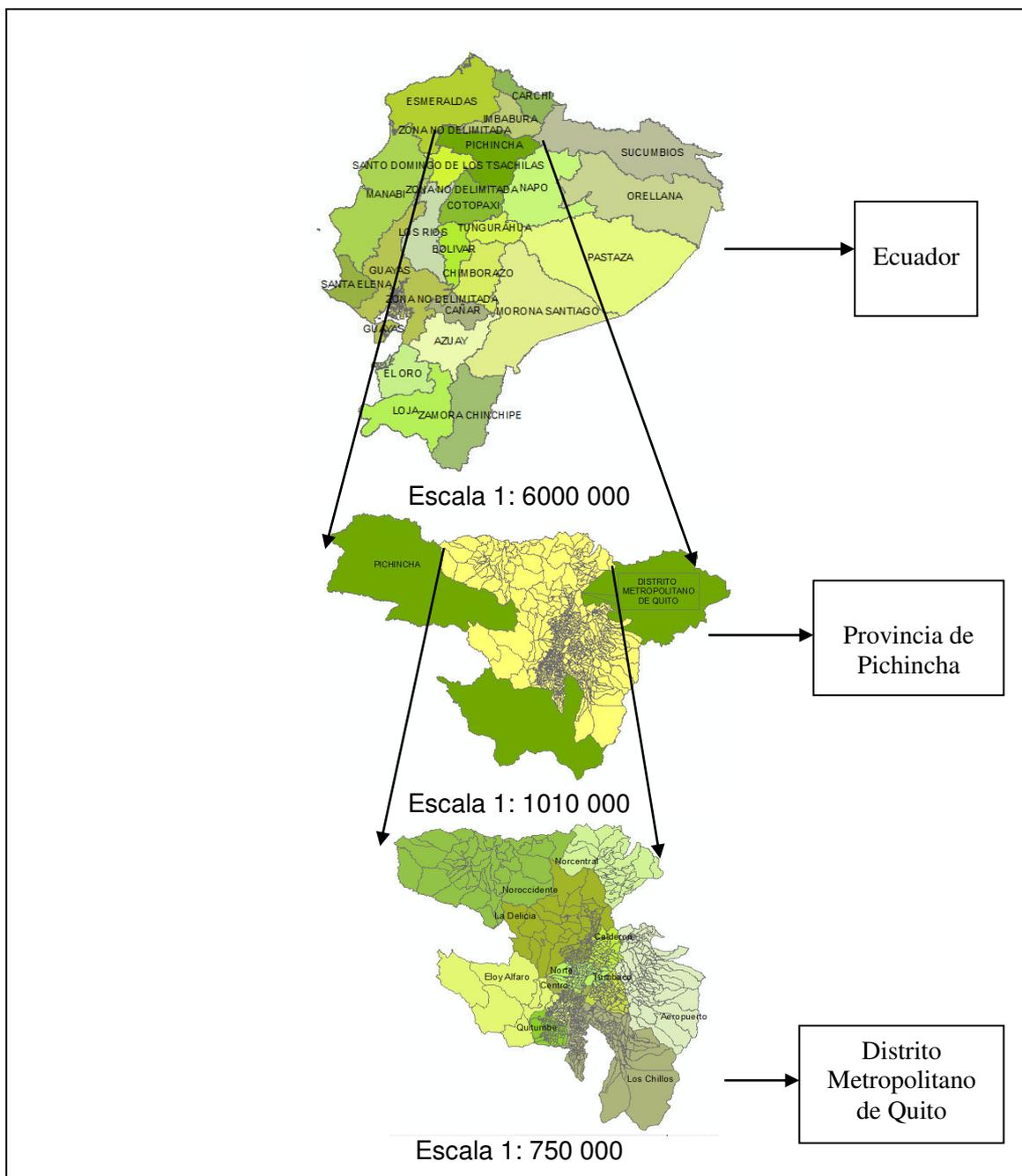


Figura. 1.1. Mapa de Ubicación de la Provincia de Pichincha en el territorio de Ecuador (Distrito Metropolitano de Quito)

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

1.2. Antecedentes

Los problemas de los incendios forestales trascienden al ámbito estrictamente ambiental y afectan a otros aspectos fundamentales de la sociedad como la seguridad, la vida de las personas, la infraestructura, el sector urbano y rural, el patrimonio histórico artístico y las actividades socio-económicas.

“...En las últimas décadas la preocupación por el manejo de incendios forestales a escalas de nivel mundial y regional se ha incrementado debido a la alta incidencia de incendios en el mundo...” (Chuvienco 2008).

“...Muchos estudios han logrado cartografía de áreas quemadas a través de imágenes de satélite. La teledetección ha sido una de las herramientas más empleadas en la prevención de incendios forestales...” (Chuvienco y Martín, 2004). El DMQ durante la época seca (julio, agosto, septiembre) es muy susceptible a incendios forestales, cuya intensidad, frecuencia y extensión han aumentado en los últimos años, provocando grandes pérdidas económicas, ecológicas y humanas. Cada año el número de incendios incrementa y la atención por parte del Cuerpo de Bomberos parece no es suficiente; el fuego se propaga rápidamente, destruyendo una gran parte de los pocos bosques forestales todavía existentes.

En el 2009, se perdieron aproximadamente 2700 Ha (Secretaría del Ambiente, DMQ, 2009), mientras que en el 2012 se declara a Quito en emergencia por los incendios forestales y el número de Has afectadas ascienden a 3796 (*Diario El Hoy*, 27 septiembre 2012).

La Secretaría de Ambiente en el marco del Programa de Reducción de Riesgos del DMQ llevó a cabo la generación del “Proyecto de Sistemas de Información Unificado de Riesgos Urbanos”, donde su objetivo fue el de generar una sistematización de la información útil para la gestión de riesgos urbanos. Dicho insumo realizado por la Secretaría de Ambiente sobre los incendios forestales, es información netamente clave para poder comprender la ocurrencia

potencial de incendios forestales en el DMQ, es por ello que la generación de herramientas de conocimiento coadyuva en la gestión e intervención de los incendios forestales (Secretaría de Ambiente, 2012).

1.3. Definición e Identificación del Problema

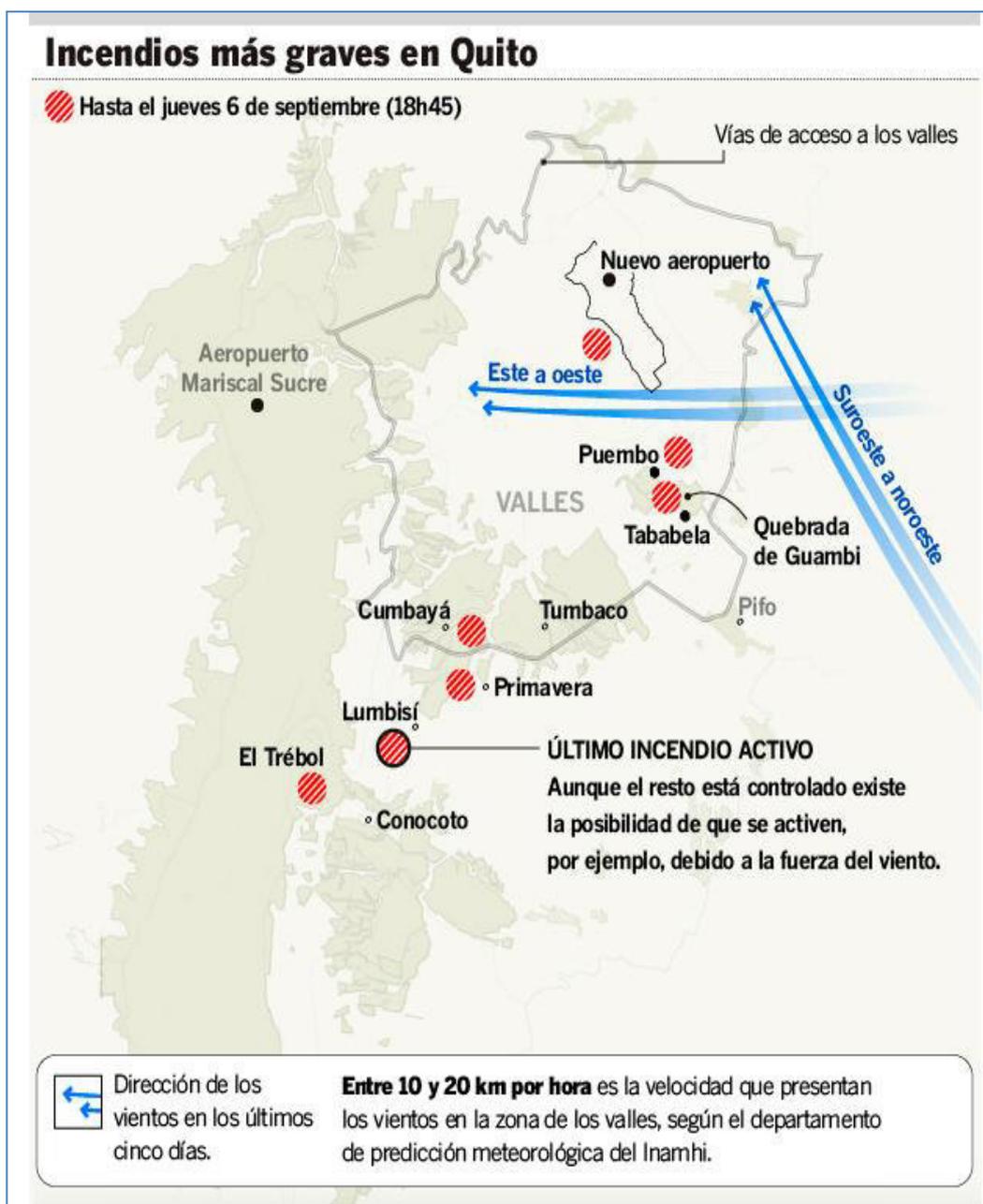


Figura. 1.2. Incendios Forestales en el DMQ

Fuente: *El Universo*, 06 septiembre 2012

Se define a incendio forestal como el “fuego descontrolado que se produce en áreas boscosas superiores a una hectárea” (Cuerpo de Bomberos del Distrito Metropolitano de Quito, 2013).

En la época seca del año 2012, Ecuador enfrentó en distintas provincias grandes incendios forestales que causaron un total de “16.243,70 Has quemadas, 77 personas heridas y 5 personas fallecidas” (Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, 2012) los pocos estudios relacionados en nuestro país respecto a esta problemática han sido insuficientes para ejecutar una verdadera gestión de emergencias frente a este tipo de desastres.

En la zona de estudio se produjeron graves incendios forestales (Ver Figura. 1.2.), se estima “que se afectaron 3796 Ha., esto representa el 0.8% de la superficie del Distrito” (El Hoy, 27 septiembre 2012). Así, debido a la intensidad y magnitud de los incendios forestales se declaró alerta naranja por 20 días en todo el DMQ.

1.4. Justificación e importancia

“En el Ecuador los últimos años la problemática de los incendios forestales se ha agudizado, ocasionando grandes daños y perjuicios de índole social, económicos y ecológicos en diferentes provincias en especial aquellas con mayor potencial e incidencia” (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2010), y la gestión de riesgos para la prevención y/o mitigación de incendios forestales es limitada, ya que no existen herramientas de decisión verdaderamente suficientes y útiles que permitan realizar una planificación preventiva y una mejora en la respuesta de atención ante la presencia de este tipo de eventos. Por lo tanto en el DMQ cada época seca es afectado por incendios forestales, los cuales en “más del 90% son originados por actividades humanas, principalmente quemas agrícolas” (CBDMQ, 2013), los mismos que “favorecidos por las condiciones climáticas y orográficas, se propagan rápidamente y afectan extensas zonas” (Plan Operativo Forestal, 2012).

Los daños ecológicos a causa de los incendios forestales proporcionan un escenario desolador en los bosques afectados del DMQ, ya que “se observa una significativa alteración del ciclo hidrológico, que ha repercutido de manera directa en la disminución de los recursos hídricos por reducción de la infiltración y recarga hídrica; así como la reducción de la humedad de los suelos, el incremento de la erosión eólica e hídrica. Otras alteraciones significativas se han visto reflejadas en la desertificación, la pérdida de la biodiversidad por muerte y migración de la fauna local, incremento de la temperatura que afecta el microclima, la contaminación del aire por emisiones de CO₂ entre otros gases tóxicos; finalmente, el padecimiento del efecto de invernadero y la modificación de belleza paisajística”(Plan Operativo Forestal,2012).

La presente investigación de ocurrencia y recurrencia de incendios forestales en el DMQ, responde a la necesidad e interés de generar información cartográfica que pueda ser útil para las distintas autoridades competentes en el DMQ en la toma de decisiones de prevención y/o mitigación de incendios forestales, además de que la misma metodología a utilizarse en la zona de estudio pueda ser aplicada en otras zonas del país que se ven afectadas por los incendios forestales.

“Un incendio prevenido, es un fuego que no hay que apagar” (Bonilla, 2001).

1.5. Objetivo General

- Determinar áreas vulnerables a incendios forestales y calcular la probabilidad de ocurrencia mediante el Modelo Fuzzy aplicando herramientas geoinformáticas, en el Distrito Metropolitano de Quito.

1.6. Objetivos Específicos

- Determinar mediante Análisis Multitemporal a través de imágenes satelitales eventos de incendios forestales a partir del año 1990 al 2012.
- Generar un modelo de probabilidad de ocurrencia a incendios forestales aplicando la metodología de Lógica Difusa.
- Validar el modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales generado.
- Determinar áreas y rutas óptimas de respuesta de las estaciones de servicio del Cuerpo de Bomberos para áreas con alta recurrencia o alta probabilidad de ser nuevamente quemadas.
- Implementar en el portal de Infraestructura De Datos Espaciales de la Escuela Politécnica Del Ejército (IDEESPE) la información generada mediante ISO 19100 y OGC.

1.7. Metas (cuantificables)

- Mapa de zonas de recurrencia de incendios forestales y su extensión durante los años 1990 al 2012.
- Generación de un modelo de probabilidad de ocurrencia a incendios forestales para el área de estudio.
- Informe de validación del modelo de probabilidad de ocurrencia obtenido para el área de estudio.

- Mapa de áreas de potencial atención y determinación de sus respectivas rutas óptimas.
- Un enlace en el geoportal IDEESPE para la visualización de la información generada.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1 CONCEPTOS BASICOS EN LA GESTION DE RIESGOS

- **Gestión de Riesgos**

“Es un proceso de decisión y de planificación que permite a los actores involucrados analizar el entorno, tomar decisiones de manera conscientes y desarrollar una propuesta de intervención concertada para prevenir, mitigar o reducir los riesgos existentes y en esta medida, encaminar el municipio hacia el desarrollo sostenible” (Van der Zee, 2005, p.6).

“Proceso que consiste en el planeamiento y aplicación de políticas, estrategias, instrumentos y medidas orientadas a impedir, reducir, prever y controlar los efectos adversos de fenómenos peligrosos sobre la población, los bienes y servicios y el ambiente. Acciones integradas de reducción de riesgos a través de actividades de prevención, mitigación, preparación para, y atención de emergencias y recuperación post impacto” (MARN, 2013).

- **Amenaza**

“Probabilidad de que un fenómeno de origen natural o humano, se produzca en un determinado tiempo y espacio” (CRID, 2013).

“Gomáriz (citado en Díaz, 2004, p. 6,7) establece los tipos de amenazas (Tabla. 2.1.): a) fenómenos que tienen origen más natural b) fenómenos cuya responsabilidad directa le corresponde a la especie humana c)

orígenes combinados, fenómenos naturales que están determinados por actividades humanas”

Tabla. 2.1. Tipos de Amenaza

AMENAZAS		
Origen Natural	Origen Mixto	Origen Antrópico
Atmosféricas	Inundaciones	Guerra
Volcánicas	Deslizamientos	Violencia social
Sísmicas	Sequías, desertificación	Contaminación
Hidrológicas	Incendios rurales	
Incendios	Agotamiento de acuíferos	
	Agotamiento de la capa de ozono	

Fuente: Gomáriz, 1999

- **Vulnerabilidad**

“Propensión de un elemento (o de un conjunto de elementos) a sufrir ataques y daños en caso de manifestación de fenómenos destructores y/o a generar condiciones propicias a su ocurrencia o al agravamiento de sus efectos” (SNGR, 2011).

- **Riesgo**

Jiménez (citado en Díaz, 2004, p.9) menciona que el riesgo es el número esperado de pérdidas humanas, heridos, daños a la propiedad, al ambiente, interrupción de las actividades económicas, impacto social debidos a la ocurrencia de un fenómeno natural o provocados por el hombre, es decir, el producto de la amenaza por la vulnerabilidad.

Existen tres componentes esenciales en la cuantificación del riesgo:

Probabilidad de que ocurra la amenaza: la probabilidad de que ocurra un amenaza natural específica a un nivel de gravedad específico en un periodo específico en el futuro.

Elementos en riesgo: un inventario de aquellas personas o cosas (en su sentido más amplio) que están expuestas a las amenazas.

Vulnerabilidad: el grado de pérdida de cada elemento si ocurriese una amenaza de una gravedad determinada.

Rivera (2010), menciona las siguientes definiciones:

- **Prevención**

Medidas y acciones dispuestas con anticipación con el fin de evitar o impedir que se presente un fenómeno peligroso o para evitar o reducir su incidencia sobre la población, los bienes, servicios y el ambiente.

- **Mitigación**

Medidas y actividades de intervención dirigidas a reducir o disminuir el riesgo.

- **Preparación**

Conjunto de medidas y actividades que organizan y facilitan oportunamente la respuesta en una emergencia.

- **Reconstrucción**

Es el proceso de recuperación a mediano y largo plazo, del daño físico, social y económico, a un nivel de desarrollo igual o superior al existente antes del desastre.

- **Resiliencia**

Capacidad de un sistema, comunidad o sociedad potencialmente expuestas a amenazas o adaptarse, resistiendo o cambiando con el fin de alcanzar y mantener un nivel aceptable en su funcionamiento y estructura.

- **Respuesta**

Ejecutar las acciones previstas en la etapa de preparación y/o reacción inmediata para la atención oportuna de la población.

2.2 INCENDIOS FORESTALES

Los incendios forestales cada época seca, debido a factores climáticos, topográficos, entre otros, afectan notablemente a los bosques de nuestro país, produciendo grandes pérdidas económicas, sociales y sobretodo ambientales.

2.2.1 Concepto Incendio Forestal

Es un fuego que se produce en el bosque (montaña) de forma natural, (Figura. 2.1.), accidental o intencional y que avanza sin ningún control normalmente de la dirección del viento” (Bonilla, 2001, p. 12). Los incendios forestales son la combustión de una considerable cantidad de un material combustible vegetal en presencia de una fuente de calor. (Carballas, 2004, p. 364)



Figura. 2.1. Incendio Forestal
Fuente: Diario *El Hoy*, 06 de septiembre 2012

2.2.2 Geometría y dinámica de un incendio

Según Bonilla (2001), las formas y partes de un incendio forestal son (pp. 12 y 13):

2.2.2.1. Geometría

Circular: En terreno llano, con poco viento y en combustible homogéneo.

Elíptico: En terreno llano con viento en dirección constante y combustible homogéneo.

Irregular: En terreno con pendientes, con viento irregular y diferentes tipos de combustible.

2.2.2.2. Dinámica:

Borde: Es el perímetro del incendio.

Cabeza: Es la parte del borde donde avanza el fuego con mayor rapidez e intensidad.

Cola: Es la parte del borde del fuego donde avanza más lentamente.

Flancos: Son los contornos laterales del incendio.

Dedos: Son estrechas extensiones de fuego que se proyectan desde el fuego principal.

Focos secundarios: son los fuegos producidos por las chispas o pavesas y se establecen fuera del perímetro del incendio.

Bolsas: Son aquellas partes del incendio donde el fuego camina con mayor lentitud.



Figura. 2.2. Partes principales de un incendio.

Fuente: Bonilla, 2001

2.2.3 Clasificación de los Incendios Forestales

Puccio (citado en Ulloa, 2010, p. 7 y 8), establece que comúnmente se pueden diferenciar tres tipos de incendios forestales según su ubicación en relación con la superficie del suelo y su forma de propagación:

- **Incendios Subterráneos:** o también incendios de suelo, son incendios sin llamas y que no producen humo o éste es muy escaso, por lo que son de difícil detección. Se propagan lentamente y se producen a altas temperaturas, queman las raíces y el material orgánico en el suelo bajo la hojarasca superficial de acículas u hojas, este tipo de incendio es más común en los ecosistemas boreales.
- **Incendio superficial,** es el más común. Se extiende sobre el piso forestal consumiendo el mantillo y el humus, matando las plantas herbáceas, arbustos y quemando característicamente las bases y las coronas de los árboles, considerándose combustible superficial a todo aquel que se encuentre entre la superficie del suelo y 1,5 m de altura. Estos incendios son comunes en bosques abiertos.
- **Incendio de corona o copa,** Son comunes en bosques densos donde las copas se topan entre sí. En estos incendios el fuego viaja de copa en copa y generalmente quema toda la vegetación sobre el suelo. Son los incendios de más rápida propagación y aunque no son los más comunes son muy peligrosos y difíciles de controlar.



Figura. 2.3. Clasificación de incendios forestales,
se distinguen las tres principales
clases de incendios forestales.

Fuente: <http://www.izaping.com>

En ciertos casos los tres tipos de incendio pueden presentarse simultáneamente durante el mismo incendio o bien pueden producirse diferentes combinaciones de ellos.

2.2.4 Concepto Fuego

Es una reacción química en cadena con desprendimiento de luz y calor producido por la combustión de un cuerpo (Bonilla, 2001, p. 7).

2.2.5 Triángulo y Tetraedro del Fuego

Para que un fuego se inicie y se mantenga es necesario que concurren en el mismo sitio y tiempo el combustible, comburente y energía. (Herrera et al, 2001).



Figura. 2.4. Triángulo del Fuego, se concentran el combustible (cobertura vegetal), el comburente (oxígeno) y la energía (calor).

Fuente: <http://www.bomberosbarbosa.es.tl>

Combustible: Se refiere a la cobertura vegetal que arde.

Oxígeno: Gas natural contenido en la atmósfera.

Calor: Transferencia de energía entre dos cuerpos que se encuentran a distinta temperatura.

A este triángulo se le adiciona un cuarto elemento que es la reacción en cadena.

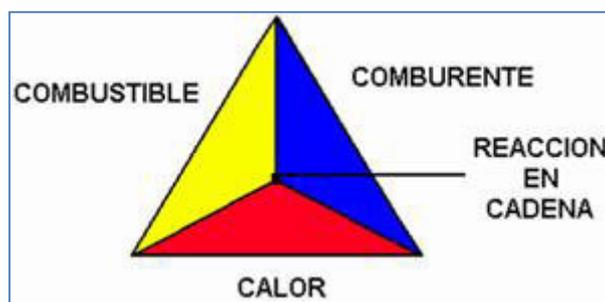


Figura. 2.5. Tetraedro del Fuego, se añade la reacción en cadena al Triángulo del Fuego.

Fuente: <http://www.bizkaia.net>

2.2.6 Formas de propagación del calor

El calor en un incendio se propaga de tres formas:

- **Convección;** el calor transportado por el aire, el aire caliente asciende, y el aire frío desciende.

- **Radiación**, el calor se transmite por las moléculas de aire sin haber desplazamiento de éstas.
- **Conducción**; el calor pasa a través de las moléculas de un cuerpo sólido sin que éstas se desplacen.

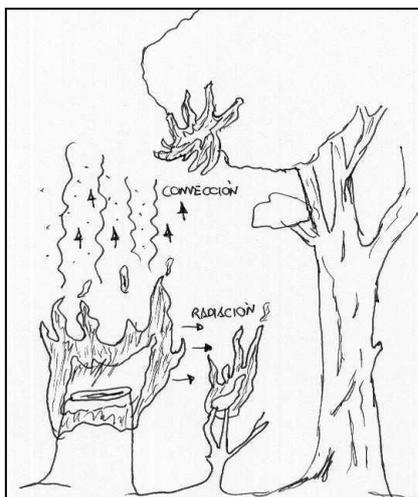


Figura. 2.6. Formas de propagación del calor en un incendio forestal

Fuente: Herrera et al, 2001

2.2.7 Fases de Inicio del Fuego

El inicio del fuego sigue los siguientes fases: (Herrera et al, 2001)

- **Fase de Pre calentamiento.** La temperatura se eleva sobre los 100°C, hay una eliminación de agua del cuerpo mediante evaporación producida por la aplicación de calor.
- **Fase de Combustión de los Gases.** Hay un desprendimiento de gases de la madera, algunos con propiedades inflamables que son el origen de las llamas que inician el fuego al oxidarse con el aire. A continuación hay una oxidación de la materia leñosa, que produce un gran desprendimiento de energía que es el continuador de la reacción. La situación ha pasado de absorber calor a desprenderlo. El calor desprendido inicia el proceso en los cuerpos de alrededor.

- **Fase de Combustión del Carbón.** La madera se transforma en carbón, que combustiona con un menor requerimiento de oxígeno, hasta quedar como cenizas.

2.2.8 Factores que influyen el comportamiento del fuego

- **Humedad ambiental;** el aire húmedo retarda el inicio del incendio al mantener húmedo el combustible.
- **Viento;** aumenta la velocidad y propagación del incendio aportando oxígeno, trasladando aire caliente, desecando los combustibles y dispersando partículas en ignición.
- **Topografía;** en terrenos con pendiente el fuego avanza más rápidamente ladera arriba, porque el aire caliente tiende a subir desecando los combustibles que están arriba, cuanto mayor es la pendiente, más rápidamente asciende. En las laderas de solana la orografía produce una brisa del valle hacia la cumbre favoreciendo la propagación del fuego. Los fondos de los valles actúan como chimeneas del aire caliente, transportándolo hacia arriba. (Herrera et al, 2001).

2.3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un Sistema de Información Geográfico (SIG) es un conjunto de procedimientos sobre una base de datos que tiene una representación gráfica, respecto al mundo real y que son susceptibles de algún tipo de medición respecto a su tamaño y dimensión relativa a la superficie de la tierra. (Figura. 2.7)

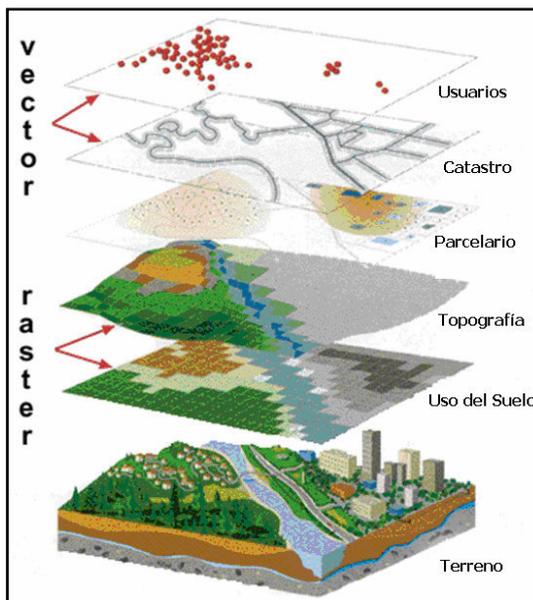


Figura. 2.7. Representación gráfica de un SIG, superposición de capas para ver los datos de la información

Fuente: <http://cier.uchicago.edu/gis/gis.htm>

2.3.1 Generalidades

En un SIG se usan herramientas de gran capacidad de procesamiento gráfico y alfanumérico, estas herramientas van dotadas de procedimientos y aplicaciones para captura, almacenamiento, análisis y visualización de la información georeferenciada. Un SIG está relacionado con la capacidad que posee éste de construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales, esto se logra aplicando una serie de procedimientos específicos que generan aún más información para el análisis. La construcción de modelos de simulación, se convierten en una valiosa herramienta para analizar fenómenos que tengan relación con tendencias y así establecer diferentes factores influyentes. (Obermeyer y Pinto, 1994)

2.4. ANÁLISIS MULTITEMPORAL

2.4.1 Definiciones

- Escala

La apariencia de una imagen variará dependiendo de que tan cerca o lejos se observe esta. (MacCarthy y Lindberg, 1974) La escala expresa que tantas veces ha disminuido gráficamente una imagen respecto a la realidad. En un mapa, la escala depende del área a representar, el grado de detalle requerido y la cantidad de información que se quiere mostrar. La escala se define como la razón entre el valor de la distancia representada en el mapa y el de distancia correspondiente en el terreno.

Para la aplicación de este principio se sugieren los siguientes pasos (citado por Berniz Víctor, Betancourt Franz, 2006):

- Establecer los objetivos y el alcance de la política o proyecto en consideración, con el fin de garantizar que la respuesta institucional al problema propuesto, coincida de la manera más cercana posible con las escalas temporales y espaciales de los procesos en el área que está bajo manejo.
- Identificar la jerarquía de los niveles espaciales de decisión requeridos para cumplir con los objetivos de manejo propuestos.
- Proponer mecanismos institucionales adecuados que permitan manejar áreas extensas, como cuencas hidrográficas y comprometer a todos los sectores involucrados que van más allá de los límites administrativos y diferentes niveles de administración.
- Identificar el nivel de resolución espacial mínimo necesario para la toma de decisiones.
- Evaluar la disponibilidad de cartografía básica y temática, así como su calidad, pertinencia y actualización, para cumplir con los objetivos y requerimientos.

- Definir vacíos y requerimientos de información e identificación de formas de obtención, a través de varias fuentes tales como: imágenes de sensores remotos, imágenes de satélite, imágenes de radar, fotografías aéreas, actualización de datos en campo, entre otros requerimientos. Hay que anotar que la escala de trabajo debe ser correspondiente con la unidad mínima de mapeo y el nivel de detalle de la información requerida (Andrade y Navarrete, 2009).

Tabla. 2.2. Unidad Mínima de Mapeo

Nivel de Detalle	Escala Trabajo	UMM	Alcance
Nacional Cuencas Transfronterizas (Muy pequeño)	1: 1,000,000 1:3,000,000	15 Km ² 150 Km ²	Formulación de políticas nacionales. Planificación a escala nacional. Cuencas o ecosistemas transfronterizos. Identificación general de proyectos.
Regional Cuencas (Pequeño)	1: 100,000 1: 500,000	625 ha 625 ha	Formulación e implementación de políticas regionales. Planificación a escala regional: departamentos, regiones, cuencas.
Subregional Subcuencas	1: 50,000 1: 100,000	6.25 ha 25 ha	Planificación a escala subregional-local: provincias, subcuencas, municipios, distritos. Factibilidad técnica de proyectos.
Local Microcuencas (Grande)	1: 25,000 1: 50,000	1.56 ha 6.25 ha	Implementación de programas y proyectos a nivel local: municipios, veredas, fincas, microcuencas. Estudios de factibilidad técnica y económica de proyectos.
Microlocal (Muy Grande)	1: 25,000 1: 5,000	1.56 ha 0.06 ha	Monitoreo y seguimiento específico

*UMM: Unidad mínima de mapeo

Fuente: Serie Manuales de Educación y Capacitación Ambiental, Andrade y Navarrete, 2009

- **Generación de la Cartografía Base**

En el proceso de generación de la cartografía base intervienen subprocesos de recopilación de información como, cartografía existente y

bibliografías referentes a la zona de estudio. Para la elaboración de esta etapa fue muy importante contar con información base de un excelente nivel, sobre la cual se desarrollaron otros procesos que requirieron como insumo el mapa base.

- **Inventario de Información Existente**

Durante este proceso se empieza por identificar información tanto primaria como secundaria, en donde primeramente se define las características necesarias que debe tener dicha información para la elaboración de la cartografía base. Una vez que se identifiquen las necesidades y requerimientos se procede a determinar las fuentes en donde se puede hallar dicha información para proceder a recopilar y adquirir estos documentos

- **Levantamiento de la cartografía base**

En esta etapa se procede con la generación de la información de la cartográfica base la cual se cuenta con los procesos de digitalización, edición preliminar de la cartografía base.

- **Depuración de la cartografía base**

Es aquí en donde el objetivo de tratar los errores no es esencia eliminarlos, sino manejarlos en una forma adecuada y apropiada hasta el punto de que no afecte el resultado de nuestros datos en los análisis.

- **Estructuración de la cartografía base**

En esta etapa se siente la necesidad de tener toda la información en una forma organizada con el propósito de que pueda ser manejada con mayor facilidad y rapidez. De este modo la información se hizo más manejable y

accesible. Después de haber terminado con la etapa de edición de cada archivo, se procederá a agregar atributos de forma e identificación, como colores, símbolos entre otros parámetros. Donde se crean tablas, se especifican el nombre, coordenadas, y otros datos informativos. Cada conjunto de elementos, agrupados por sus características similares posee su propia tabla de datos, información que fue importante porque permitió identificar los diferentes elementos con exactitud sobre el espacio (Pérez, 2005).

2.4.2 Tratamiento y Procesamiento Digital de Imágenes

a) Obtención de las Imágenes Satelitales

Para la obtención de las imágenes satelitales es fundamental determinar los niveles de área que se pueden mapear. Claro está, que la elección de nuestros insumos fue condicionado de acuerdo a las necesidades del proyecto tales como: económico, administrativo, logístico, técnico, humano, tecnológico entre otros requerimientos.

b) Estructuración y Sistematización de los componentes temáticos en el SIG

En esta etapa se procede a establecer las diferentes coberturas de cada componente, así como la representación Geo – Espacial de la situación real de cada uno de ellos, en base a la información analizada y emitida por el equipo de trabajo que participa en el proyecto. Tomando en cuenta el amplio rango de potenciales aplicaciones que se pueden realizar a través de un SIG, se vuelve a recaer sobre la importancia de manejar los datos con eficiencia, para ello, cada una de estas coberturas, debe ser elaborada con un constante control sobre su coherencia con los datos representados. La creación de estas coberturas parte del mapa de cobertura vegetal y uso actual del suelo (Pérez, 2005).

Construcción de la cobertura Vegetal

Esta etapa constituye la base sobre la cual se levantará la información correspondiente a cobertura vegetal.

Según Pérez, 2005 se establecen las siguientes actividades:

a) Pre – Proceso

La etapa del Pre – proceso conlleva el tratamiento inicial a que se debe someter la imagen satelital para que pueda ser apta o útil para el trabajo de interpretación. Esta etapa es indispensable ya que implica el levantamiento de información que nos permitirá establecer como se encuentra la cobertura vegetal y uso del suelo en la zona de estudio.

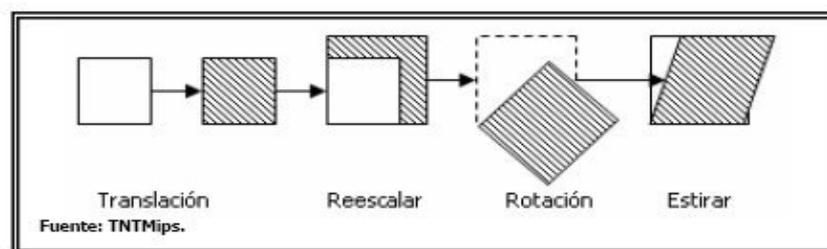


Figura. 2.8. Pre-Proceso, representación esquemática de la etapa de Pre-Proceso

Fuente: Pérez, 2005

b) Corrección Radiométrica y Geométrica

Se consta que “...las correcciones radiométricas son técnicas mediante las cuales se modifican los niveles digitales (ND) de la matriz original; estas correcciones son útiles para modular parámetros físicos dentro de la imagen o para abordar análisis espectrales detallados...” (Lillesand y Kiefer, 1994)

El ruido es una interferencia en los datos de la imagen que puede deberse, entre otras causas, a un fallo momentáneo de un detector en la recepción o

emisión de la señal, lo que provoca la pérdida o distorsión de una serie de líneas de píxeles en la imagen original (Chuvienco, 1990). Esta información que se pierde es difícil recuperar, por lo que hay que recurrir a técnicas que nos permitan estimar estos valores de Nivel Digital a través del grado de correlación de los valores vecinos.

Las imágenes que no han sido sometidas a una corrección geométrica, poseen distorsiones significativas, y por lo tanto no son hábiles para la generación de mapas. Lo que se pretende en este paso es modificar la geometría de la imagen, es decir se corrige su posición y coordenadas. Este paso se aborda en dos procedimientos, el primero conocido como corrección orbital, el cual corrige errores sistemáticos como son los derivados de la rotación o curvatura terrestre y de la inclinación de la órbita.

El segundo enfoque modela el error geométrico de la imagen a partir de una serie de puntos, denominados puntos de control, y que se asumen suficientemente representativos para corregir la deformación geométrica de la imagen. Sin embargo el primer proceso es mucho más automático, pues los datos orbitales se reciben directamente con las imágenes y apenas se requiere intervención humana. Para corregir la imagen por el segundo enfoque lo que se hace es georreferenciar y rectificar la imagen satelital (Pérez, 2005).

Las distorsiones geométricas son sistemáticas y aleatorias; los errores sistemáticos, tales como rotación y curvatura de la tierra, son corregidos generalmente en las estaciones receptoras de las imágenes aplicando modelos matemáticos y, por lo tanto, el usuario se ahorra esta tarea; los errores aleatorios están relacionados con la ubicación geográfica de un punto en la imagen, estos son corregidos georreferenciando la imagen con ayuda de la cartografía de la zona y aplicando algoritmos. (Lillesand y Kiefer, 1994).

c) Extracción del Área de Interés

Para extraer el área de interés hay que realizar un corte sobre la imagen, tomado en cuenta la zona de estudio. Es fundamental garantizar que se asegure la mayor cantidad de información útil para la georreferenciación por lo que será substancial estimar una zona de amortiguamiento, debido a que en el proceso de interpretación, la información de los bordes podría perderse o ser alterada en su área por efecto a los procedimientos de edición de la cobertura y suavizamiento del borde. La extracción se realiza en función de considerar los datos de referencia que se posee de la zona de estudio.

d) Georreferenciación de Imágenes

La Georreferenciación de las escenas de la imagen satelital se realiza a partir de ajustar las ecuaciones de reescalado, traslación y rotación a un conjunto de puntos, de los que se posee tanto las coordenadas de la imagen a corregir como las del mapa de referencia, es decir, se transforman los datos de un sistema de grilla, a otro usando una transformación afín, específicamente para esta etapa del proyecto.

Este proceso permite conocer con alta precisión las coordenadas de cada punto de la imagen, en función de la escala que se ha usado para el trabajo. Además de georreferenciar la información, es necesario someter a la imagen a una geocodificación, lo cual quiere decir alinear la información obtenida con la grilla de coordenadas (Resampleo). Este se lo considera como el último paso que constituye la rectificación de la imagen, y puede ser realizada aplicando el método del vecino más cercano (Pérez, 2005).

e) Realce de la Imagen

Relacionado con el tipo de visualización que se quiera dar a la imagen y depende de la aplicación que se pretenda dar o el tipo de elemento que se

requiera observar. Al mejorar la imagen estaremos potenciando la información que se ha captado el sensor para ser interpretada y acentuar el contraste entre firmas de interés de la imagen satelital. Por lo que es fundamental realizar combinaciones adecuadas para la obtención de detalles necesarios para nuestro análisis. Con una combinación adecuada de las bandas podremos determinar los tipos de vegetación y sus condiciones que muestran en su variación de tonalidad. Al ecualizar nosotros estamos tratando a la imagen bajo el uso de histogramas, en donde se analizan sus diferentes frecuencias y optimizar el área de trabajo, dando así un mejoramiento de dicha imagen.

Las operaciones de realce son técnicas digitales para incrementar el contraste entre diferentes características de una escena, básicamente para mejorar la visualización de la imagen; estas técnicas son aplicadas después de las operaciones de restauración y rectificación de la imagen y pueden ser categorizadas como manipulación del contraste, manipulación de las características espaciales y manipulación de las características espectrales (Lillesand y Kiefer, 1994).

f) Manipulación del Contraste

Al realizar una manipulación del contraste nos referimos a la variación de los niveles de la escala de grises en una banda usando segmentos de la imagen que quieran ser opacados o realzados para su visualización; el Gray - Leves Thresholding, LevelSlicing y ContrastStretching, son algoritmos de esta técnica. (Lillesand y Kiefer, 1994).

- **Manipulación de las Características Espaciales**

“...La manipulación de características espaciales consiste en la aplicación de filtros que modifican los niveles digitales. Los filtros son matrices de coeficientes numéricos que permiten atenuar o acentuar las gradaciones radiométricas presentes en los datos originales...” (Chuvienco, 1990).

- **Manipulación de las Características Espectrales**

Son procesos digitales para aumentar el contraste interno de una imagen tal que se ilustre mejor sobre sus características originales. El stretching y el Análisis de Componentes Principales (PCA) son técnicas de realce espectral. El stretching toma los valores de los niveles digitales (ND) o valores de intensidad radiométrica y los homologa con niveles de visualización (NV) o valores correspondientes a la capacidad de un monitor para visualización de la imagen. Los NV y sus correspondientes ND son almacenados en una matriz numérica llamada Look Up Table.

Cada cobertura ofrece un comportamiento espectral típico, en función de sus características fisicoquímicas y biológicas denominada firma espectral.

En los Sensores Landsat TM la resolución espectral es de siete bandas, las cuales abarcan regiones del espectro visible e infrarrojo cercano, medio y térmico. El área de aplicación de cada banda depende de la firma espectral del objeto de estudio en esa banda. Aplicando PCA es posible determinar cuáles son las bandas que sintetizan la información espectral de un objeto y de esa manera obtener una composición en color sin información redundante (Chuvieco, 1990).

g) Procesamiento Digital de la Imagen

Este proceso obtiene una nueva imagen clasificada en donde se instaura categorías a cada uno de los píxeles de la imagen original a diferentes formaciones vegetales o uso, para finalmente obtener un mapa de cobertura vegetal y uso del suelo.

Interpretación Digital de las Imágenes

Según Lillesand y Kiefer (1994), la interpretación digital de las imágenes se daría de la siguiente manera:

- **Clasificación Digital de Imágenes**

La clasificación digital conlleva todo un conjunto de técnicas de reconocimiento de patrones espaciales y espectrales de los píxeles de una imagen que constituyen la base para la clasificación de coberturas de la tierra. Los patrones de reconocimiento espacial se basan en las relaciones espaciales entre un píxel y su entorno y consideran aspectos de la imagen tales como textura, proximidad, tamaño, forma, direccionalidad, repetición y contexto. Los patrones de reconocimiento espectral se refieren a las características de radiancia, obtenida por el sensor y contenida en las matrices de ND de cada banda. La clasificación digital se dirige a obtener una nueva imagen en la cual a cada uno de los píxeles de la imagen original se le asigna una clase o leyenda. Esta clasificación puede ser de dos tipos: no supervisada y supervisada.

- **Clasificación No Supervisada**

La clasificación no supervisada se conoce como clasificación digital automática. Se escoge un número de clases en que se desea clasificar determinadas áreas, esencialmente es un análisis automático. Con este número determinamos el valor inicial de clases en que va a clasificar el sistema. Lo que realiza el sistema es dividir en forma regular el número de clases que se ha dado tomando en cuenta los límites inferior y superior del rango del nivel digital.

Este tipo de clasificación no utiliza áreas de entrenamiento sino clases o clusters presentes en la imagen. Los algoritmos de clasificación examinan y reconocen los píxeles, y de acuerdo con sus valores, los agrega a diferentes clases con base a su ND. Las clases resultantes son llamadas clases espectrales

- **Clasificación Supervisada**

Este método parte de un conocimiento previo de la zona de estudio, el cual está respaldado por experiencia de trabajos de campo que se hayan realizado anteriormente. El objetivo es obtener una clasificación adecuada y muy bien definida, buscando así que se represente los tipos de cobertura vegetal y uso del suelo lo más cercano a la realidad. Es fundamental contar con puntos de control para el cumplimiento de esta etapa. Estos puntos de control se los hace a través del trabajo de campo. Este método permite tener un mayor control de los procesos de categorización de los píxeles, básicamente se basa con la interpretación visual y digitalización en pantalla. A su vez la clasificación supervisada involucra tres procesos: la comprobación de campo, el ajuste de la cobertura vegetal y el uso del suelo.

- i. Comprobación de Campo**

Para la comprobación de campo es necesario establecer dos elementos claves que nos guiarán y ayudarán en gran manera para el cumplimiento de una etapa. El primero es la selección del sistema de clasificación de las coberturas vegetales que para nuestro estudio, se establecieron los componentes que corresponderán a los grandes grupos de información de acuerdo a su enfoque dentro de la zona de estudio. El segundo es el establecer en forma clara y diferenciada los componentes de la meta a conseguirse mediante un minucioso análisis de los factores a ser considerados en el estudio el cual será integrado e incorporado con nuestra información.

- ii. Ajuste de la cobertura vegetal y uso del suelo**

Una vez terminada la comprobación de campo se procede a depurar o definir zonas las cuales fueron detectadas en el trabajo de campo,

obteniéndose así condiciones más cercanas a la realidad, las cuales representarán los diferentes tipos de vegetación que se encuentran en la zona. En esta etapa se utilizará los datos obtenidos en el campo para lo que es necesario contar con información representada espacialmente.

Dicha información se trasladará al mapa preliminar de cobertura vegetal y uso del suelo correspondiente a la zona de estudio. Una vez con esta información representada en el mapa preliminar se procede a realizar las verificaciones y ajustes correspondientes. Obteniéndose así un mapa de cobertura vegetal y uso del suelo ajustado. (Bernis y Betancourt, 2006.)

2.5. ANALISIS DE REDES

El análisis de redes estudia las relaciones de los elementos lineales, los cuales pueden ser de cualquier tipo por ejemplo: hidrográficos, viales, transporte, etc., optimizando su ubicación y facilitando la correcta toma de decisiones.

2.5.1 Concepto de red

Una red puede definirse como un sistema de conexión entre entidades lineales como las vías, el alcantarillado, la red de agua potable, red eléctrica, los ríos, etc., que facilitan el movimiento de vehículos, personas, flujo de energía, agua, dependiendo del uso que se de a dicha red, el objetivo es utilizarla de forma eficiente, para lo cual se requiere un profundo análisis y el uso de herramientas geoinformáticas apropiadas, la más utilizada en el análisis de redes es el software ArcGIS con su módulo Network Analyst.

“Una red se configura como un sistema de nodos (Figura. 2.9.) entre los que se establecen relaciones a través de arcos. Por esa red puede viajar energía o materia” (Márquez, 2004, p. 6).

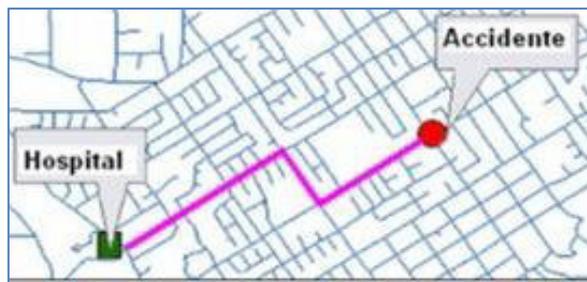


Figura. 2.9. Red, ruta óptima para atender una emergencia de manera eficaz.

Fuente: <http://medlem.spray.se/superclub57/gis57.html>

2.5.2 Componentes de una red

Los principales elementos que constituyen una red desde el punto de vista geométrico son los nodos y los ejes.

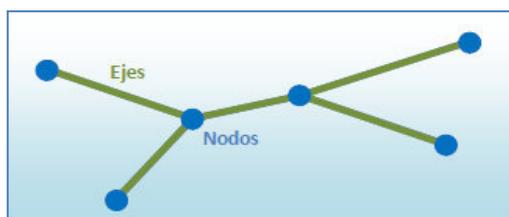


Figura. 2.10. Componentes de una red, nodos y ejes permiten la consolidación de una red.

Fuente: Barrientos, 2007

Los componentes de la red están asociados a distintos elementos de la realidad.

“Los nodos pueden representar una intersección vial, transformadores eléctricos, válvulas de corte en una red de agua potable, etc. Mientras que los ejes suelen representar carreteras, cables telefónicos, tuberías o cualquier otra estructura que represente circulación entre dos nodos” (Barrientos, 2007, p.6).

2.5.2.1 Nodos

Llamado también punto o vértice, es aquel que puede ser representado como un punto en un mapa.

Márquez (2004), menciona que según la escala, un nodo puede ser una estación de servicio, una estación ferroviaria, un cruce de caminos, una aldea, un puerto, una parada de autobuses, una entidad bancaria, un centro de salud, un instituto o una ciudad.

“Los nodos aparecen interrelacionados, en gran medida, por sus atributos. Las interrelaciones pueden ser de dos tipos:

- **Relaciones estáticas:** vienen dadas por la posición relativa de cada nodo con respecto a los demás: es una estructura espacial determinada que no suele variar a corto plazo.
- **Relaciones dinámicas:** vienen expresadas por la intensidad de los flujos entre nodos, que puede variar con relativa facilidad en un corto periodo de tiempo” (Márquez, 2004, p. 7,8).

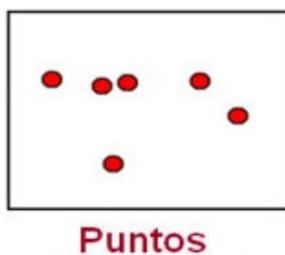


Figura. 2.11. Nodos, representación de poblados a escala pequeña.

Fuente: <http://medlem.spray.se/superclub57/gis57.html>

2.5.2.2 Ejes

Los ejes son llamados también líneas o arcos y representan el sistema interconectado que permiten el movimiento de flujos entre los nodos, dicho

movimiento implica un desplazamiento desde el origen hacia el destino o punto final (Marquez, 2004).

Según Marquez (2004), además implica la existencia de dos tipos de elementos: unos de naturaleza física y otros de naturaleza espacio/temporal:

- Entre los elementos de naturaleza física se encuentra lo que se transporta, el material móvil para efectuar el traslado, y las infraestructuras (el material que sirve de soporte al traslado).
- Entre los elementos de naturaleza espacio/temporal se hallan: el origen, el destino y los itinerarios.

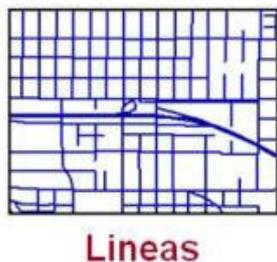


Figura. 2.12. Ejes, sistema vial
constituye una red.

Fuente: <http://medlem.spray.se/superclub57/gis57.html>

2.5.3 Aplicaciones

El análisis de redes permite encontrar soluciones a diversos problemas, a continuación se mencionan los más comunes:

- Encontrar la ruta óptima
- Determinar áreas de servicio
- Identificar el servicio más cercano
- Crear una matriz de origen y destino, entre otros.

2.5.4 Tipo de redes

La gran cantidad de soluciones que pueden darse con el análisis de redes, y por tanto la generación de una gran variedad de tipos de redes, éstas se han dividido en dos grupos de acuerdo a las funcionalidades y naturaleza de los flujos.

- Redes Geométricas
- Redes de Transporte

2.5.4.1 Redes Geométricas

Según Barrientos (2007), las redes geométricas son estructuras rígidas en cuanto a las políticas de circulación, pero flexibles en cuanto a diseño y conectividad, además en este tipo de redes el movimiento de personas, transporte de carga, la distribución de bienes, servicios, recursos o energía, las comunicaciones, etc., representan el flujo o movimiento al interior de un sistema definido. Llamadas así, ya que la geometría (conectividad, circulación) es de gran importancia en el comportamiento de toda la red.



Figura. 2.13. Red Geométrica, los ejes viales representan el movimiento al interior de un sistema.

Fuente: Barrientos, 2007

2.5.4.2 Redes de Transporte

Según Barrientos (2007), este tipo de red se identifica por representar de manera eficaz las principales características de la circulación vehicular a través de un área determinada. Además en este tipo de red el flujo al interior de ésta es totalmente libre, siempre y cuando no existan limitaciones al desplazamiento, por ejemplo, un conductor o vehículo podrá desplazarse por ella con total libertad siempre y cuando no existan restricciones como semáforos, bloqueos de calles y restricciones de circulación. Sin embargo, será el impedimento (definido como la necesidad de llegar más rápido o por el camino más corto) el que definirá en último término la circulación.



Figura. 2.14. Red de Transporte, circulación vehicular en una área determinada.

Fuente: Barrientos, 2007

2.6. LÓGICA DIFUSA

Las metodologías para modelamiento de diferentes fenómenos o variables SIG más conocidas y usadas son de tipo determinístico. Una alternativa es utilizar elementos relacionados con la probabilidad, es decir que se produzca o no una determinada condición. Es por esta razón que se propone utilizar un método probabilístico para la determinación o modelamiento de diferentes elementos, usando los criterios de los operadores difusos o como se conoce en inglés Fuzzy (Hemetsberger et.al., 2002).

“...La Lógica Fuzzy o Difusa, es un método basado en la teoría de conjuntos que posibilita imitar el comportamiento de la lógica humana. Mediante ella, podemos definir qué elementos no están correctamente caracterizados como el

uso del suelo, tipos de suelos, clasificación de la cobertura vegetal y tipos de vegetación. Básicamente la Lógica Fuzzy se usa para capturar la incertidumbre que muchos observadores sienten al definir una clasificación específica...” (Gossweiler, 2002).

Según López (2001), la lógica difusa fue investigada, por primera vez, a mediados de los años sesenta en la Universidad de Berkeley en EE.UU. La lógica difusa permite representar el conocimiento común, que es mayoritariamente del tipo lingüístico cualitativo y no necesariamente cuantitativo, en un lenguaje matemático a través de la teoría de conjuntos difusos y funciones características asociadas a ellos. Este permite trabajar a la vez con datos numéricos y términos lingüísticos, estos son inherentemente menos precisos que los datos numéricos pero en muchas ocasiones aportan una información más útil para el razonamiento humano.

El aspecto central de los sistemas basados en la teoría de la lógica difusa es que, a diferencia de los que se basan en la lógica clásica, tienen la capacidad de reproducir aceptablemente los modos usuales del razonamiento, considerando que la certeza de una proposición es una cuestión de grado. Más formalmente se puede decir que si la lógica es la ciencia de los principios formales y normativos del razonamiento, la lógica difusa o borrosa se refiere a los principios formales del razonamiento aproximado, considerando el razonamiento preciso (lógica clásica) como caso límite. Así pues, las características más atractivas de la lógica difusa son su flexibilidad, su tolerancia con la imprecisión, su capacidad para modelar problemas no-lineales, y su base en el lenguaje natural.

Los subconjuntos difusos (o partes borrosas de un conjunto) fueron inventados para modelar la representación humana de los conocimientos (por ejemplo para medir nuestra ignorancia o una imprecisión objetiva) y mejorar así los sistemas de decisión, de ayuda a la decisión, y de inteligencia artificial. Esta teoría nos permite manejar y procesar ciertos tipos de información en los cuales se manejen términos inexactos, imprecisos o subjetivos. De una manera similar a como lo

hace el cerebro humano, es posible ordenar un razonamiento basado en reglas imprecisas y en datos incompletos.

Si se acepta que las variables temáticas son continuas, el establecimiento de clases con límites absolutamente definidos, resulta problemático y parece más lógico pensar que la transición entre una clase y la siguiente debería ser gradual. Esta premisa permite denominar a cada una de estas clases, sin límites definidos, como conjunto difuso. Un conjunto difuso está caracterizado por una función de pertenencia a dicho conjunto, cuyo recorrido oscila entre cero y uno (desde la no pertenencia a la clase hasta la pertenencia absoluta).

En la lógica clásica una proposición sólo admite dos valores: verdadero o falso. Por ello se dice que la lógica usual es bivalente o binaria. Existen otras lógicas que admiten además un tercer valor posible (lógica trivaluada) e incluso múltiple valores de verdad (lógica multivaluada) (Padilla, 2006).

La lógica aristotélica sirve para explicar ciertos fenómenos y problemas, aunque la gran mayoría de ellos enmarcados en el mundo teórico de la matemática. Por el contrario, la lógica difusa puede usarse para explicar el mundo real, puesto que sigue el comportamiento humano de razonar, sacando conclusiones a partir de hechos observados. La lógica multivaluada incluye sistemas lógicos que admiten varios valores de verdad posibles. La lógica difusa permite representar de forma matemática conceptos o conjuntos imprecisos. Si P es una proposición, se le puede asociar un número $v(P)$ en el intervalo $[0,1]$ tal que:

Si $v(P) = 0$, entonces P es falso.

Si $v(P) = 1$, entonces P es verdadero.

La veracidad de P aumenta con $v(P)$ (Carranza, 2008).

La clasificación difusa, borrosa o Fuzzy evalúa la posibilidad de que cada elemento o pixel pertenezca a un determinado sistema o fenómeno (Guo et. Al.,

2004), este puede ser el caso de píxeles que pertenezcan o no a una clase específica en una banda de una imagen satelital (Figura. 2.15.).

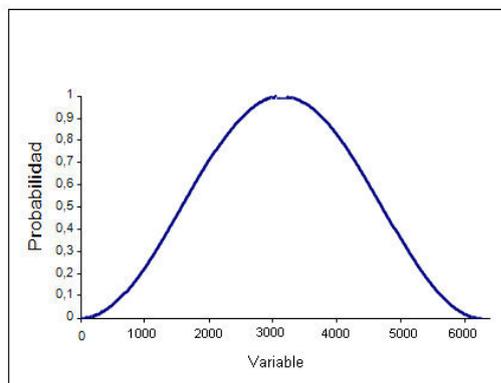


Figura. 2.15. Probabilidad tomando una variable, caso de píxeles que pertenezcan o no a una clase específica en una banda de una imagen satelital

Fuente: Padilla, 2006.

Las funciones sinusoidales o cosinusoidales se ajustan bastante bien a este tipo de representaciones, es por esto que utilizaremos ecuaciones en función de seno de alfa y coseno de alfa, (Ruiz, et. Al. 2007) donde alfa estará en función del fenómeno o variable que se desea modelar o representar, como se dijo antes este puede ser una clase en una imagen satelital.

Es así que la probabilidad se define de la siguiente forma:

$$P = f(\text{sen}\alpha)$$

Fórmula 1

Donde:

P = probabilidad de ocurrencia del evento o fenómeno

α = variable en función del evento o fenómeno

Mínima P = 0 o 0%

Máxima P = 1 o 100%

Para obtener una curva donde el rango sea de [0,1,0], usamos la función

cuadrada del seno.

$$P = \text{sen}^2 \alpha$$

Fórmula 2

Puntos importantes en la función:

Estas funciones están controladas por cuatro puntos situados de la siguiente forma (Figura. 2.17.):

Punto A: Punto de valor mínimo en la variable a modelar

Punto B y C: Rango de valores donde se encuentran la mayor cantidad de datos de la variable

Punto D: Punto de valor máximo en la variable.

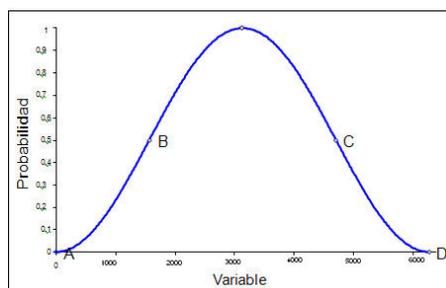


Figura. 2.16. Puntos importantes del modelo,
puntos de inflexión de la curva

Fuente: Revista Geoespacial No 4. Padilla Oswaldo

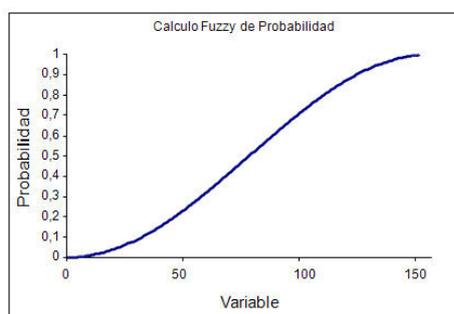


Figura. 2.17. Probabilidad Creciente, curva simétrica
controlada por cuatro puntos

Fuente: Revista Geoespacial No 4. Padilla Oswaldo.

Puntos de inflexión de la curva: estos puntos pueden ser tomados como un caso particular para situar los puntos B y C de las variables (Figura. 2.16.). Se tienen tres casos de los que se va a tomar como ejemplo el de la curva simétrica (Figura. 2.17.).

$$P = \text{Sen}^2\alpha$$

$$P' = 2 * \text{Sen}\alpha * \text{Cos } \alpha$$

$$P'' = 2 * \text{Sen}\alpha * -\text{Sen}\alpha + 2 * \text{Cos } \alpha * \text{Cos } \alpha$$

$$P'' = 2 * \text{Cos}^2\alpha - \text{Sen}^2\alpha$$

$$\text{Cos}^2\alpha - \text{Sen}^2\alpha = 0$$

$$1 - \text{Sen}^2\alpha - \text{Sen}^2\alpha = 0$$

$$1 - 2 * \text{Sen}^2\alpha = 0$$

$$\text{Sen}^2\alpha = 1/2$$

$$\alpha_1 = \pi / 4$$

$$\alpha_2 = 3 \pi / 4$$

Finalmente:

$$P1(A;0)$$

$$P2 (B; \pi / 4)$$

$$P3 (C; 3 \pi / 4)$$

$$P4 (D; \pi)$$

$$P5 ((B + C)/2; \pi/2), \text{ donde } P5 \text{ corresponde al punto medio de la curva.}$$

Zonas bajo la curva

De la ecuación general de la recta se tiene:

$$y - y_1 = [(Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1)] * (x - x_1)$$

Fórmula 3

El eje x será la variable y el eje y será:

$$P1(A, 0)$$

P2 (B, $\pi/4$)

$$y - y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{(X_2 - X_1)} (x - x_1)$$

$$\alpha - 0 = \frac{\frac{\pi}{4} - 0}{B - A} (V - A)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \times \frac{(V - A)}{(B - A)}$$

Fórmula 4

Zona IIa (P2, P5)

P2 (B, $\pi/4$)

P5 $(\frac{B+C}{2}, \frac{\pi}{2})$ $y - y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{(X_2 - X_1)} (x - x_1)$

$$\alpha - \frac{\pi}{4} = \frac{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}}{\frac{B+C}{2} - A} (V - B)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\frac{\pi}{2}(V - B)}{(C - B)}$$

Fórmula 5

Zona IIb (P5, P3)

P5 $(\frac{B+C}{2}, \frac{\pi}{2})$

P3 (C, $3\pi/4$)

$$y - y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{(X_2 - X_1)} (x - x_1)$$

$$\alpha - \frac{\pi}{2} = \frac{3\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}}{C - \frac{B+C}{2}} (V - \frac{B+C}{2})$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{\frac{\pi}{4}(2V - B - C)}{(C - B)}$$

Fórmula 6

Zona III (P3, P4)

P1(A, $3\pi/4$)

P2 (D, π)

$$y - y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{(X_2 - X_1)} (x - x_1)$$

$$\alpha - 3\frac{\pi}{4} = \frac{\pi - 3\frac{\pi}{4}}{D - C} (V - C)$$

$$\alpha = 3\frac{\pi}{4} + \frac{\frac{\pi}{4}(V - C)}{(D - C)}$$

Fórmula 7

Como se puede pensar existen diversas aplicaciones, como puede ser el modelamiento de fenómenos espaciales como la ubicación de especies u ocurrencia de un determinado fenómeno; en sensores remotos se aplica para la clasificación de imágenes en la obtención de una o varios elementos, como puede ser un tipo de vegetación, una colase de suelo específico, entre otros. En cualquiera de estas situaciones o ejemplos existen más de dos variables que se encuentran involucradas al elemento a obtenerse, es así que la probabilidad de localizar o modelar este elemento corresponde al producto de todas esas variables (Figura. 2.18.).

El diagrama muestra una ecuación matemática dentro de un recuadro rectangular. En el numerador, hay una serie de tres recuadros verdes que contienen 'PV1', '+', 'PV2', '+', '...', '+', 'PVn', todo encerrado entre paréntesis. Una línea horizontal gruesa se extiende debajo de esta serie. Debajo de la línea, hay un 'n'. A la derecha del 'n' hay un signo de igualdad '=' seguido de un recuadro verde que contiene 'Pt'.

Fórmula 8

Figura. 2.18. Probabilidad total con más de dos variables,
producto de todas las variables

Fuente: Padilla Oswaldo, 2006

$$Pt = (PV1 + PV2 + PV3 + \dots + PVn) / n$$

Donde:

Pt: es la probabilidad total de obtención de un fenómeno (clasificación

de una imagen)

PV1...PVn: son las probabilidades individuales, obtenidas mediante la metodología de operadores difusos propuesta, de cada variable.

n: número total de variables.

2.6.1 Aplicación de la Lógica Difusa

IMPLEMENTACION DEL ALGORITMO DE LOGICA FUZZY APLICADO A LA DETERMINACION DEL GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS EN EL AREA MONJAS – FERROVIARIA – LA MAGDALENA – ITCHIMBIA DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, realizado por Andocilla Lorena, 2012.

ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS MEDIANTE SIG Y GEOESTADÍSTICA EN LAS PARROQUIAS DE PAPALLACTA Y CUYUJA, CANTÓN QUIJOS, realizado por Áviles Marco y Hermosa Lizzette, 2009.

DETERMINACIÓN DEL HÁBITAT DEL OSO DE ANTEOJOS, PROGRAMA DE DOCTORADO DE CARTOGRAFÍA, SIG Y TELEDETECCIÓN 2005-ANÁLISIS TERRITORIAL-UNIVERSIDAD DE ALCALÁ DE HENARES, realizado por Oswaldo Padilla Almeida, 2005

2.7. SISTEMAS Y MODELOS

2.7.1. Sistemas

Un sistema es una fuente de datos del comportamiento de parte del mundo real. Está formado por elementos que interactúan para lograr un objetivo, los cuales poseen características o atributos, parámetros y variables, que toman valores numéricos o lógicos.

Un sistema puede tener variables independientes o dependientes, continuas, discretas o mixtas. Las variables que describen las entidades, los atributos y las actividades de un sistema en un instante particular de tiempo, que permiten predecir su comportamiento futuro, se denominan variables de estado y sus valores proporcionan el estado del sistema en ese instante, además relacionan el futuro con el pasado a través del presente. Si el comportamiento de los elementos del sistema puede predecirse con seguridad, el sistema es determinístico, de lo contrario es estocástico. Si la probabilidad de encontrarse en alguno de los estados no cambia con el tiempo el sistema es estático, de lo contrario es un sistema dinámico. Si el estado de un sistema sólo en ciertos instantes de tiempo se trata de un suceso directo, de lo contrario de un suceso continuo. (Menke, 1984; Tarantola y Valette, 1982)

2.7.2. Modelos

Un modelo es una representación formal de un sistema real, con el que se pretende aumentar su comprensión, hacer predicciones y ayudar a su control. Los modelos pueden ser físicos (descritos por variables medibles), análogos (diagrama de flujo) y simbólicos (matemáticos, lingüísticos, esquemáticos). Los modelos matemáticos o cuantitativos son descritos por un conjunto de símbolos y relaciones lógico-matemáticas. Para la construcción de un buen modelo es necesario contar con leyes (por ejemplo, físicas) que describan el comportamiento del sistema. También es importante la experiencia, la intuición, la imaginación, la simplicidad y la habilidad para seleccionar el subconjunto más pequeño de variables. El primer paso es establecer el problema en forma clara y lógica delimitando sus fronteras; luego viene la recogida y depuración de datos; el diseño del experimento; las pruebas de contrastes; la verificación del modelo y la validación de las hipótesis. Por ejemplo, un análisis de sensibilidad determina el grado de influencia en la solución del modelo debida a variaciones en los parámetros (robustez de un modelo). Un modelo debe ser una buena aproximación al sistema real, debe incorporar los aspectos

importantes del sistema y debe resultar fácil de comprender y manejar. Un factor muy importante es que haya una alta correlación entre lo que predice el modelo y lo que actualmente ocurre en el sistema real. (Menke, 1984; Tarantola y Valette, 1982)

2.7.3. Relación entre sistemas y modelos

Un sistema puede ser descrito mediante una función que relaciona un conjunto de datos u observaciones (d , variables de respuesta) con un grupo de parámetros $P(m_1, m_2, \dots)$; cada grupo de valores específicos de este grupo de parámetros proporciona un modelo (m) diferente. Si se dispone de un modelo físico (G) que obtenido a partir de la teoría relaciona los datos observados con los parámetros conocidos –variables–, se tiene entonces una relación funcional $G = F(d, m)$ que describe el fenómeno; si esta relación es lineal, se define entonces como $Gm = d$. Aquí se pueden tener dos situaciones diferentes: se conocen los parámetros del modelo pero es necesario conocer la respuesta de ese sistema, esta situación es conocida como el problema directo; o de lo contrario, se dispone de observaciones de las variables de predicción y de respuesta, pero se desconocen los parámetros del modelo que expliquen mejor la relación entre esas variables, aquí se habla del problema inverso, el cual se resuelve mediante regresión estadística. Resolver el problema inverso consiste en estimar los valores del modelo (m) que expliquen mejor las observaciones. (Menke, 1984; Tarantola and Valette, 1982).

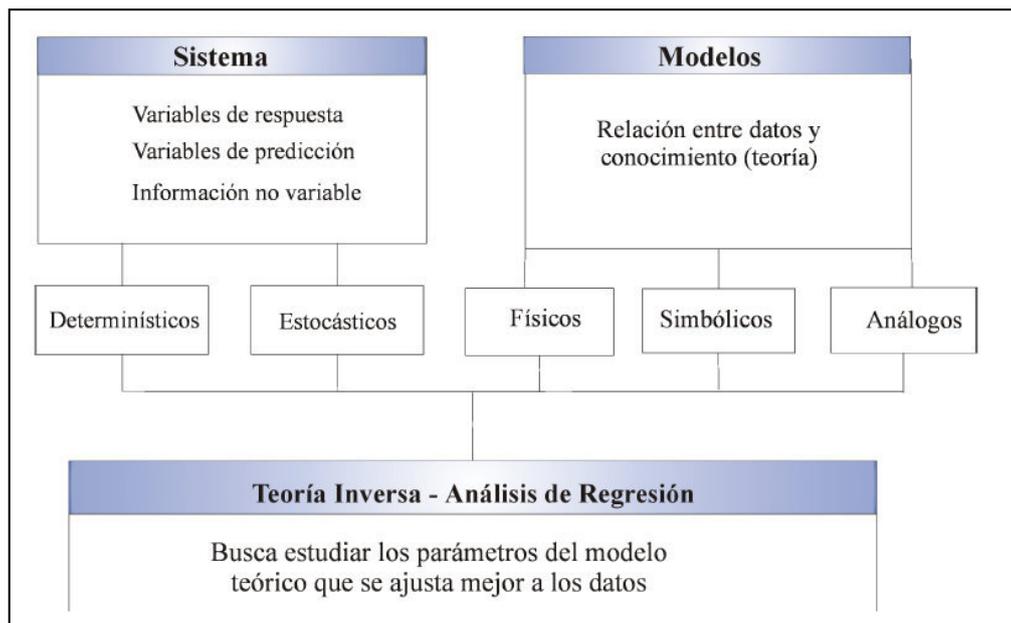


Figura. 2.19. Sistemas y Modelos

Relación existente entre sistemas y modelos

Fuente: <http://www.osso.org.co/docu/tesis/2003/evaluacion/analisis.pdf>

2.8. VALIDACIÓN DE MODELOS

Según (Menke, 1984; Tarantola y Valette, 1982) una vez conocidos los valores de m , es necesario realizar una validación de este modelo. Se debe cuantificar qué tan adecuadamente el modelo describe los datos (observaciones o simulaciones) para los cuales fue aplicado y cómo es el ajuste. Antes de proceder a evaluar el modelo obtenido es necesario re-examinar la formulación del problema para detectar posibles errores y determinar la consistencia de las expresiones matemáticas. La siguiente etapa consiste en evaluar algunos estadísticos de prueba como el coeficiente de correlación, la desviación estándar y los respectivos ajustes en donde se puede verificar que el menor valor del ajuste de los modelos analizados es el óptimo de ellos. Finalmente es necesario verificar si las condiciones o supuestos iniciales coinciden con los resultados obtenidos, para esto es necesario el uso de pruebas de bondad de ajuste.

Hay dos factores importantes que se debe tener en cuenta en esta etapa:

1. Los resultados obtenidos generalmente son el resultado de la conjunción de varios factores como tiempo, dinero y trabajo en grupo; por tanto es importante obtener la mayor cantidad de información y dar a conocer los resultados para que sean de utilidad.
2. Los valores obtenidos son el resultado de un trabajo consciente, por lo tanto se merecen un análisis real y objetivo.

2.8.1. Pruebas de Validación

La validación de los modelos se da en base a la desviación estándar, que es un conjunto de datos o una medida de dispersión, que nos indica cuanto pueden alejarse los valores respecto al promedio (media), por lo tanto es útil para buscar la probabilidad de que un evento ocurra. El ajuste realizado en los procesos SIG, se basan en la siguiente fórmula:

$$N = \text{Valor medido} - \text{Valor Calculado} \quad \text{Fórmula 9}$$

O

$$N = 1 - Y \quad \text{Fórmula 10}$$

Donde:

N = ajuste

Valor medido = 1 o valor de los puntos de muestra

Valor calculado = cálculo de la desviación estándar de los promedios de probabilidades (Y) de los diferentes modelos.

Todos los modelos muestran a su forma, y la realidad mostrando su variabilidad.

2.9. BASES DE DATOS

"Una base de datos geográfica es una colección de datos organizados de tal manera que sirvan efectivamente para una o varias aplicaciones SIG. Esta base de datos comprende la asociación entre sus dos principales componentes: datos espaciales y atributos o datos no espaciales" (ESRI, 1998).

2.9.1 Generalidades

- a) **Datos espaciales.-** Los datos o atributos espaciales son las características geográficas de los objetos descritos (ubicación, dimensión, forma), es decir, los puntos que conforman el perímetro de una población están almacenados en cierto tipo de archivos que interpretan las aplicaciones geográficas que se encuentran en el mercado (ESRI, 1998).

- b) **Datos no espaciales.-** Los datos no espaciales o atributos son las características cuantitativas asociadas al objeto que se desea describir, generalmente se almacenan en tablas y se administran por algún manejador de bases de datos. También son llamados datos descriptivos (ESRI, 1998).

- c) **Capas Geográficas.-** Las capas son las características geográficas del evento o área que se desea modelar, organizadas en temas para facilitar la información. Por ejemplo, un mapa puede ser organizado en varios temas o capas, tales como división política, hidrología, caminos, contornos o puntos de control. Dichas capas pueden ser almacenadas en archivos separados, pues sus atributos son diferentes. En el caso que se utilicen bases de datos se almacenan en tablas separadas (ESRI, 1998).

- d) **Entidad.-** En general, una entidad es una cosa (objeto, persona, evento, concepto) distinguible de lo que le rodea, acerca de la cual se requiere información. Para propósitos de la BDG, una entidad es la representación

digital del componente descriptivo de un rasgo geográfico. Se le asocia un nombre con el fin de distinguirla de otras entidades como por ejemplo una carretera, presa, línea de transmisión, eje estructural, área agrícola (KORTH, 1998).

- e) **Representación geométrica.-** Constituye la representación digital del componente espacial de un rasgo geográfico. La base de datos geográfica (BDG) sustenta tres tipos diferentes y básicos de representación geométrica: punto, línea, y área. Cada entidad puede estar asociada con distintos tipos de representación geométrica. Por ejemplo, una localidad puede estar representada ya sea como punto, o como área, dependiendo de sus dimensiones y de la escala (INEGI, 1997).

- f) **Modelos de datos.-** Los modelos de datos son un conjunto de herramientas conceptuales para describir datos, sus relaciones, su significado y sus restricciones de consistencia. Los dos tipos de modelados importantes son los modelos orientados a registros también llamado relacional y los modelos orientados a objetos (KORTH,1998).

2.9.2 Construcción de bases de datos geográficas

La construcción de una base de datos geográfica implica un proceso de abstracción para pasar de la complejidad del mundo real a una representación simplificada asequible para el lenguaje de los ordenadores actuales. Este proceso de abstracción tiene diversos niveles y normalmente comienza con la concepción de la estructura de la base de datos, generalmente en capas. En esta fase, y dependiendo de la utilidad que se vaya a dar a la información a compilar, se seleccionan las capas temáticas a incluir. La estructuración de la información espacial procedente del mundo real en capas conlleva cierto nivel de dificultad. Existen relaciones espaciales entre los objetos geográficos que el sistema no puede obviar; es lo que se denomina topología, que en realidad es el método matemático-lógico usado para definir las relaciones espaciales entre los objetos geográficos (Andocilla, 2012).

Aunque a nivel geográfico las relaciones entre los objetos son muy complejas, siendo muchos los elementos que interactúan sobre cada aspecto de la realidad, la topología de un SIG reduce sus funciones a cuestiones mucho más sencillas. Un ejemplo es conocer el polígono (o polígonos) a que pertenece una determinada línea, o bien saber qué agrupación de líneas forman una determinada carretera.

Existen diversas formas de para modelar estas relaciones entre los objetos geográficos, dependiendo de la forma en que ello se lleve a cabo se tiene uno u otro tipo de Sistema de Información Geográfica dentro de una estructura (Avilés y Hermosa, 2009).

2.10 INFRAESTRUCTURA DE DATOS ESPACIALES

2.10.1 Concepto

Es el conjunto de políticas, acuerdos, leyes, normas, estándares, organizaciones, planes, programas, proyectos, recursos humanos, tecnológicos y financieros, integrados adecuadamente para facilitar la producción, el acceso y uso de la geoinformación regional, nacional o local, para el apoyo al desarrollo social, económico y ambiental de los pueblos (Instituto Geográfico Militar, 2009).

La Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) es considerada como un “conjunto de tecnologías, políticas y acuerdos institucionales destinados a facilitar el acceso a información espacial, constituyéndose en una base para la búsqueda, visualización, análisis y aplicación de datos espaciales a todos los niveles; teniendo en cuenta que sus componentes son: tecnologías, marco institucional, políticas de datos y los estándares establecidos” (Bosque, 2007).

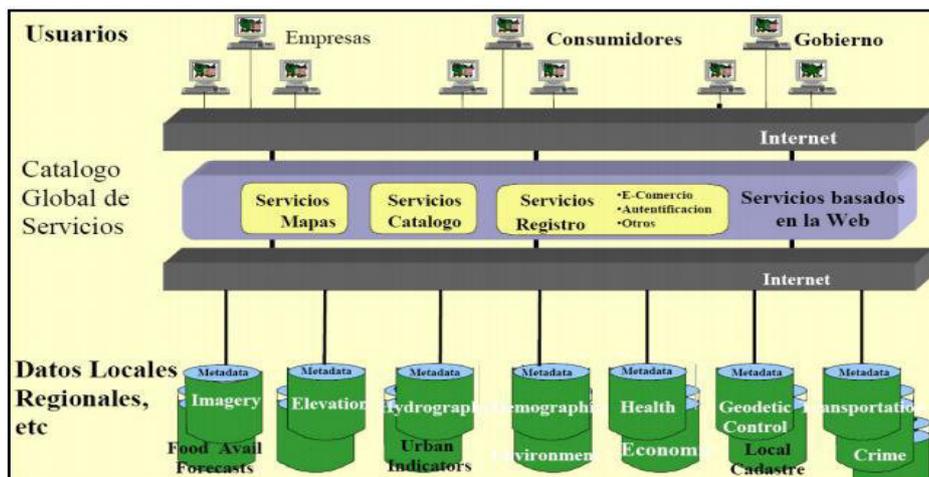


Figura. 2.20. Estructura de una IDE, catálogos, servidores, programas, datos, aplicaciones, páginas Web, dedicados a gestionar la información geográfica.

Fuente: Bosque, 2007

2.10.2 Utilidades de una IDE

Tabla. 2.3. Utilidades de una IDE

UTILIDAD	MEDIANTE
Encontrar datos	Servidor de Catalogo
Obtener datos	Servidor de Mapas Servidor de Coberturas Servidor de Objetos
Geoprocasar datos	Convertor de Formatos Transformación de Coordenadas Gorreferenciación Combinación de datos
Comprar/Vender datos	Gestión del pedido Gestión de los cobros Seguridad y autenticación

FUENTE: Bosque, 2007

2.10.3 Principios de una IDE

Según la Infraestructura de Datos Espaciales de la República de Argentina, se deben considerar los siguientes principios básicos:

- **Marco Institucional.** Consiste en el conjunto de acuerdos de cooperación necesarios entre los productores de información geográfica, especialmente entre aquellos pertenecientes a organismos oficiales, para generar y mantener los datos espaciales fundamentales para la mayoría de las aplicaciones basadas en SIG.
- **Estándares.** Consiste en el establecimiento de normas a las que debe ajustarse la información geográfica, los procesos de intercambio de ésta y la interoperación de los sistemas que deben manejarla.
- **Tecnología.** Consiste en el establecimiento de la red, equipos y programas informáticos que permitan buscar, consultar, encontrar, acceder, suministrar y utilizar los datos geográficos.
- **Política de datos.** Consiste en el establecimiento de las políticas, acuerdos y pautas de colaboración necesarios para estimular y fortalecer la cooperación y el intercambio de datos e información geográfica, incrementando su disponibilidad y compartiendo los desarrollos tecnológicos.

2.10.4 Componentes de una IDE

Una IDE está compuesta principalmente por:

- Datos
- Metadatos
- Estándares
- Servicios
- Software IDE



Figura. 2.21. Componentes de una IDE

Fuente: IGM, 2009

a) Datos

La clasificación de datos espaciales se basa en un consenso internacional, que divide a los mismos en los siguientes tipos:

Datos de Referencia: Estos datos forman el mapa base sobre el cual se referencia los datos temáticos.

Datos Temáticos: Estos datos están definidos, ya que aportan información geográfica sobre un fenómeno específico.

b) Metadatos

Los metadatos son la información del dato, como: fecha de creación, nombre, autor, descripción, etc., esto permite una utilización más eficiente del dato geográfico.

La creación de los metadatos se rige bajo la norma internacional ISO 19115 “Geographic information – Metadata”, donde se establece la terminología, definiciones y procedimientos para generar metadatos.

c) Estándares

Los estándares hacen posible la interoperabilidad necesaria para que los datos, servicios y recursos de una IDE puedan ser utilizados, combinados y compartidos. (IDEE, 2009)

Según la Norma ISO 19119: “La interoperabilidad es la capacidad para comunicar, ejecutar programas, o transferir datos entre varias unidades funcionales sin necesidad que el usuario tenga conocimiento de las características de esas unidades”. (Figura 23)



Figura. 2.22. Interoperabilidad, sistemas homogéneos
intercambian procesos o datos.

Fuente: IDEE, 2009

La Infraestructura de Datos Espaciales de España, menciona que se debe estandarizar todo lo que esté relacionado con el proceso de compartir información:

- **Formato de intercambio:** Un formato estándar para el intercambio de la información geográfica GML (Lenguaje de Mercado Geográfico).
- **Descripción de los datos:** Metadatos (ISO).
- **Especificación de Servicios:** instrucciones específicas y consensuadas para que los diferentes componentes informáticos puedan entenderse entre sí, permitiendo la interoperabilidad de contenidos y servicios de la información geográfica (OGC).

d) Servicios

Una IDE brinda sus servicios vía internet, sin la necesidad de disponer de un software específico.

Según la IDEE, los servicios más importantes de una IDE son los siguientes:

Servicio de Mapas en Web (WMS)

- Permite la visualización de cartografía generada a partir de una o varias fuentes: fichero de datos de un SIG, un mapa digital, una ortofoto, una imagen de satélite, etc.
- Se puede consultar cierta información disponible acerca del contenido de la cartografía que se visualiza.

Servicio de Fenómenos en la Web (WFS)

- Permite acceder a los datos en formato vectorial mediante el empleo del formato de un lenguaje específico denominado GML (*Geographic Markup Language*).
- Se accede al archivo que define la geometría descrita por un conjunto de coordenadas de un objeto cartográfico, como un río, una ciudad, un lago, entre otros.

Servicio de Coberturas en Web (WCS)

- Es un servicio similar a WFS para datos en formato ráster.

- Permite consultar el valor del atributos o atributos almacenados en cada píxel.

Servicio de Catálogo (CSW)

- Permite publicar y buscar información de datos, servicios, aplicaciones y en general de todo tipo de recursos.
- Permite la gestión de los Metadatos, descriptores de los datos (“datos de los datos”), para llevar a cabo búsquedas.

Servicio de Nomenclátor (*Gazetteer*)

- Permite localizar un fenómeno geográfico mediante su nombre, en base a la interrogación de listas de nombres geográficos, los llamados Nomenclátors, que vinculan coordenadas geográficas a cada nombre.
- Devuelve la localización, mediante unas coordenadas, del fenómeno localizado.
- La consulta por nombre permite fijar otros criterios como la extensión espacial en que se desea buscar o el tipo de fenómeno dentro de una lista disponible (río, montaña, población,...).

e) Software IDE

“Las múltiples las herramientas software que se utilizan para el desarrollo e implementación de aplicaciones en el contexto de una IDE, deben cumplir con los estándares OGC para que puedan integrarse y ser accesibles a través de un Geoportal Web.



Figura. 2.23. Software IDE, las múltiples herramientas se encuentran tanto software propietario como software libre

Fuente: IDEE, 2009

Otra posibilidad es acceder a los servicios de una IDE utilizando una aplicación específica, un software de SIG que ofrece funcionalidades de búsqueda, visualización, consulta, análisis a partir de los servicios disponibles” (IDEE,2009).

2.11 NORMATIVA

García y Rodríguez, (citado en ISO/TC 211 Standards Guide, 2010) mencionan lo siguiente, “El papel de las Normas Internacionales para la Estandarización es facilitar el intercambio de bienes y servicios a través de la eliminación de barreras técnicas.

En cuanto a los Estándares para la Información Geográfica, su valor está en la interoperabilidad de las bases de datos geográficas y las aplicaciones, así su aporte será permitir el acceso a estas bases de datos y aplicaciones desde una multitud de equipos móviles en forma remota”.

2.11.1 Normas ISO 19100

El Comité Internacional ISO/TC 211 comenzó a trabajar en noviembre de 1994 con el objetivo de establecer una normativa de referencia en el campo de la información geográfica digital, pensada tanto para la transferencia de datos y el mundo de los SIG aislados, como para los servicios y el universo de las IDE o SIG distribuidos. (ISO/TC 211 Standards Guide, 2010)

Como resultado de este trabajo apareció la familia ISO 19100, un conjunto de normas relacionadas con objetos o fenómenos que están directa o indirectamente asociados con una localización relativa a la Tierra. La normativa trata sobre los métodos, herramientas y servicios para la gestión de datos, adquisición, procesamiento, análisis, acceso, presentación y transferencia de información geográfica en formato digital entre diferentes usuarios, sistemas y localizaciones (ISO/TC 211 Standards Guide, 2010).

Para el año 1995, tanto la ISO/TC 211 con el desarrollo de estándares internacionales para datos espaciales, como el OGC con el desarrollo de especificaciones para las interfaces computacionales, se convirtieron en actores prominentes en las agendas geográficas internacionales. (ISO/TC 211 Standards Guide, 2009)

Los estándares producidos por ISO/TC 211 para la familia ISO 19100 se resumen a continuación en grupos de acuerdo a ciertas áreas definidas (ISO/TC 211 Standards Guide, 2010):

Grupos de Estándares para la Información Geográfica definidos por ISO/TC 211

Normas que especifican la Infraestructura para la Estandarización Geoespacial

ISO 19101 Información Geográfica Modelo de Referencia

ISO/TS 19103 Información Geográfica Lenguaje de esquema conceptual

ISO/TC 19104 Información Geográfica Terminología
ISO 19105 Información Geográfica Conformidad y Ensayos
ISO 19106 Información Geográfica Perfiles

Normas que describen Modelos de Datos para la Información Geográfica

ISO 19109 Información Geográfica Reglas para el esquema de aplicación
ISO 19107 Información Geográfica Esquema espacial
ISO 19137 Información Geográfica Perfil principal del esquema espacial
ISO 19123 Información Geográfica Esquema para geometría y funciones de coberturas.
ISO 19108 Información Geográfica Esquema temporal.
ISO 19141 Información Geográfica Esquema para objetos en movimiento.
ISO 19111 Información Geográfica Referencia espacial por coordenadas.
ISO 19112 Información Geográfica Referencia espacial por identificadores geográficos.

Normas para el Manejo de Información Geográfica

ISO 19110 Información Geográfica Metodología para catalogación de objetos
ISO 19115 Información Geográfica Metadatos.
ISO 19113 Información Geográfica Principios de calidad.
ISO 19114 Información Geográfica Procedimientos de evaluación de la calidad.
ISO 19131 Información Geográfica Especificaciones de productos de datos.
ISO 19135 Información Geográfica Procedimientos para el registro de elementos.
ISO/TS 19127 Información Geográfica Códigos geodésicos y parámetros.
ISO/TS 19138 Información Geográfica Medidas de calidad de datos.

Normas para los Servicios de Información Geográfica

ISO 19119 Información Geográfica Servicios

ISO 19116 Información Geográfica Servicios de posicionamiento.

ISO 19117 Información Geográfica Representación gráfica.

ISO 19125-1 Información Geográfica Acceso a objetos simples – Parte1: Arquitectura común.

ISO 19125-2 Información Geográfica Acceso a objetos simples– Parte2: Opción SQL.

ISO 19128 Información Geográfica Interfazde servidor de mapas web.

ISO 19132 Información Geográfica Servicios basados en localización – Modelo de referencia.

ISO 19133 Información Geográfica Servicios basados en localización – Rastreo y navegación.

ISO 19134 Información Geográfica Servicios basado en localización – Enrutamiento y navegación multimodales.

Normas para Codificación de Información Geográfica

ISO 19118 Información Geográfica Codificación.

ISO 6709 Representación estándar de localización geográfica por coordenadas.

ISO 19136 Información Geográfica Lenguaje de Mercado Geográfico (GML).

ISO/TS 19139 Información Geográfica Metadatos – Implementación del esquema XML.

Normas para áreas temáticas específicas

ISO/TS 19101-2 Información Geográfica Modelo de Referencia – Parte2: Imágenes.

ISO 19115-2 Información Geográfica Metadatos – Parte2: Extensiones para imágenes y datos ráster.

2.11.2 Especificaciones Open Geospatial Consortium – OGC

“El Open Geospatial Consortium (OGC) fue creado en 1994 y actualmente forman parte de él un total de 372 organizaciones públicas y privadas. El OGC surge a raíz del desarrollo del software SIG de fuente libre GRASS y la subsiguiente Fundación OGF (Open GIS Foundation) creada en 1992. Anteriormente fue conocido como Open GIS Consortium. Este consorcio forma parte del comité técnico de la ISO encargado de desarrollar los estándares en materia de Información geográfica, el TC-211” (IDEJAEN,2013).

“El OGC, consorcio de más de trescientas organizaciones industriales, agencias gubernamentales y universidades sin fines de lucro, realiza un trabajo de estandarización cuyo objetivo es definir especificaciones de interoperabilidad por consenso, llevando la filosofía de los sistemas abiertos al mundo de los SIG. Por ese motivo, en un principio OGC respondía al nombre de Open GIS Consortium, pero al poner en práctica la interoperabilidad de los SIG mediante la definición de servicios web de interfaz estandarizada, apareció el concepto de IDE como SIG distribuido y el mismo OGC modificó su nombre.

Las especificaciones de OGC se estructuran en dos grandes bloques:

- Los Modelos Abstractos (proporcionan las bases conceptuales para el desarrollo de otras especificaciones OGC).
- Las Especificaciones para Implementación (concebidas para una audiencia técnica con el nivel de detalle necesario para realizar una implementación)” (ISO/TC 211 Standards Guide,2010).

“El objetivo de este consorcio es la definición de estándares abiertos e interoperables dentro de los Sistemas de Información Geográfica y de la World Wide Web. Buscando acuerdos entre las diferentes empresas del sector que

posibiliten la interoperación de sus sistemas de geoprocésamiento y facilitar el intercambio de la información geográfica en beneficio de los usuarios. A la OGC pertenecen las grandes empresas productoras de software, además de agencias públicas y centros de investigación.

Las principales especificaciones desarrolladas por la OGC son GML, KML, WMS, WFS, WCS y CSW. Es este conjunto de especificaciones en el que se basan los servicios de la mayoría de las Infraestructuras de Datos Espaciales, dado que aseguran la interoperabilidad con neutralidad tecnológica y han sido implementadas en numerosas herramientas de software” (IDEJAEN,2013).

CAPITULO 3

METODOLOGIA

3.1. Zonas de Recurrencia a Incendios Forestales

El desarrollo metodológico para el cumplimiento del primer objetivo inicia con la selección de la bibliografía apropiada para el tratamiento de imágenes satelitales y técnicas de identificación de áreas quemadas, además se recopila, organiza y analiza la información necesaria proporcionada por distintas instituciones públicas y privadas.

La información cartográfica base a escala 1: 5000 y 1: 10000, proporcionada por distintas instituciones del Ilustre Municipio de Quito, fue sometida a procesos de edición y estructuración para su respectivo uso y tratamiento en el SIG, la misma, fue utilizada en el tratamiento digital de las imágenes satelitales.

Las imágenes satelitales utilizadas son:

Tabla 3.1. Imágenes satelitales utilizadas.

SATELITE	FECHA	BANDAS	FUENTE
LANDSAT/TM	1991-07-27	1,2,3,4,5,6,7	Instituto Espacial Ecuatoriano
LANDSAT/TM	1991-09-13	1,2,3,4,5,6,7	Instituto Espacial Ecuatoriano
LANDSAT/TM	1991-10-15	1,2,3,4,5,6,7	Instituto Espacial Ecuatoriano
LANDSAT/TM	1996-07-24	1,2,3,4,5,6,7	Instituto Espacial Ecuatoriano
LANDSAT/TM	1996-08-25	1,2,3,4,5,6,7	Instituto Espacial Ecuatoriano
LANDSAT/TM	2000-05-16	1,2,3,4,5,6,7	Instituto Espacial Ecuatoriano

Continúa...

Tabla 3.1. Imágenes satelitales utilizadas.

SATELITE	FECHA	BANDAS	FUENTE
LANDSAT/TM	2000-07-19	1,2,3,4,5,6,7	Instituto Espacial Ecuatoriano
LANDSAT/TM	2000-10-23	1,2,3,4,5,6,7	Instituto Espacial Ecuatoriano
LANDSAT/ ETM+	2009-09-06	1,2,3,4,5,6,7,8	Secretaría de Ambiente del Municipio Quito
RAPIDEYE	2012-09-16	1,2,3,4,5	Instituto Espacial Ecuatoriano
RAPIDEYE	2012-09-16	1,2,3,4,5	Instituto Espacial Ecuatoriano
RAPIDEYE	2012-09-16	1,2,3,4,5	Instituto Espacial Ecuatoriano
RAPIDEYE	2012-09-19	1,2,3,4,5	Instituto Espacial Ecuatoriano
RAPIDEYE	2012-08-08	1,2,3,4,5	Instituto Espacial Ecuatoriano

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

*En el anexo 3.1, se detallan las características de las imágenes.

El paquete geográfico utilizado durante el desarrollo metodológico fue:

- ArcGIS 9.X

3.1.1 Tratamiento Digital de Imágenes Satelitales

Para la interpretación de las imágenes satelitales obtenidas por distintos sensores, se debe realizar un tratamiento con anterioridad para determinar las mismas coordenadas geográficas y comparar con una misma unidad de medida, por lo tanto requiere de una corrección geométrica y radiométrica (Chuvieco 2002)

- **Corrección Geométrica**

Las imágenes adquiridas estaban georeferenciadas en WGS84 17N, por lo cual fue necesario re proyectar las imágenes a WGS84 17S, datum geocéntrico utilizado en Ecuador, para verificación del proceso se tomaron puntos GPS no sujetos a dinamismo temporal en campo, los mismos ratificaron que el proceso fue realizado correctamente.

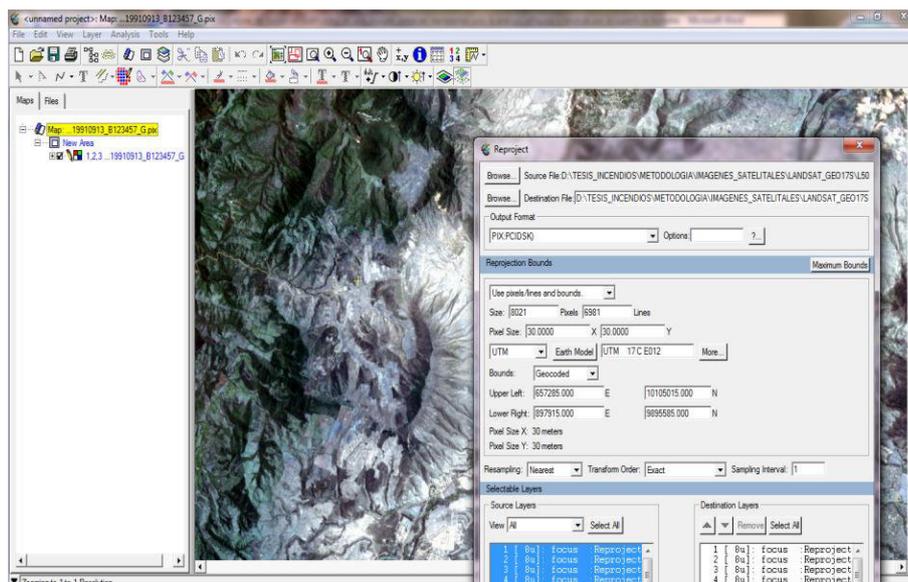


Figura. 3.1. Corrección Geométrica

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Una vez realizada la corrección geométrica se procede a delimitar la zona de estudio, para lo cual se dispone del modelo digital del terreno que corresponde al dominio espacial del área de interés.

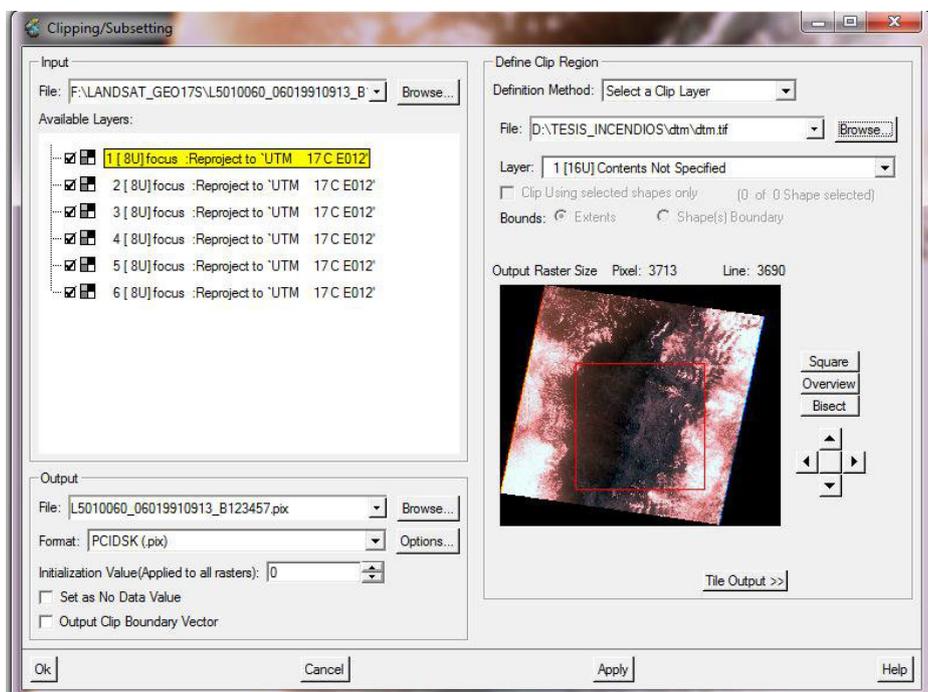


Figura. 3.2. Zona de estudio

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

- **Corrección Radiométrica**

Se designa a aquella técnica que modifica los niveles digitales originales, con objeto de acercarlos a los que habría presentes en la imagen en caso de una recepción ideal (Chuvienco, 2002, p.259).

Se aplicaron las siguientes correcciones a las imágenes satelitales para el respectivo análisis:

- Conversión a reflectividad y corrección atmosférica
- Corrección topográfica

Inicialmente fue necesario corregir las líneas de datos inválidos conocidos como gaps, presentes en la imagen Landsat ETM+, 2009, los mismos que provocan una pérdida de aproximadamente el 22% de información en la imagen, este es un error propio del sensor ETM+ ya que, en mayo del 2003 comenzó a presentar fallas en el SLC, por lo cual las imágenes adquiridas desde esa fecha hasta hoy presentan gaps, el error se corrigió con el complemento gapfill para Arcgis 9.X.

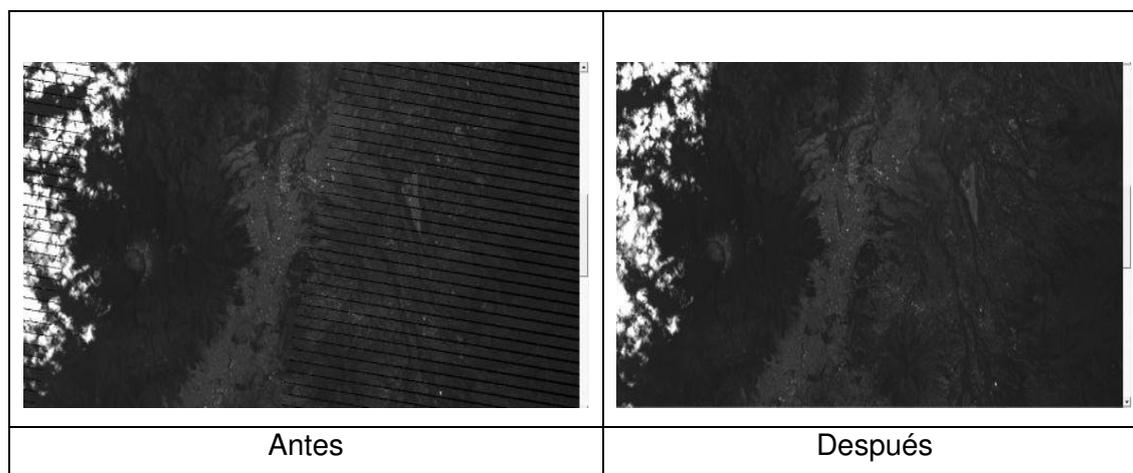


Figura. 3.3. Corrección de gaps Landsat ETM+ 2009

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Conversión a reflectividad y Corrección atmosférica

La conversión de niveles digitales (ND) almacenados en una imagen original a variables físicas es un paso previo que resulta de gran utilidad en múltiples fases de la interpretación de imágenes, ya que permite trabajar con variables físicas de significado estándar, comparables con un mismo sensor a lo largo del tiempo, entre distintos sensores [...] (Chuvieco, 2002, p.263).

Se utiliza el modelo propuesto por Chávez (1996), el cual consiste en “asumir valores de radiancia espectral próximos a cero a las áreas que presentan fuerte absortividad como el agua, áreas con sombras. Para obtener dicha aproximación se debe restar los ND con el ND mínimo de cada banda de la imagen, pero los errores pueden ser considerables para valores de reflectividad altos al no tomar en cuenta las transmisividades del flujo incidente y reflejado.

Para evitar este problema, Chávez sugiere estimar la transmisividad descendente a partir del espesor atmosférico definido por el ángulo cenital (θ_i) y además no considera la irradiancia difusa para observaciones verticales” (Ponce, 2008).

Finalmente la ecuación aplicada es la siguiente:

$$\rho_k = \frac{K * \pi * a_{1,k} * (ND_k - ND_{\min,k})}{E_{o,k} \cos \theta_i \tau_{k,i}} \quad \text{Fórmula 11}$$

Fuente: Chávez, 1996

Donde:

ρ_k es la reflectividad para la banda k,

K es un factor que tiene en cuenta la variación de la distancia Tierra-Sol, y se calcula a partir del día juliano (D) siguiendo la siguiente fórmula:

$$K = (1 + 0.0167 (\sin (2\pi (D - 93,5) / 365)))^2;$$

$E_{0,k}$ es la irradiancia solar en el techo de la atmósfera para la banda k

θ_i el ángulo cenital solar;

$\tau_{k,i}$ la transmisividad para el flujo descendente en la banda k

En el anexo 2, se pueden observar los valores de $a_{1,k}$, $E_{0,k}$ y $\tau_{k,i}$, respectivamente para cada sensor.

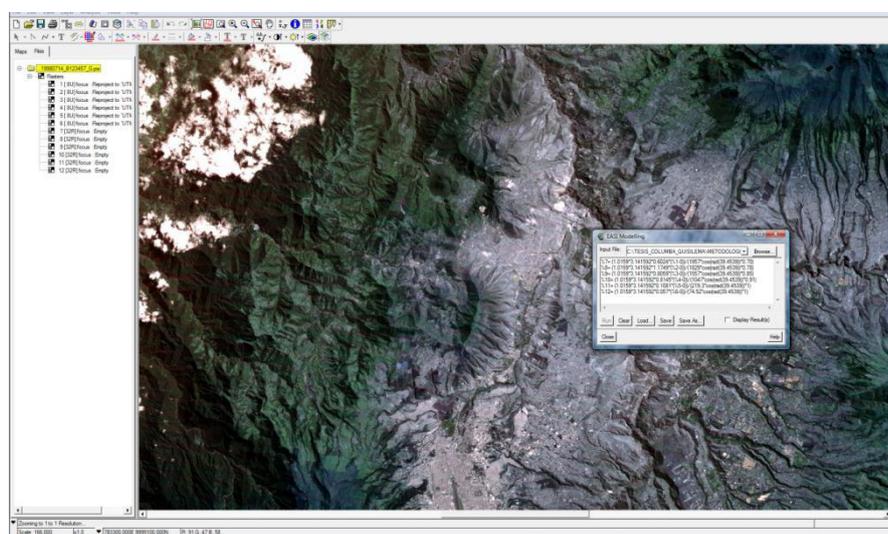


Figura. 3.4. Conversión a reflectividad y corrección atmosférica

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Corrección Topográfica

La corrección topográfica permite compensar la diferencia de la iluminación solar en la imagen satelital causada por la diferencia altitudinal del terreno, esta corrección se realiza en dos fases, en la primera se calcula el ángulo de iluminación y en la segunda fase se calcula el valor de reflectividad de entrada que depende del ángulo anteriormente calculado.

El ángulo de iluminación se lo obtiene con la siguiente fórmula:

$$I_i = \cos \theta_c \cos \theta_n + \sin \theta_c \sin \theta_n \cos(\varphi_c - \varphi_n)$$

Fórmula 12

Fuente: Civco, 1989

Donde:

I_i es el ángulo de iluminación

θ_c es ángulo cenital solar

θ_n la pendiente del terreno

φ_c ángulo acimutal solar

φ_n ángulo de orientación de la vertiente.

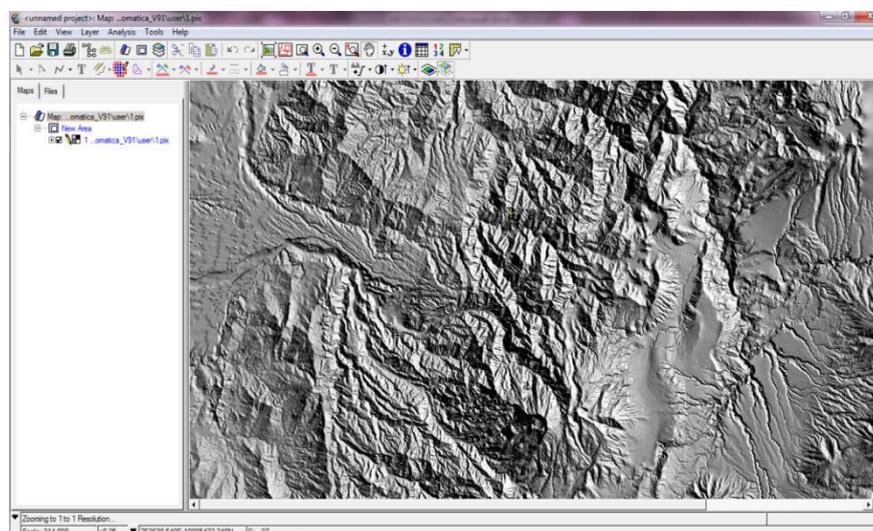


Figura. 3.5. Iluminación

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Después de calcular el ángulo de iluminación se calcula el valor de reflectividad de entrada, mediante la fórmula de Civco (1989):

$$\rho_{h,i} = \rho_i + \rho_i \frac{(I_m - I_i)}{(I_m)} \quad \text{Fórmula 13}$$

Fuente: Civco, 1989

I_m es la media de iluminación para toda la imagen.

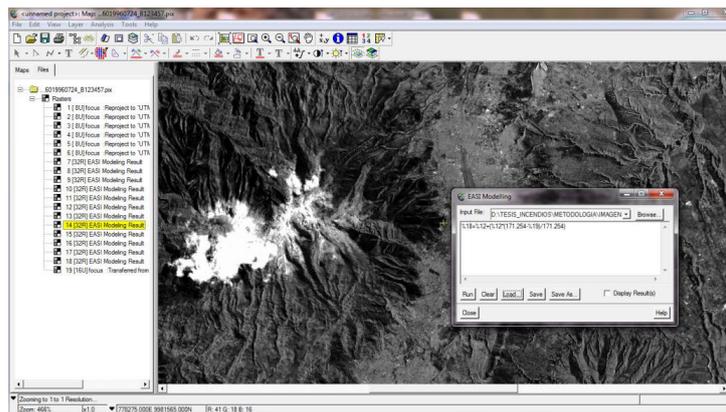


Figura. 3.6. Corrección Topográfica

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

3.1.2 Identificación y Extracción de Áreas Quemadas

Una vez que se han corregido las imágenes satelitales, se aplican distintas técnicas que permiten identificar y extraer de la mejor forma posible las áreas quemadas.

Combinación de bandas

Se refiere a la composición específica de las bandas multiespectrales de las imágenes satelitales para identificar ciertos objetos, esta técnica no es muy precisa ya que solo se basa en una interpretación visual.

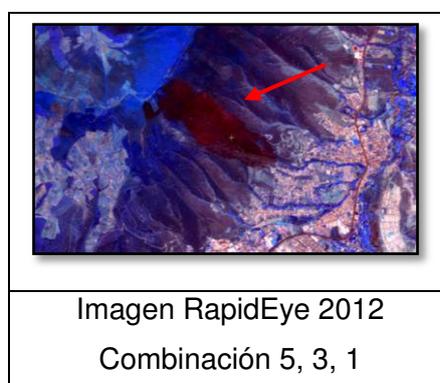


Figura. 3.7. Combinación de bandas

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Índices Espectrales

Se utilizaron los índices espectrales para identificar la pérdida y el daño a la vegetación ocasionados por el fuego.

Se utilizan 3 índices espectrales NVDI, BAI y NBR, que permiten discriminar de mejor manera zonas quemadas.

NVDI (Normalized Differenced Vegetation Index o Índice Normalizado de Variación de la Vegetación): Permite identificar y estimar el estado de salud de la vegetación.

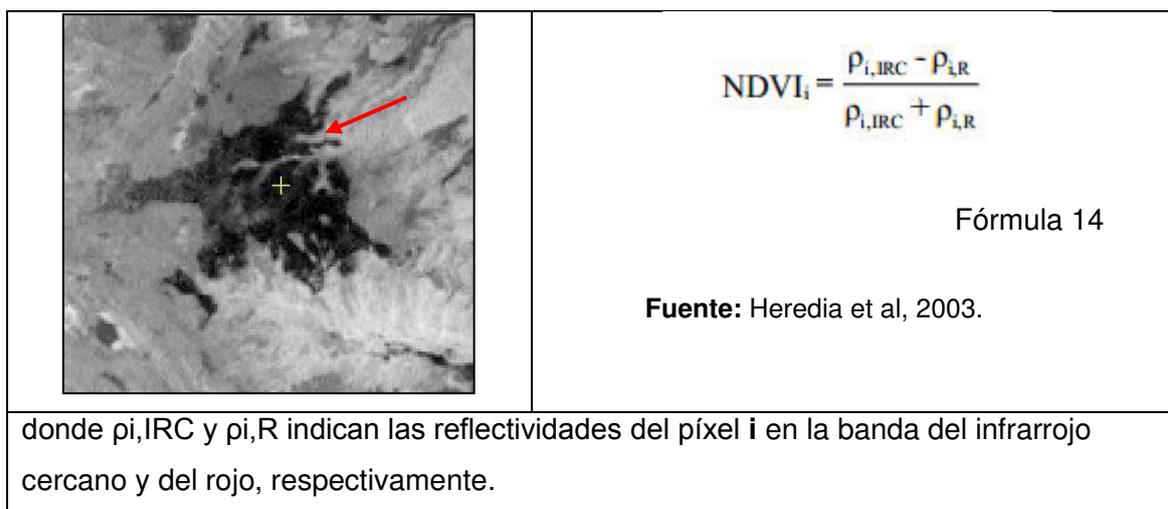


Figura. 3.8. Índice Normalizado de Variación de la Vegetación (NDVI)

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

NBR (Normalized Burnt Ratio o Cociente Normalizado de Área Quemada): Se trata de un cociente normalizado tipo NDVI, pero utilizando información del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta (Rogan y Franklin, 2001), este índice no fue aplicado a las imágenes Rapideye, ya que no tienen la banda del infrarrojo de onda corta.

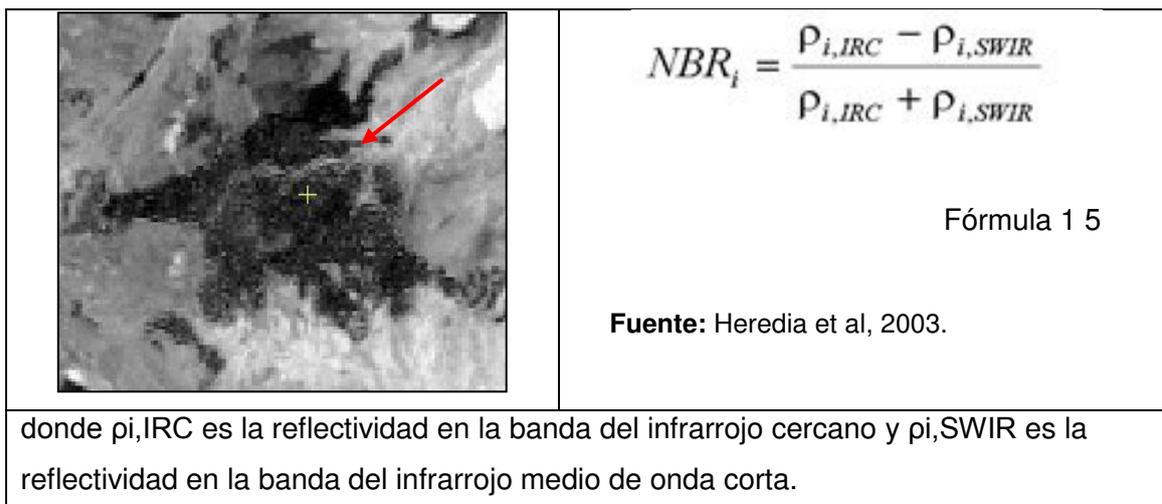


Figura. 3.9. Normalized Burn Ratio (NBR)

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Burn Area Index (BAI) o Índice de Área Quemada (IAQ): Específicamente diseñado para la cartografía de área quemada, basándose en el comportamiento espectral de los materiales carbonizados y de las cenizas, producidos tras un incendio. El IAQ se basa en el concepto de distancia euclidiana de cada píxel de la imagen a un punto de convergencia definido en un espacio bidimensional al que tendería a aproximarse el comportamiento espectral de los píxeles recientemente quemados (Martín, 1998).

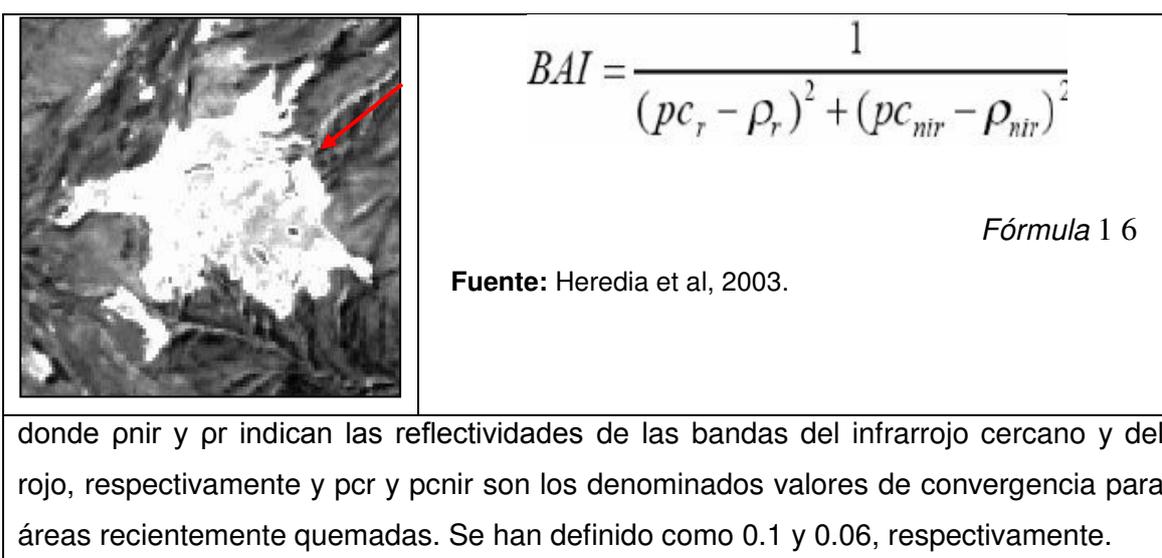


Figura. 3.10. Burn Area Index (BAI)

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

También se aplicó la diferencia de índices en las imágenes que se contaba con dos fechas para el análisis.

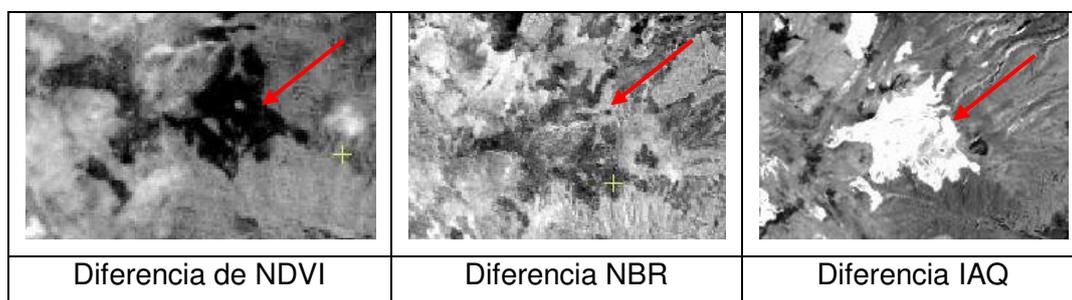


Figura. 3.11. Diferencia de Índices

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Una vez identificadas las áreas quemadas es necesario extraer la información, para lo cual se realizó una clasificación no supervisada.

Se aplica la clasificación no supervisada a la diferencia de IAQ en las imágenes que tienen 2 fechas en el mismo año y a las demás se aplica al IAQ, ya que se puede discriminar visualmente de mejor manera las zonas afectadas por incendios.

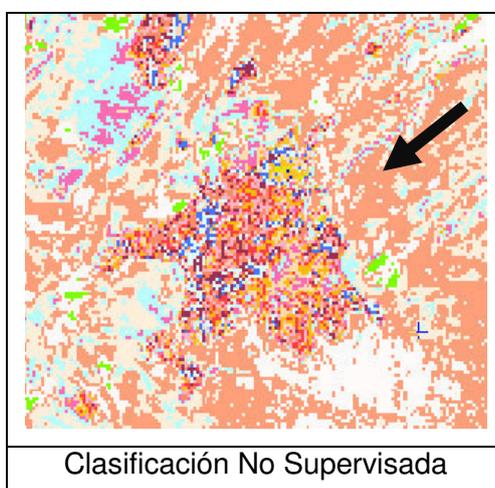


Figura. 3.12. Clasificación No Supervisada

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Visualmente se pueden identificar las zonas quemadas, pero al extraer la información, se observa que el programa extrae además otra información que no corresponde a zonas quemadas, por lo cual se considera digitalizar cada

incendio, considerando el IAQ, la diferencia de IAQ y la clasificación no supervisada, para la respectiva digitalización.

La digitalización se realiza en ArcGIS 9.X.

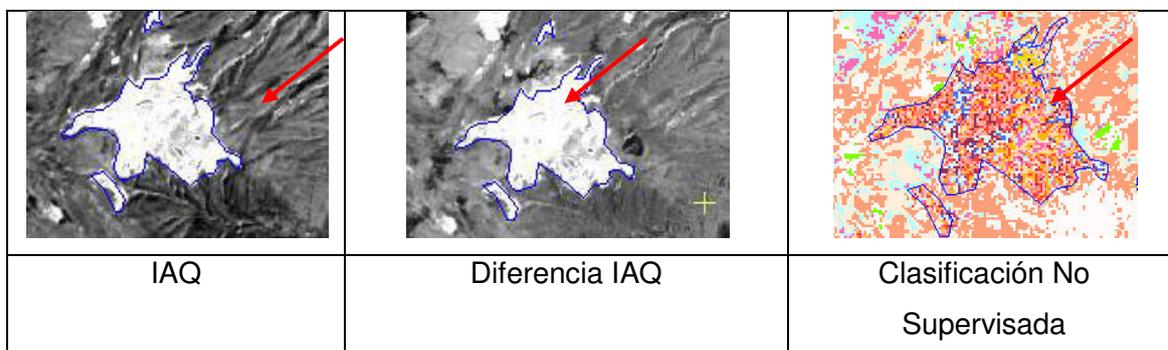


Figura. 3.13. Digitalización áreas quemadas

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

3.2. VARIABLES

Para poder combinar las variables que intervienen en los incendios forestales es necesario, tener en cuenta la ocurrencia de los mismos en la zona de estudio, para poder así realizar el cálculo de ocurrencia mediante la metodología de Lógica Fuzzy, que permite la obtención de modelos que representan el fenómeno estudiado y a través de esto conocer el modelo que se ajuste a la realidad espacial de la zona de estudio.

3.2.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para la implementación del algoritmo de Lógica Fuzzy aplicado al cálculo de probabilidad de ocurrencia en el área de estudio analizada. Se requirió recopilar la información necesaria existente, generar y analizar el producto de ésta, pudiendo así facilitar la organización y actualización de datos en dicha zona.

Tabla 3.2. Recopilación de Información

FUENTE	INFORMACIÓN	FECHA
INAMHI	Datos de Precipitación	1997-2012 (mensual)
INAMHI	Datos de Humedad Relativa	1997-2012 (mensual)
INAMHI	Datos de Temperatura	1997-2012 (mensual)
SECRETARIA DE AMBIENTE	Modelo Digital del terreno	2013
SECRETARIA DE AMBIENTE	Mapa de Cobertura Vegetal	2011
SECRETARIA DE AMBIENTE	Mapa de Índice de Combustibilidad	2011
EPMMOP, EEQ	Vías	2011
EPMMOP, EEQ	Ríos	2011

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

3.2.2. ANÁLISIS DE DATOS Y VARIABLES

Para este análisis se debió tomar en cuenta la intervención de cada variable y su relación con los incendios forestales.

En la determinación de las variables se tomó en cuenta criterios técnicos, zona de estudio y disponibilidad de información; obteniendo así datos que ayuden a analizar de la mejor manera la ocurrencia de los incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito.

El análisis de cada variable, con relación a los incendios forestales permite conocer como cada una de las variables interviene dicho análisis.

Las variables son:

Precipitación

Durante el periodo del año 1997 al 2012, indica las precipitaciones máximas en el área de estudio, factor que influye en la ocurrencia de los incendios forestales, ya que en épocas secas suelen ocurrir dicho fenómeno debido a la ausencia de la misma, la importancia de esta variable que cuanto menos saturada de agua esté la vegetación, la ocurrencia de los incendios forestales podría ser mayor, pudiendo ser un importante detonante provocador de los incendios forestales.

Humedad relativa

Durante el periodo del año 1997 al 2012, indica en qué meses el ambiente se encuentra más húmedo, en donde dicho factor influye en la ocurrencia de los incendios forestales, esto es debido a que en cuanto menos húmedo es el ambiente, pueden existir más incendios forestales en la zona de estudio.

Temperatura

Durante el periodo del año 1997 al 2012, indica las temperaturas máximas en el área de estudio, factor que influye en la ocurrencia de los incendios forestales, ya que cuando existen altas temperaturas, la ocurrencia de los mismos podría provocar más incendios forestales.

Distancia a vías de comunicación

El construcción de vías en esta zona, ha afectado directamente en la ocurrencia de incendios forestales, ya que debido a su presencia, los habitantes se encuentran más cerca para poder iniciar un incendio, es decir que puede existir

una mayor probabilidad de provocar más incendios forestales cuando está cerca de las vías de comunicación.

Distancia a red hídrica

La presencia de la red hídrica es directamente proporcional a la ocurrencia de incendios forestales, ya que a mayor distancia de los ríos, podría provocar más incendios forestales.

Pendiente

Cabe recalcar que esta variable es directamente proporcional al evento ya que puede existir una probabilidad de incendios forestales a mayor pendiente, debido a que dichos incendios ascienden más rápido cuánto mayor es la pendiente.

Vegetación

Para el análisis de esta variable se utilizó el mapa de cobertura vegetal del Distrito Metropolitano de Quito realizado por la Secretaría de Ambiente del Municipio de Quito junto con el mapa de índice de combustibilidad, los mismos que permiten relacionar la influencia del tipo de vegetación del segundo nivel provocando una mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales de acuerdo con el índice de combustibilidad realizado por dicha institución.

3.2.3. INTERPOLACIÓN DE LOS DATOS

La interpolación llevada a cabo por los SIG están basados en variables en cuya resolución intervienen variables escalares.

La interpolación espacial, se puede definir como un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral con valor estimado), conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio (puntos muestrales con valores reales). (Bosque, 1992)

Para la realización de las variables que intervienen en el modelo para el cálculo de probabilidad de ocurrencia, se tomó los puntos de ubicación de las estaciones meteorológicas de la zona de estudio.

Tabla. 3.3. Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio para la variable Precipitación

Estación	X	Y	Altura
LA_VICTORIA	811632.76	10006639.78	2262.00
OLMEDO	828653.77	10016386.48	3120.00
CALACALÍ	776884.05	10000153.66	2810.00
CANAL_10_TV	775769.12	9981776.10	3780.00
CANGAHUA	815346.45	9993667.43	3140.00
IÑAQUITO	780131.51	9981560.42	2789.00
MALCHINGUI	796964.78	10006147.27	2840.00
EL_QUINCHE	800182.60	9988688.76	2605.00
LA_CHORRERA	774376.32	9977688.99	3165.00
LORETO	786461.80	9937886.57	3620.00
LA_TOLA	793125.64	9974612.50	2480.00
IZOBAMBA	772701.78	9959434.98	3058.00
CAYAMBE	818781.73	10005779.39	2840.00
UYUMBICHO	775454.57	9957037.16	2740.00
CALDERÓN	787093.88	9989120.12	2645.00
TOMALÓN	807981.19	10003688.66	2790.00
YARUQUÍ	798851.33	9982326.37	2600.00
SAN_JUAN	763515.74	9968502.57	3440.00
RUMIPAMBA	787643.28	9952699.97	2940.00
NONO	770170.21	9991887.14	2710.00
NANEGALITO	758630.95	10007374.77	1580.00
LA_CONCORDIA	681248.19	9997051.33	379.00
CAYAPAS	726683.74	10094870.63	55.00
QUININDÉ_(ML)	674349.96	10035321.50	115.00
RUMIPAMBA	767684.18	9887159.17	2685.00
COTOPAXI_CLIRSEN	769195.52	9931041.07	3510.00
PILALO	723122.07	9895638.22	2504.00
SAN_JUAN_LA_MAN Á	695231.64	9898663.59	215.00
LAS_PAMPAS	726486.28	9952933.43	1583.00
SIGCHOS	734795.29	9922637.55	2880.00
CUSUBAMBA	755647.84	9881483.33	3175.00
RAMÓN_CAMPA	712967.61	9876536.01	1462.00
PASTOCALLE	764054.99	9920134.49	3074.00
SAQUISILÍ	760057.64	9907660.76	2892.00
COTOPILALO	755983.54	9924409.80	3250.00

Continúa...

Tabla. 3.3. Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio para la variable Precipitación

Estación	X	Y	Altura
PUERTO_ILA	684859.81	9947353.13	319.00
CHIRIBOGA	746874.48	9976709.72	1750.00
SANTA_ANITA	694945.65	9974504.69	560.00
LA_LIBERTAD	708978.38	9941203.06	689.00
REVENTADOR	886766.10	9995042.00	1145.00
PUERTO_LIBRE	891279.10	10022120.00	680.00
LA_BONITA	884848.70	10052450.00	1900.00
LUMBAQUI	908258.90	9998156.00	580.00

Fuente: INAMHI

Tabla. 3.4. Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio para la variable Humedad Relativa

Estación	X	Y	Altura
LA_VICTORIA	811632.76	10006639.78	2262.00
OLMEDO	828653.77	10016386.48	3120.00
IÑAQUITO	780131.51	9981560.42	2789.00
MALCHINGUI	796964.78	10006147.27	2840.00
LA_TOLA	793125.64	9974612.50	2480.00
IZOBAMBA	772701.78	9959434.98	3058.00
TOMALÓN	807981.19	10003688.66	2790.00
LA_CONCORDIA	681248.19	9997051.33	379.00
CAYAPAS	726683.74	10094870.63	55.00
QUININDÉ_(ML)	674349.96	10035321.50	115.00
EL_REFUGIO	769595.81	9927076.66	4020.00
COTOPAXI_CLIRSEN	769195.52	9931041.07	3510.00
PILALO	723122.07	9895638.22	2504.00
EL_CORAZÓN	714141.34	9874599.86	1471.00
SAN_JUAN_LA_MANÁ	695231.64	9898663.59	215.00
COTOPILALO	755983.54	9924409.80	3250.00
RUMIPAMBA	767684.18	9887159.17	2685.00
PUERTO_ILA	684859.81	9947353.13	319.00
LUMBAQUI	908258.90	9998156.00	580.00

Fuente: INAMHI

Tabla. 3.5. Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio para la variable Temperatura

Estación	X	Y	Altura
LA_VICTORIA	811632.76	10006639.78	2262.00
OLMEDO	828653.77	10016386.48	3120.00
IÑAQUITO	780131.51	9981560.42	2789.00
MALCHINGUI	796964.78	10006147.27	2840.00
LA_TOLA	793125.64	9974612.50	2480.00
IZOBAMBA	772701.78	9959434.98	3058.00
TOMALÓN	807981.19	10003688.66	2790.00
LA_CONCORDIA	681248.19	9997051.33	379.00
CAYAPAS	726683.74	10094870.63	55.00
QUININDÉ_(ML)	674349.96	10035321.50	115.00
RUMIPAMBA	767684.18	9887159.17	2685.00
COTOPAXI_CLIRSEN	769195.52	9931041.07	3510.00
PILALO	723122.07	9895638.22	2504.00
EL_CORAZON	714141.34	9874599.86	1471.00
SAN_JUAN_LA_MANÁ	695231.64	9898663.59	215.00
LAS_PAMPAS	726486.28	9952933.43	1583.00
COTOPILALO	755983.54	9924409.80	3250.00
PUERTO_ILA	684859.81	9947353.13	319.00
LUMBAQUI	908258.90	9998156.00	580.00

Fuente: INAMHI

INTERPOLACIÓN MEDIANTE LA MEDIA PONDERADA POR LA INVERSA DE LA DISTANCIA (IDW)

El uso de este algoritmo ha sido empleado en la representación de variables con continuidad espacial. (Canto, C. del, 1998)

Es el menos complejo de otros métodos geoestadísticos, pero es el que mejores resultados aporta a la vista de los resultados. Desde el punto de vista metodológico cada valor, que tiene una correspondencia con un punto determinado, influye sobre los demás de forma local y disminuye proporcionalmente su efecto con la distancia. Al ser un método exacto y ajustarse en su localización a los datos, gradúa los cambios bruscos en los valores. (García González, J. A.; Cebrián Abellán, F., 2002)

El IDW asume que los puntos que están más cerca son más parecidos que los

que están más lejos, así para predecir un valor de un lugar no muestral, utilizará valores de los lugares muestrales que haya alrededor del lugar que se va a predecir, es decir que cada punto muestral tiene una influencia en su vecindad que disminuye con la distancia. Este método da más peso a los puntos más cercanos a la celda de la que se trata de obtener el valor que aquellos que están más alejados.

La fórmula de su expresión es la siguiente:

$$Z_{(so)} = \sum_{i=1}^N \lambda * Z_{(si)} \quad \text{Fórmula 1 7}$$

Donde,

$Z_{(so)}$ es el lugar a predecir

λ es el peso asignado a cada punto

$Z_{(si)}$ es el valor observado del lugar

$$\lambda_{(i)} = \frac{d_{io}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{io}^{-p}} \quad \text{Fórmula 1 8}$$

Donde,

$d_{(io)}$ es la distancia entre el lugar de predicción so y cada lugar muestral si

Así, a medida que la distancia es más grande, el peso es reducido por un factor p .

El valor óptimo p , hace mínimo el error de predicción o error cuadrático medio, como el analista geoestadístico utiliza potencias más grandes que 1. Por defecto usa $p=2$ que se conoce como distancia inverso al cuadrado.

También se debe determinar el número de vecinos para calcular el valor predicho, esto depende del tipo de datos y de la superficie a crear. Por defecto establece 15 vecinos y un mínimo de 10.

Si no hay influencias direccionales en los pesos de los datos, coinciden los puntos

igualmente en todas las direcciones, entonces la búsqueda de vecindad es un círculo.

Si hay influencias direccionales, por ejemplo influencia del viento predominante, entonces se adopta la forma de una elipse con el eje mayor paralelo al fenómeno considerado.

Es por ello que, la superficie calculada usando IDW dependerá de la potencia del parámetro p y de la estrategia de búsqueda de vecindad.

Cuando ya se ha seleccionado el método realizando ensayos con las diferentes opciones que ofrece el Arcgis con el fin de precisar el resultado. Se ha aplicado el método para las variables meteorológicas tales como: precipitación, temperatura, humedad relativa usando ecuaciones de segundo grado para el algoritmo, o a su vez realizando ensayos del valor óptimo p para así lograr obtener superficies suaves. Al aumentar el grado del polinomio se va forzando la superficie y las isóneas se vuelven menos suavizadas. Este exponente es el que afecta a la distancia euclidiana entre el valor de la muestra y el punto a calcular (Bosque, 1992). Un valor de exponente más bajo hace que el algoritmo tenga más influencia en puntos lejanos, lo que suaviza el resultado, frente a un exponente grande que pone énfasis en los puntos cercanos. El número de puntos considerados en la interpolación han sido 15 y como mínimo 3; y debido a que no existen influencias direccionales en los pesos de los datos, la búsqueda de vecindad apropiada que se elige en el método del software Arcgis, es con el círculo

En este caso se tomará como ejemplo a la Precipitación de los promedios de cada año en la época seca del tercer trimestre (julio, agosto, septiembre). Se utilizó la herramienta optimize power value para el algoritmo, tomando como círculo a la búsqueda de vecindad, debido a que con el segundo grado del algoritmo la superficie era menos suavizada.

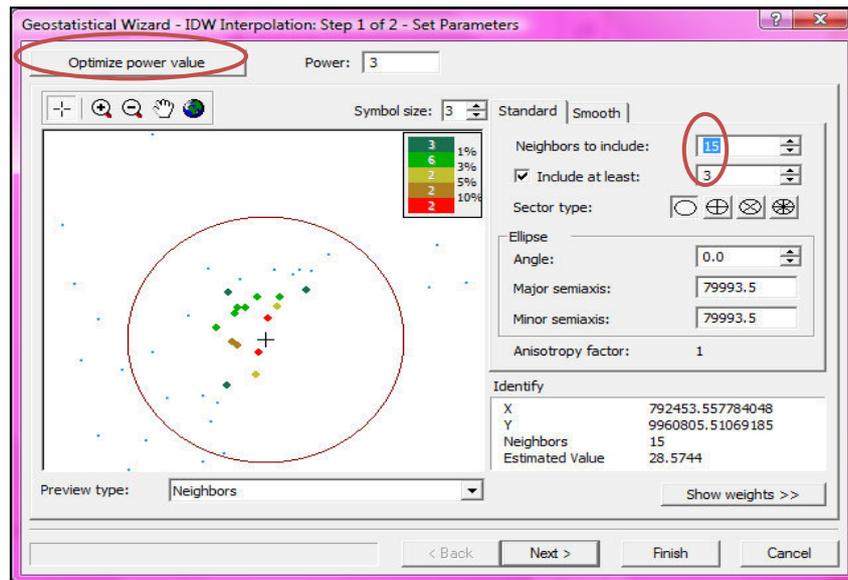


Figura. 3.14. Proceso de IDW

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Posteriormente, la técnica utilizada para evaluar los resultados del análisis estadístico es la Validación Cruzada o Cross Validation, donde la media debe acercarse a cero y el error cuadrático debe ser un valor menor.

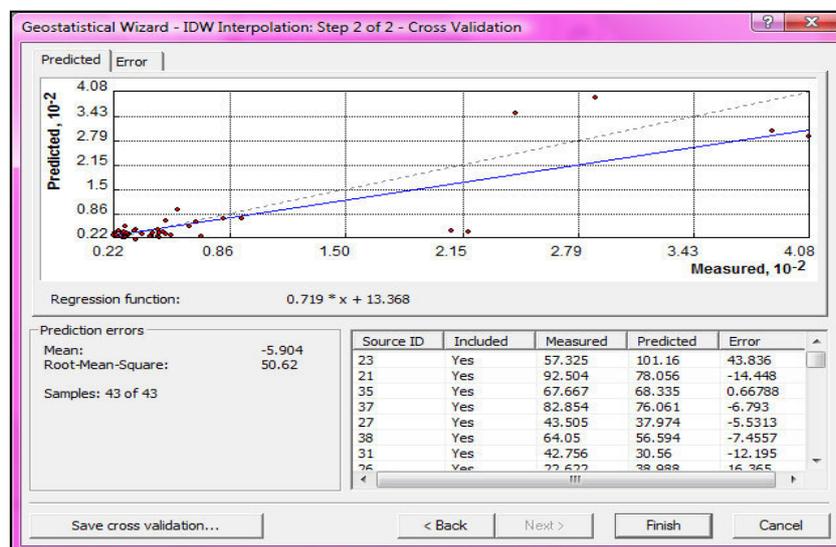


Figura. 3.15. Validación en el IDW

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Finalmente se obtiene una superficie suavizada

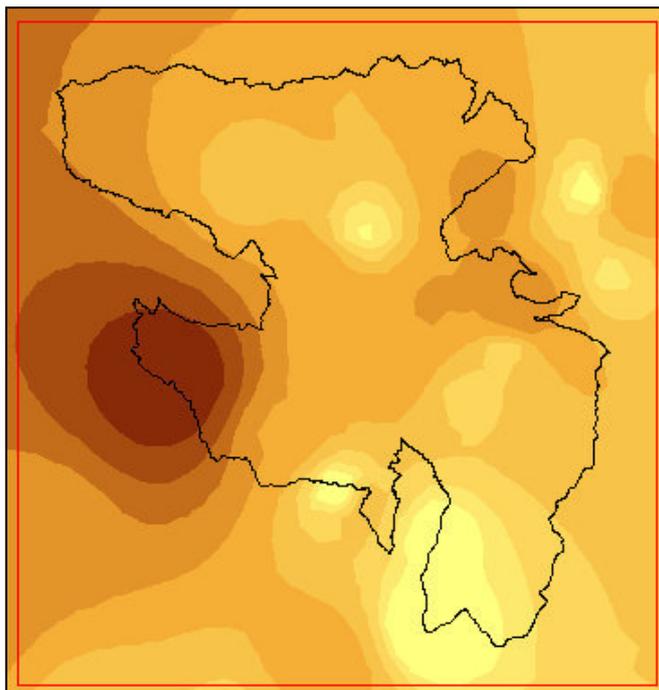


Figura. 3.16. Superficie suavizada con IDW

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

3.2.4. ANÁLISIS DE METODOLOGÍA DE LÓGICA FUZZY

La Lógica Fuzzy es una gama intermedia, o posibles respuestas entre el sí y el no, de forma cualitativa. Es decir, que aplicando la Lógica Fuzzy se aplican valores numéricos probables entre el 0 y el 1, de forma cuantitativa.

Para la Lógica Fuzzy las funciones que se aplican son el Seno y el Coseno ya que, el rango en el que se trabaja es entre 0 y 1.

Tomando en cuenta la Lógica Fuzzy, se han establecido 3 casos de esta lógica, en el primer caso, el rango a ser utilizado en el análisis es de [0,1], y no obtener valores negativos, como sería el caso de tomar la curva seno no cuadrática.

En el segundo caso, los casos a encontrar, son aquellos donde la probabilidad de ocurrencia, es inversamente proporcional al evento analizado.

En el tercer caso, los casos a encontrar, son aquellos donde la probabilidad de ocurrencia, es directamente proporcional al evento analizado.

Las variables que intervienen en este proyecto no cumplen los parámetros de ocurrencia del primer caso, por lo que el análisis de este, queda descartado en el análisis para incendios forestales.

Tabla. 3.5. Casos Lógica Fuzzy

CASOS FUZZY	RANGO	FUNCION
<p>Primer Caso</p> <p>Rango de interés de la función Seno</p>	<p>0° a 180° O en radianes 0 a π</p>	<p>Función Seno</p>
<p>Segundo Caso</p> <p>Segundo caso del análisis Fuzzy</p>	<p>0° a 90° O en radianes 0 a $\frac{\pi}{2}$</p>	<p>Función Coseno</p>
<p>Tercer Caso</p> <p>Tercer caso del análisis Fuzzy</p>	<p>0° a 90° O en radianes 0 a $\frac{\pi}{2}$</p>	<p>Función Seno</p>

Fuente: Padilla Oswaldo, 2006.

3.2.5. ANÁLISIS DE VARIABLES SEGÚN CASOS DE LÓGICA FUZZY

Precipitación: en la variable precipitación existe una relación inversamente proporcional, es decir, que la influencia del agua lluvia en el terreno, provoca menor ocurrencia de incendios forestales.

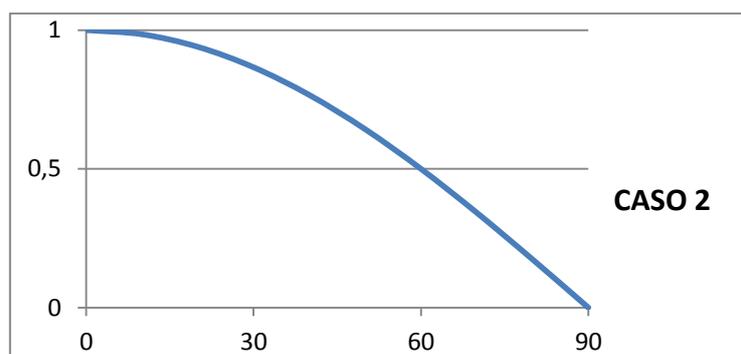


Figura. 3.17. Caso 2. Lógica Fuzzy. Precipitación.

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Humedad relativa: en la variable humedad relativa existe una relación inversamente proporcional, es decir, que la influencia de la humedad en el ambiente, provoca menor ocurrencia de incendios forestales.

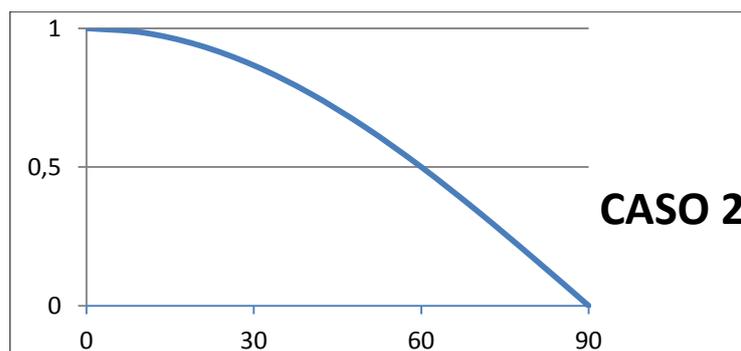


Figura. 3.18. Caso 2. Lógica Fuzzy. Humedad relativa.

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Temperatura: en la variable temperatura existe una relación directamente proporcional, es decir que mientras a mayor temperatura exista en el medio, mayor será la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

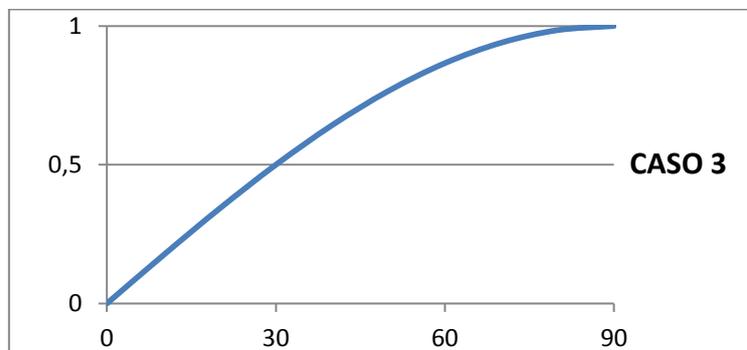


Figura. 3.19. Caso 3. Lógica Fuzzy. Temperatura.

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Distancia a Vías de Comunicación: En dicha variable existe una relación inversamente proporcional, es decir que mientras mayor sea la distancia de una vía, los habitantes se encuentran lejos para poder iniciar un incendio, lo cual tiende a provocar menos incendios forestales.

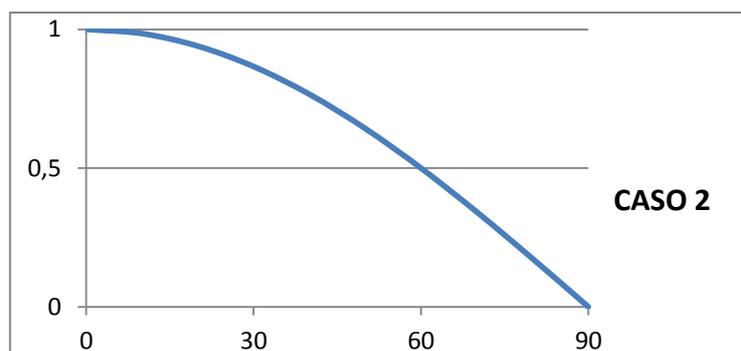


Figura. 3.20. Caso 2. Lógica Fuzzy. Distancia a Vías de comunicación

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Distancia a Red Hídrica: Con dicha variable existe una relación directamente proporcional, es decir, que mientras más grande es la distancia a los incendios es mayor la probabilidad de ocurrencia de los mismos.

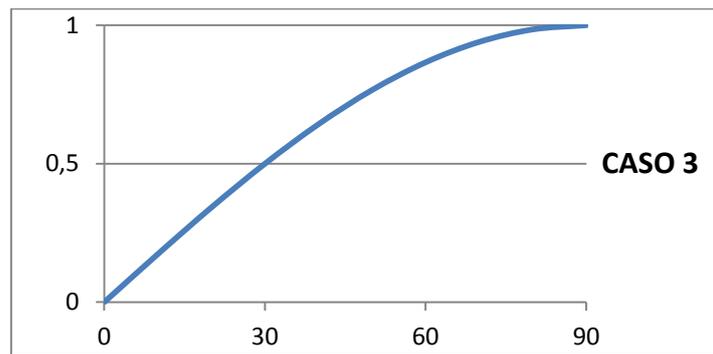


Figura. 3.21. Caso 3. Lógica Fuzzy. Distancia red hídrica.

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Pendiente: en la variable pendiente existe una relación directamente proporcional, es decir que mientras a mayor grado de pendiente exista, mayor será la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

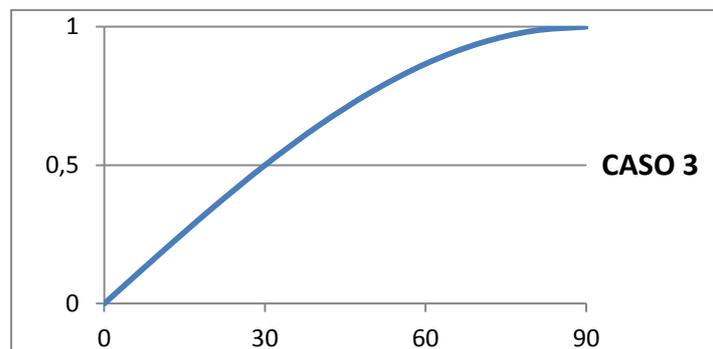


Figura. 3.22. Caso 3. Lógica Fuzzy. Pendiente.

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Combustibilidad de la vegetación: En esta variable existe una relación directamente proporcional, es decir que mientras mayor sea la combustibilidad, existirá mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

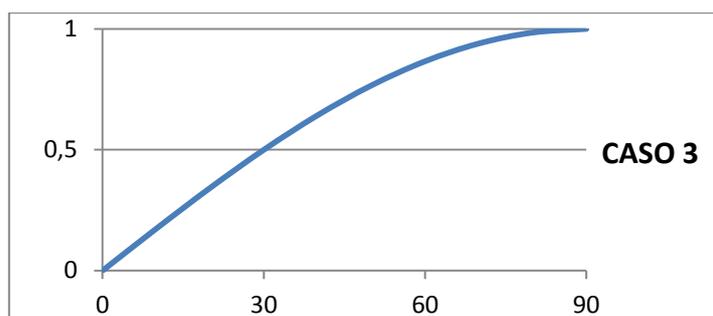


Figura. 3.23. Caso 3. Lógica Fuzzy. Combustibilidad de la Vegetación.

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

A continuación se muestra una tabla, donde se indica la pertenencia de cada variable a cada función de Lógica Fuzzy.

Tabla. 3.6. Pertenencia de la variable a cada función de Lógica Fuzzy

VARIABLE	TIPO DE CASO	RANGO	FUNCION
Precipitación	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno
Humedad Relativa	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno
Temperatura	Caso 3	$0 - \pi/2$	Seno
Distancia de vías de comunicación	Caso 2	$0 - \pi/2$	Coseno
Distancia de red hídrica	Caso 3	$0 - \pi/2$	Seno
Pendiente	Caso 3	$0 - \pi/2$	Seno
Combustibilidad de la Vegetación	Caso 3	$0 - \pi/2$	Seno

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Comportamiento de las variables que intervienen

El comportamiento de las variables independientes en función de la probabilidad de ocurrencia, realizando el análisis Fuzzy, se ha dividido en dos grupos:

El comportamiento del primer grupo es directamente proporcional a su variable dependiente, mientras aumenta el valor de X, aumenta el valor de Y, es decir, que existe la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales mientras el valor de la variable independiente sea superior. Las variables son:

- Combustibilidad de la Vegetación
- Temperatura
- Pendiente
- Distancia a red hídrica

El comportamiento del segundo grupo es inversamente proporcional, disminuye el valor de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, mientras el valor de la variable independiente aumenta, dichas variables son:

- Precipitación
- Humedad relativa
- Distancia a vías de comunicación

Puntos de muestra

Los puntos de muestra se realizaron con imágenes satelitales y análisis multitemporal logrando así encontrar las zonas de recurrencia de incendios forestales en el DMQ.

3.3. METODOLOGÍA DE DESARROLLO EN SIG

Los diferentes modelos creados, se realizaron en un SIG, mediante operaciones algebraicas, y posteriormente su respectivo análisis. Para la obtención de los modelos se utilizó un software de sistemas de información geográfica, en este caso ArcGIS 9.3 y la herramienta RasterCalculator.

3.3.1. Modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales 1

En el modelo 1 se utilizó las variables originales, es decir las variables en formato raster obtenidas a partir de Shapefile y de los procesos posteriores en el software.

De este raster se obtuvo valores de máximo y mínimo (que son valores que el programa genera por default) con lo que se procede a la normalización, que es llevar los valores de la variable original entre 1 y 0, con la siguiente fórmula:

$$N = \frac{V_o}{VM} \quad \text{Fórmula 19}$$

Donde:

N= Normalización

Vo= Variable Original

VM = Valor Máximo

Después de normalizado, se convirtió a radianes cada variable dependiendo del rango al cual pertenece cada una de ellas.

En los casos 2 y 3, el rango es de 0 a $\frac{\pi}{2}$, por lo que para la conversión a radianes se utiliza la siguiente fórmula:

$$R = N \times 1.5707963268 \quad \text{Fórmula 20}$$

Donde:

R = Radianes

Se procede a la obtención de las probabilidades del primer modelo, aplicando la función que pertenece a cada variable, con la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} P &= \sin(R) & (1) \\ P &= \cos(R) & (2) \end{aligned} \quad \text{Fórmula 21}$$

Donde

P = Probabilidad.

Cabe recalcar, que las fórmulas (1) o (2) se utiliza dependiendo de la pertenencia de cada variable a su función (Ver Tabla. 3.6.).

Por último para la obtención del Modelo 1, se procede a extraer el promedio, que es la suma de todas las probabilidades de cada variable dividida para el número total de ellas.

Fórmula 22

$$Y = (\text{combustibilidad vegetal} + \text{d. vías} + \text{d. red hídrica} + \text{pendiente precipitación} + \text{humedad relativa} + \text{temperatura}) / 7$$

Donde:

Y = Promedio de probabilidades Modelo 1.

3.3.2. Modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales 2

Al tener la ubicación del punto, y éste nos está dando el valor de la probabilidad, en este modelo 2 ya no se asume dicha ubicación, por el contrario se aplica el diez percentil (10%), analizando para cada variable, su correspondencia.

Los valores más cercano y el más lejano, son:

$$\text{Valor más cercano} = 0.1 \text{ y Valor más lejano} = 0.9$$

El resultado de la aplicación de estos dos valores, en la ecuación de la recta; que sirve para linealizar la dispersión de los incendios forestales; es llevar los valores de los raster de cada variable a valores semejantes entre 0 y 1. La aplicación de la ecuación de la recta es la obtención de la normalización en este modelo.

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{(x_2 - x_1)} (x - x_1) \quad \text{Fórmula 23}$$

Las fórmulas para los dos casos de Lógica Fuzzy empleados en este proyecto y aplicadas en la ecuación de la recta son:

Para el Segundo Caso:

P1 (Vm; 0.9)

P2 (VM; 0.1)

$$y = 0.9 + \left(\frac{0.8}{VM - Vm}\right) \times (Vo - Vm) \quad \text{Fórmula 24}$$

Y para el Tercer Caso:

P1 (Vm; 0.1)

P2 (VM; 0.9)

$$y = 0.1 + \left(\frac{0.8}{VM - Vm}\right) \times (Vo - Vm) \quad \text{Fórmula 25}$$

Donde:

y = Variable Normalizada

Vo = Variable original

VM = Valor Máximo

Vm = Valor Mínimo

Las ecuaciones de las fórmulas (24) y (25), son utilizadas para la normalización, es decir llevar las variables a valores entre 0 y 1.

El proceso es similar al modelo anterior, la conversión a radianes y la obtención de probabilidades.

Por último para la obtención del Modelo 2, se procede a extraer el promedio, que es la suma de todas las probabilidades de cada variable dividida para el número total de ellas.

Fórmula 26

$$Y = (\text{combustibilidad vegetal} + \text{d. vías} + \text{d. red hídrica} + \text{pendiente precipitación} + \text{humedad relativa} + \text{temperatura}) / 7$$

Donde:

Y = Promedio de probabilidades Modelo 2.

3.3.3. Modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales 3

Al tener la ubicación del punto, y éste nos está dando el valor de la probabilidad, en este modelo 3 ya no se asume dicha ubicación, por el contrario se aplica el 5 percentil (5%), analizando para cada variable, su correspondencia.

Los valores más cercano y el más lejano, son:

Valor más cercano = 0.05 y Valor más lejano = 0.95

El resultado de la aplicación de estos dos valores, en la ecuación de la recta; que sirve para linealizar la dispersión de los incendios forestales; es llevar los valores de los raster de cada variable a valores semejantes entre 0 y 1. La aplicación de la ecuación de la recta es la obtención de la normalización en este modelo.

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{(x_2 - x_1)} (x - x_1) \quad \text{Fórmula 27}$$

Las fórmulas para los dos casos de Lógica Fuzzy empleados en este proyecto y aplicadas en la ecuación de la recta son:

Para el Segundo Caso:

P1 (Vm; 0.95)

P2 (VM; 0.05)

$$y = 0.95 - \left(\frac{0.9}{VM - Vm}\right) \times (Vo - Vm) \quad \text{Fórmula 28}$$

Y para el Tercer Caso:

P1 (Vm; 0.05)

P2 (VM; 0.95)

$$y = 0.05 + \left(\frac{0.9}{VM - Vm}\right) \times (Vo - Vm) \quad \text{Fórmula 29}$$

Donde:

y = Variable normalizada

Vo = Variable original

VM = Valor Máximo

Vm = Valor Mínimo

Las ecuaciones de las fórmulas (28) y (29), son utilizadas para la normalización, es decir llevar las variables a valores entre 0 y 1.

El proceso es similar a los dos modelos anteriores, la conversión a radianes y la obtención de probabilidades.

Por último para la obtención del Modelo 3, se procede a extraer el promedio, que es la suma de todas las probabilidades de cada variable dividida para el número total de ellas.

Fórmula 30

$$Y = (\text{combustibilidad vegetal} + \text{d. vías} + \text{d. red hídrica} + \text{pendiente precipitación} + \text{humedad relativa} + \text{temperatura}) / 7$$

Donde:

Y = Promedio de probabilidades Modelo 3.

3.4. CÁLCULO DEL AJUSTE DE LOS MODELOS

Se realizó el cálculo del ajuste de los modelos en base a la desviación estándar, que es un conjunto de datos o una medida de dispersión, que nos indica cuanto pueden alejarse los valores respecto al promedio (media), por lo tanto es útil para buscar la probabilidad de que un evento ocurra. El ajuste realizado en los procesos SIG, se basan en la siguiente fórmula:

$$N = \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor Calculado}}{\text{O}} \\ N = 1 - Y$$

Fórmula 31

Donde:

N = ajuste

Valor medido = 1 o valor de los puntos de muestra

Valor calculado = cálculo de la desviación estándar de los promedios de probabilidades (Y) de los diferentes modelos.

Es así que de acuerdo a este cálculo del ajuste, todos los modelos muestran a su forma, la realidad de ocurrencia de incendios forestales, ya que al plantear los casos de Lógica Fuzzy, cada modelo muestra que su variabilidad. Esto permite conocer que los diferentes modelos de incendios forestales, muestran semejanza con la realidad, dependiendo de los valores de desviación estándar de cada uno de ellos, se puede saber qué modelo representa de mejor manera la realidad del terreno.

Se obtuvo las siguientes desviaciones estándar de los modelos aplicados:

Tabla. 3.7. Desviaciones estándar de los modelos de la época seca (julio, agosto, septiembre)

MODELOS DE INCENDIOS FORESTALES			
	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
PROMEDIO	0.655628	0.339340	0.521278
DESVIACION ESTANDAR	0.657428	0.347303	0.525172

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

El mejor modelo está definido por el menor valor de acuerdo al ajuste realizado:

Tabla. 3.8. Ajuste de los modelos (julio, agosto, septiembre)

MODELOS PREDICTIVOS			
	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
AJUSTE	0.342572	0.652697	0.474828

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Tabla. 3.9. Desviaciones estándar de los modelos de la época seca (octubre, noviembre, diciembre)

MODELOS DE INCENDIOS FORESTALES			
	MODELO 4	MODELO 5	MODELO 6
PROMEDIO	0.578865	0.290334	0.300519
DESVIACION ESTANDAR	0.581162	0.299750	0.310408

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

El mejor modelo está definido por el menor valor de acuerdo al ajuste realizado:

Tabla 3.10. Ajuste de los modelos (octubre, noviembre, diciembre)

MODELOS PREDICTIVOS			
	MODELO 4	MODELO 5	MODELO 6
AJUSTE	0.418838	0.700250	0.689592

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

3.5. ANALISIS DE REDES

Para el desarrollo de este objetivo se adquiere la información en formato shapefile de la red vial y estaciones de bomberos del Distrito Metropolitano de Quito, proporcionada por la Secretaría de Ambiente, además de las zonas de recurrencia obtenidas anteriormente en el capítulo 3.1.

Red Vial

Es el principal componente de la red por lo cual inicialmente es necesario verificar que el flujo en la misma sea correcto, mediante el cumplimiento de reglas topológicas, en este caso se verificó y comprobó que la red vial adquirida ya contaba con las respectivas correcciones topológicas, por lo cual, posteriormente se añaden atributos a la red vial de acuerdo al tipo de vía los cuales influyen directamente en la identificación de rutas óptimas y a su vez también en la estimación del área de servicio óptima de cada estación de bomberos.

Se identifican 3 tipos de vía:

Tabla. 3.12. Límite Máxima de Velocidad

Tipo de vía	Límite de velocidad
Autopista	90Km/h
Vía	90Km/h
Calle	50Km/h

Fuente: Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Registro Oficial 731, 2012

De acuerdo al tipo de vía se ingresaron en la tabla de atributos la velocidad y tiempo (minutos).



typ_desc	descriptio	fcode_1	METERS	VELOCIDAD	minutes
CALLE	SISTEMA DE TRANSPORTE O COMUNICACIÓN	AP030	79.16	833.33	0.09
CALLE	SISTEMA DE TRANSPORTE O COMUNICACIÓN	AP030	188.49	833.33	0.23
CALLE	SISTEMA DE TRANSPORTE O COMUNICACIÓN	AP030	206.89	833.33	0.25
VÍA	SISTEMA DE TRANSPORTE O COMUNICACIÓN	AP030	153.74	1500	0.1
CALLE	SISTEMA DE TRANSPORTE O COMUNICACIÓN	AP030	96.13	833.33	0.12
VÍA	SISTEMA DE TRANSPORTE O COMUNICACIÓN	AP030	49.97	1500	0.03

Figura. 3.24. Atributos Red Vial

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Una vez que la red vial se encuentra estructurada correctamente se crea el network dataset que permite gestionar la red y modelar el flujo de transporte por la misma, mediante la extensión Network Analyst de ArcGIS X.

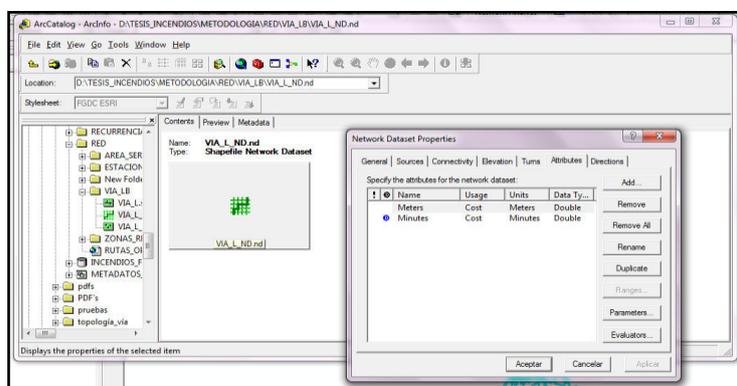


Figura. 3.25. Creación Network Dataset

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Estaciones de Bomberos

Se actualiza la información y ubicación de las estaciones de bomberos dentro del Distrito Metropolitano de Quito.

Tabla 3.13. Estaciones de Bomberos

ESTACIÓN	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	EQUIPAMIENTO	ZONA ADMINISTRATIVA	DIRECCIÓN
1	Coronel Martín Reimberg	Personal: 60 Autobomba: 1 Tanquero: 1 Ambulancia: 1 Unidades de rescate: 2	Administración Zonal 4 Norte Eugenio Espejo	Veintimilla E5-66 y Reina Victoria. (La Mariscal)
2	Coronel Ángel Jarrín	Personal: 21 Autobomba: 1	Administración Zonal 3 Manuela Sáenz	Rocafuerte E1-125 y Montúfar. (La Loma)
3	Comandante Carlos Gálvez	Personal: 27 Autobomba: 1 Tanquero: 1 Ambulancia: 1 Unidades de rescate: 1	Administración Zonal 6 Equinoccio – La Delicia	Pedro Freile y Vaca de Castro. (San Pedro Claver)
4	Cabo Bolívar Canadas	Personal: 25 Tanquero: 2 Unidades de rescate: 1	Administración Zonal 2 Sur Eloy Alfaro	Rother y Juan Cueva García (Ferroviaria Baja)
5	Capitán Vinicio Loaiza	Personal: 18 Autobomba: 1 Tanquero: 1 Ambulancia: 1 Camioneta: 1	Administración Zonal 4 Norte Eugenio Espejo	Isla San Cristóbal N44-94 y Río Coca (Jipijapa)
6	Cabo Pablo Lemus	Personal: 21 Tanquero: 1	Administración Zonal 1 Quitumbe	Lliranan y Pasaje E. (Quitumbe)
7	Suboficial Juan Cruz Hidalgo	Personal: 39 Autobomba: 1 Unidades de Rescate: 1 Camioneta: 1	Administración Zonal 2 Sur Eloy Alfaro	Av. Tnte. Hugo Ortíz y Pedro Capiro (Cdla. Atahualpa)
8	Suboficial José Hidalgo	Personal: 21 Autobomba: 1 Tanquero: 1	Administración Zonal 5. Calderón	Puente Ramal de San Patricio. (Cumbayá)

Continúa...

Tabla 3.13. Estaciones de Bomberos

ESTACIÓN	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	EQUIPAMIENTO	ZONA ADMINISTRATIVA	DIRECCIÓN
9	Cabo Luis Medina	Personal: 18 Autobomba: 1	Administración Zonal 6 Equinoccio – La Delicia	República Dominicana y Francisco Martín. (Parque de Carcelén)
10	Checa	Personal: 15 Autobomba: 1	Administración Zonal 7 Tumbaco	Parque Central de Checa.
11	El Tingo	Personal: 15 Autobomba: 1	Administración Zonal 8 Valle de los Chillos	San Juan de Dios e Ilaló. (El Tingo)
12	Eugenio Espejo	Personal: 18 Autobomba: 1 Tanquero: 1	Administración Zonal 3 Centro Manuela Sáenz	Gertrudis Ávalos y Lorenzo Cepeda Intersección. (El Placer)
13	Parque Metropolitano	Personal: 15 Autobomba: 1 Tanquero: 1	Administración Zonal 4 Norte. Eugenio Espejo	Mariano Calvache y Lorenzo Chávez. (Batán Alto)
14	Comandante Salomón Cevallos	Personal: 24 Autobomba: 1 Tanquero: 1 Ambulancia: 1 Camioneta: 2	Administración Zonal 5. Calderón	Calle Alhambra y Pasaje A (Carapungo-La Morenita)
15	Comandante Jorge Cabrera	Personal: 15 Autobomba: 1 Tanquero: 1 Camioneta: 1	Administración Zonal 6. Equinoccio – La Delicia	Sector Los Shyris junto al Cartódromo (San Antonio de Pichincha)
16	El Rocío de Guamaní	Personal: 15 Autobomba: 1 Tanquero: 1 Camioneta: 1	Administración Zonal 1. Quitumbe	Calle S57 y Calle Oe 7F. (Guamaní)
17	Coronel Manuel Cisneros Cisneros	Personal: 24 Autobomba: 1 Tanquero: 1 Ambulancia: 1 Camioneta: 1	Administración Zonal 4. Eugenio Espejo	Av. Principal de Guayllabamba junto al estadio. (Guayllabamba)

Continúa...

Tabla 3.13. Estaciones de Bomberos

ESTACIÓN	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	EQUIPAMIENTO	ZONA ADMINISTRATIVA	DIRECCIÓN
18	Pifo	Personal: 24 Autobomba: 1 Tanquero: 1 Ambulancia: 1 Camioneta: 1	Administración Zonal 7. Tumbaco	Calle Ignacio Fernández Salvador y vía Pifo-Quinche. (Pifo)
19	Amaguaña	Personal: 24 Autobomba: 1 Tanquero: 1 Ambulancia: 1 Camioneta: 1	Administración Zonal 8. Valle de los Chillos	Pasaje del Colegio Técnico Benjamín Carrión entre el Tejar y Los Pinos. Comuna Turubamaba – El Ejido (Amaguaña)
20	Itchimbía	Personal: 2 Tanquero: 1	Administración Zonal	Calle Julio Endara (Itchimbía)

Fuente: <http://www.bomberosquito.gob.ec/>

3.6. Zonas de Recurrencia

Para el análisis de redes es necesario obtener zonas definidas de concentración de incendios forestales, en este caso se tomaron como ejemplo, debido a que los incendios no ocurren siempre en el mismo lugar, las zonas de mayor recurrencia obtenidas anteriormente en el capítulo 3.1, se aplica la herramienta densidad de kernel de ArcGIS 9.X y se generan 16 zonas de mayor densidad recurrencia de incendios forestales.

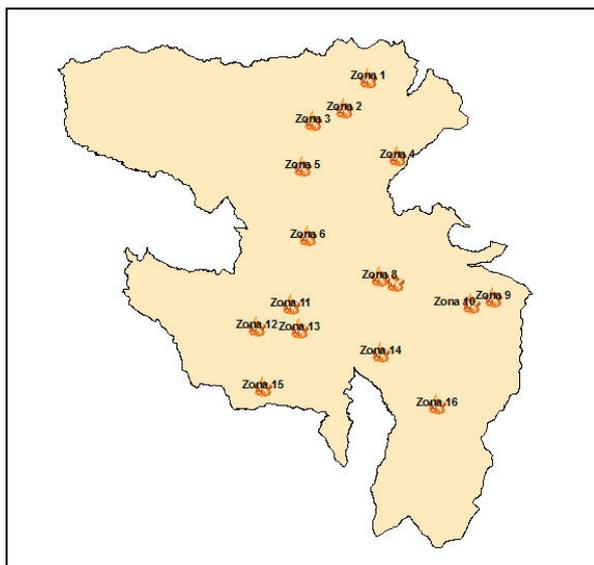


Figura. 3.26. Zonas de mayor densidad de recurrencia de incendios forestales

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Una vez creado el *network dataset*, y estructurada la información necesaria se determina las rutas óptimas entre la estación de bomberos más cercana a las zonas de mayor densidad de recurrencia de incendios forestales mediante la herramienta *closest facility* de *Network Analyst*.

En este caso los servicios (*facilities*) corresponden a las estaciones de bomberos, y los incidentes a las zonas de mayor densidad de ocurrencia. El valor de impedancia será el tiempo en minutos que anteriormente se había calculado para la red de acuerdo a la velocidad y el tipo de vía.

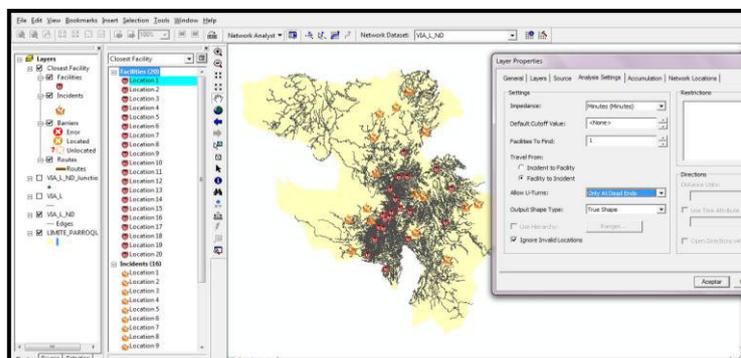


Figura. 3.27. Aplicación de la herramienta *Closest Facility*

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Para encontrar las áreas óptimas de servicio de cada estación de bomberos se aplica la herramienta service area de Network Analyst, incorporando así las calles de la red vial accesibles en un determinado tiempo.

Se realiza en distintos tiempos hasta observar que las estaciones de bomberos existentes cubran un área mayor del Distrito Metropolitano de Quito.

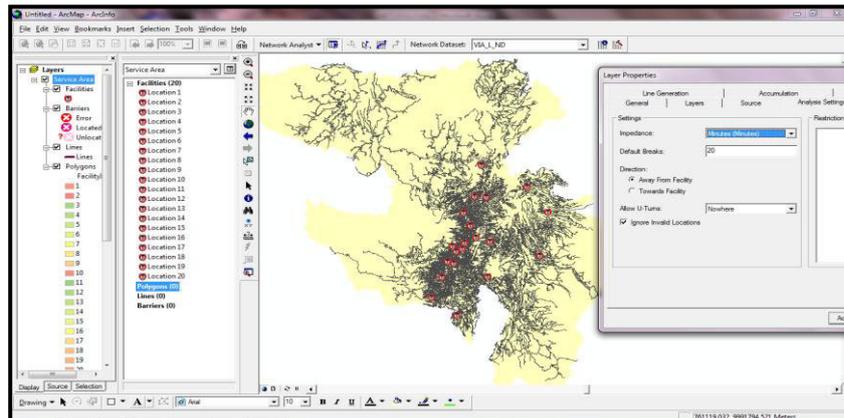


Figura. 3.28. Aplicación de la herramienta Service Area

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

CAPITULO 4

RESULTADOS

4.1 Recurrencia de Incendios Forestales

4.1.1 Combinación de bandas

Para las imágenes Landsat se aplica la combinación 7, 4, 3, del infrarrojo medio, infrarrojo cercano y del rojo respectivamente, que “permite identificar algunas formas de estrés de la vegetación (como áreas quemadas)” (Centurión, V, 2011), identificándose con una tonalidad violeta rojiza las áreas afectadas por incendios. Para las imágenes RapidEye se utiliza la combinación 5, 4, 3, del Infrarrojo cercano, borde del rojo y rojo respectivamente, en las que se puede visualizar las áreas quemadas de un color oscuro.

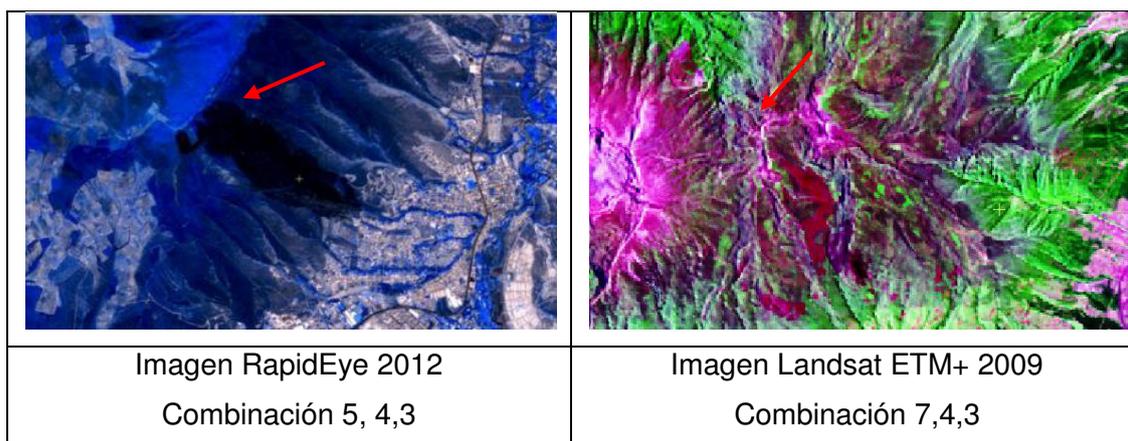


Figura. 4.1. Combinación de bandas

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

4.1.2 Índices Espectrales

Los índices espectrales que se aplicaron permitieron discriminar de mejor forma las áreas afectadas por incendios forestales, el IAQ (Índice de Área Quemada), es el índice que muestra mejores resultados, las zonas quemadas muestran un color blanco bien definido.

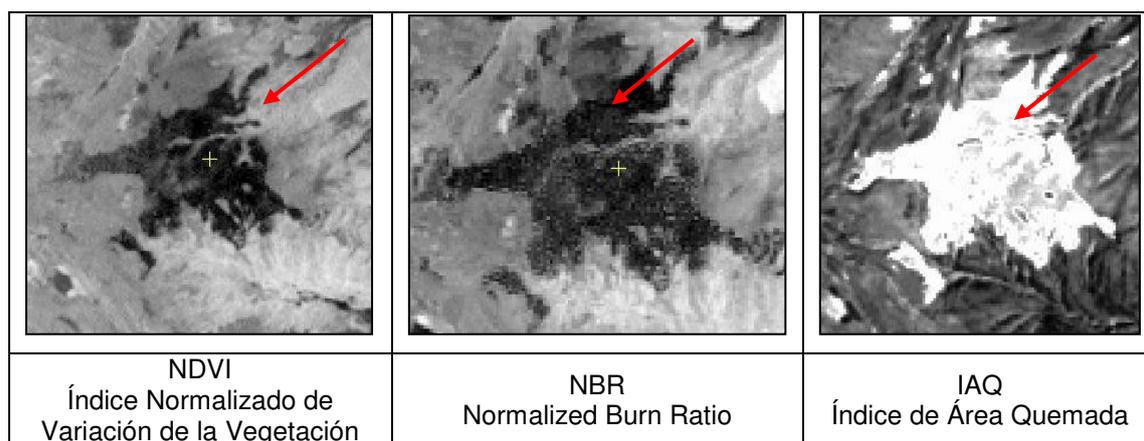


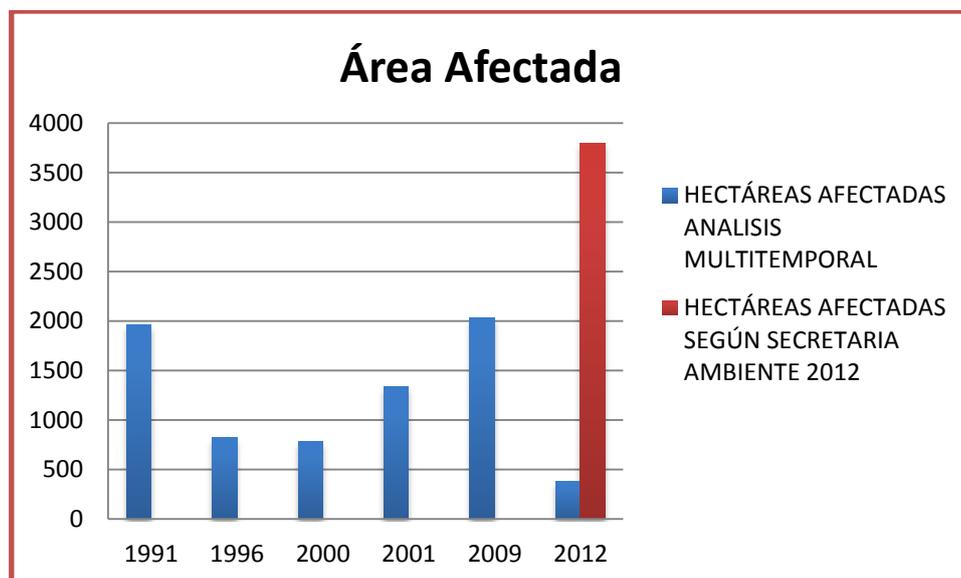
Figura. 4.2. Comparación Índices Espectrales

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

4.1.3 Áreas de Recurrencia a Incendios Forestales

La mayor afectación por incendios forestales se produjo en el año 2009, se registran 2034.23 Ha. afectadas, no se puede obtener un dato cercano a la realidad en el año 2012 debido a que solamente se disponía de 3 imágenes satelitales Rapideye que no cubrían todo el Distrito Metropolitano de Quito, en el gráfico 4.1, se muestra las Ha. afectadas por incendios forestales en los años analizados.

Gráfico 4.1 Hectáreas Afectadas



*2012: Para el año 2012, solo se cuentan con 5 imágenes Rapideye que no cubren todo el DMQ, por lo cual el análisis es limitado.

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

El porcentaje de áreas quemadas no supera el 1% de la superficie total del Distrito Metropolitano de Quito, un porcentaje que puede considerarse bajo, el mismo que posiblemente varía de acuerdo a las condiciones atmosféricas y topográficas de la zona.

Tabla. 4.1. Porcentaje área afectada

AÑO	# (Ha.)	Porcentaje (%)
1991	1961.47	0.47
1996	828.22	0.20
2000	784.02	0.19
2001	1334.05	0.32
2009	2034.23	0.48
*2012	382.16	0.09
2012		
Secretaria Ambiente DMQ	3796	0.9

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Las zonas administrativas La Delicia, Eloy Alfaro y Tumbaco, presentan una mayor recurrencia de incendios forestales. La parte noroccidental de La Delicia y de Eloy Alfaro no se registran datos debido a la espesa capa de nubes de esas zonas.

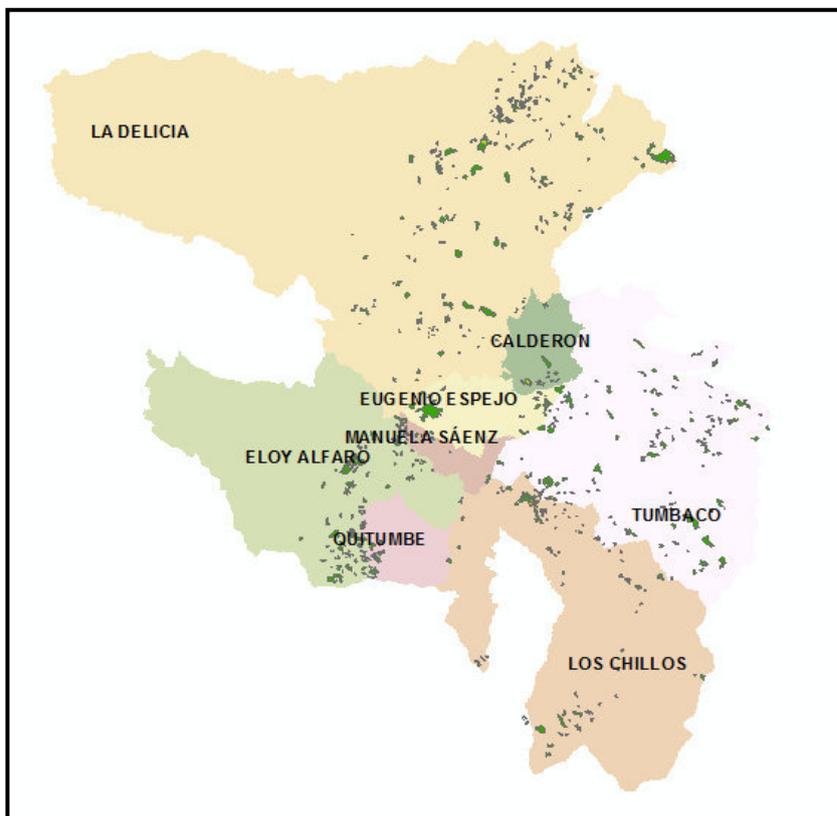


Figura. 4.3. Recurrencia de Incendios Forestales

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

4.2. LOGICA FUZZY

4.2.1. Análisis de modelos obtenidos

En los análisis Fuzzy desarrollados se plantearon varias ecuaciones utilizando herramientas SIG lo que permitió conocer qué modelo se ajusta mejor a la realidad, pero cabe recalcar que en los modelos generados, se evidenciaron pequeñas inconsistencias en ciertas partes del área de estudio debido a la distribución no homogénea de puntos de muestra.

4.2.2 Descripción de los modelos

En los modelos se observa una escala de color determinada, ya que de esta forma se demostró con más claridad qué modelo concuerda con la realidad, es decir la semejanza que existe entre la metodología utilizada.

Cabe aclarar que en los modelos realizados con distintas ecuaciones pero muy semejantes entre ellos, las diferencias son muy escasas. Es decir que, se observa los colores más oscuros en los lugares de alta probabilidad, los mismos que de acuerdo con los puntos de recurrencia de los incendios forestales, concuerdan con la realidad del terreno.

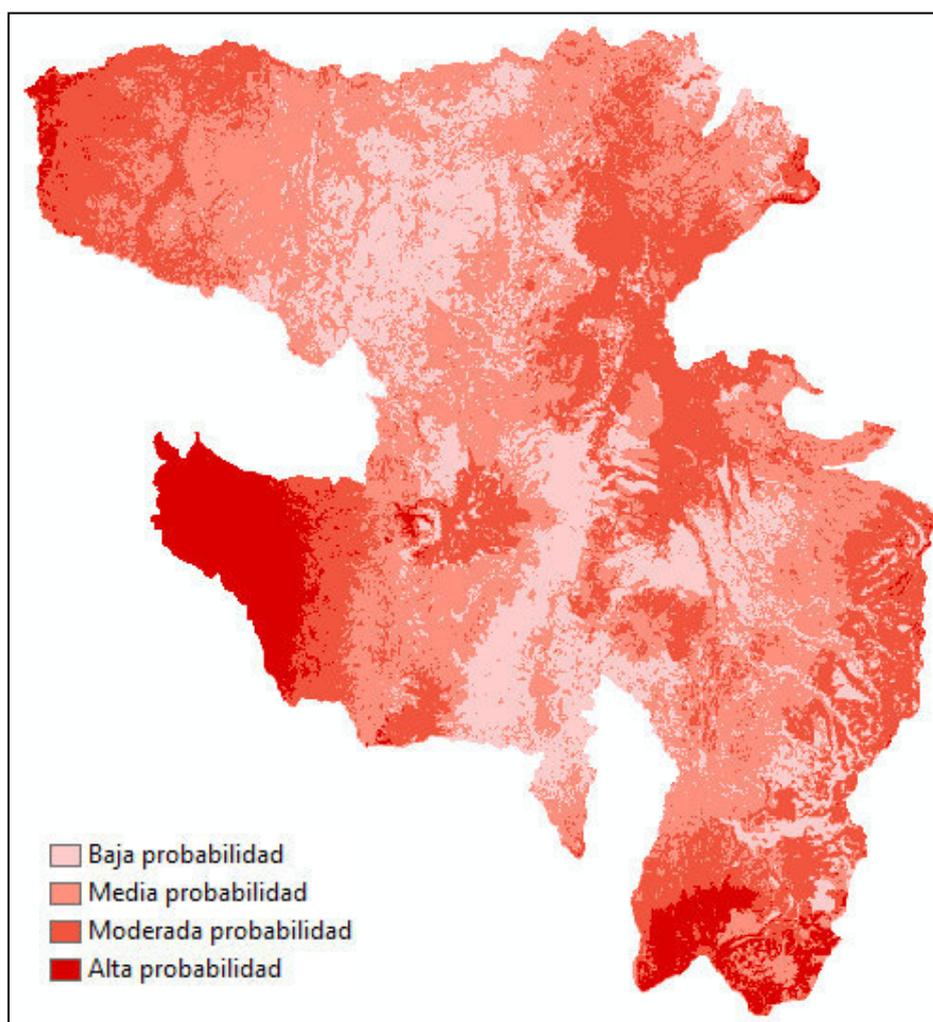


Figura. 4.4. Modelo Óptimo (julio, agosto, septiembre)

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

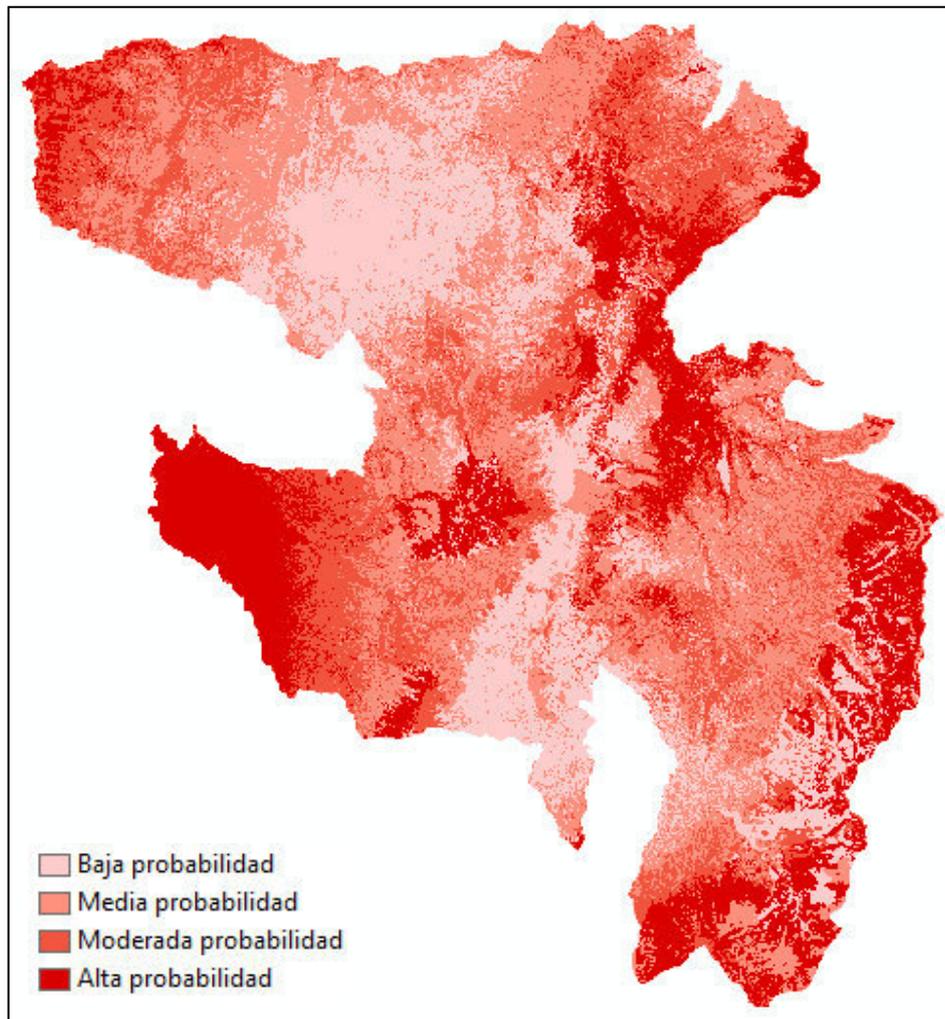


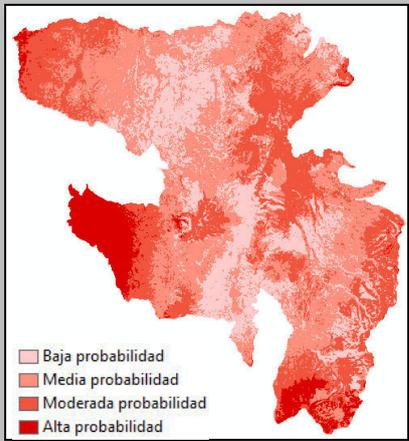
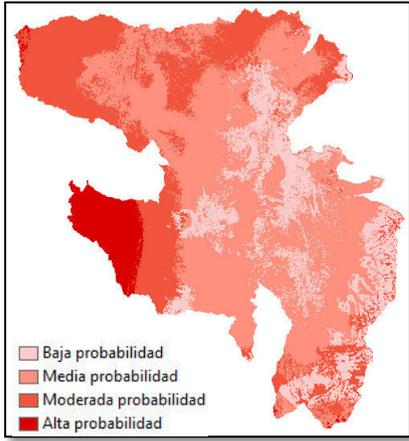
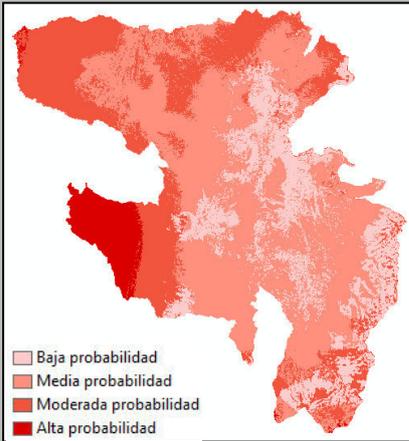
Figura. 4.5. Modelo Óptimo (octubre, noviembre, diciembre)

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

4.3. INFORME DE VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Finalmente para la época seca de julio a septiembre, el mejor modelo es el modelo1 debido a que tiene una desviación estándar cercana a uno y su ajuste fue el menor de los modelos 2 y 3.

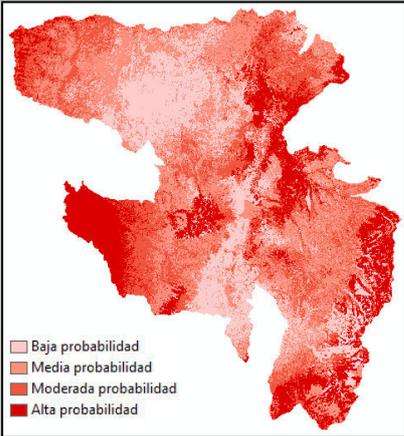
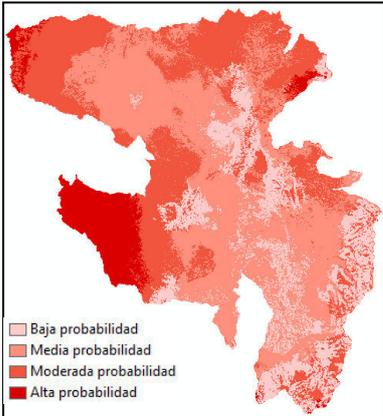
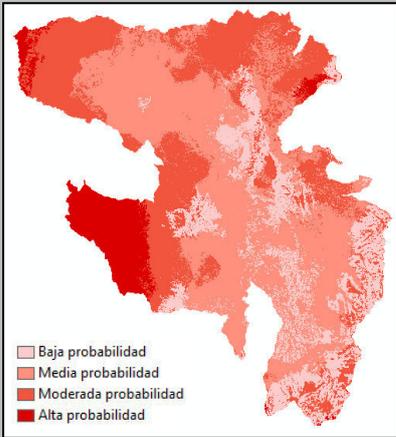
Tabla. 4.2. Validación de los Modelos (época seca julio a septiembre)

MODELO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	AJUSTE
<p>MODELO 1 (FUZZY)</p> 	0.657428	0.342572
<p>MODELO 2 (FUZZY 10 PERCENTIL)</p> 	0.347303	0.652697
<p>MODELO 3 (FUZZY 5 PERCENTIL)</p> 	0.525172	0.474828

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Por otro lado, para la época seca de octubre a diciembre, el mejor modelo es el modelo4 debido a que tiene una desviación estándar cercana a uno y su ajuste fue el menor de los modelos 5 y 6.

Tabla. 4.3. Validación de los Modelos (época seca octubre a diciembre)

MODELO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	AJUSTE
<p>MODELO 4 (FUZZY)</p> 	0.581162	0.418838
<p>MODELO 5 (FUZZY 10 PERCENTIL)</p> 	0.299750	0.700250
<p>MODELO 6 (FUZZY 5 PERCENTIL)</p> 	0.310408	0.689592

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

4.4 Análisis de Redes

La red representa las posibles rutas que se puede seguir de un lugar hacia otro, en el capítulo 3.5 se explica la obtención de las variables que intervienen en el siguiente análisis.

4.4.1 Rutas Óptimas

Se determinan 16 rutas óptimas que los bomberos podrían seguir para llegar con mayor rapidez hacia las zonas de mayor densidad de recurrencia de incendios forestales, el tiempo de asistencia varía desde 5 hasta 40 minutos. Algunas estaciones son incapaces de atender un incendio forestal en las zonas de mayor densidad de recurrencia, y otras son capaces de atender más de un siniestro con mayor rapidez que otras.

La estación Comandante Jorge Cabrera es la única estación capaz de atender los incendios forestales que se podrían producir en la zona administrativa de mayor extensión La Delicia, en un tiempo superior a los 30 minutos.

Tabla. 4.4. Tiempo de respuesta

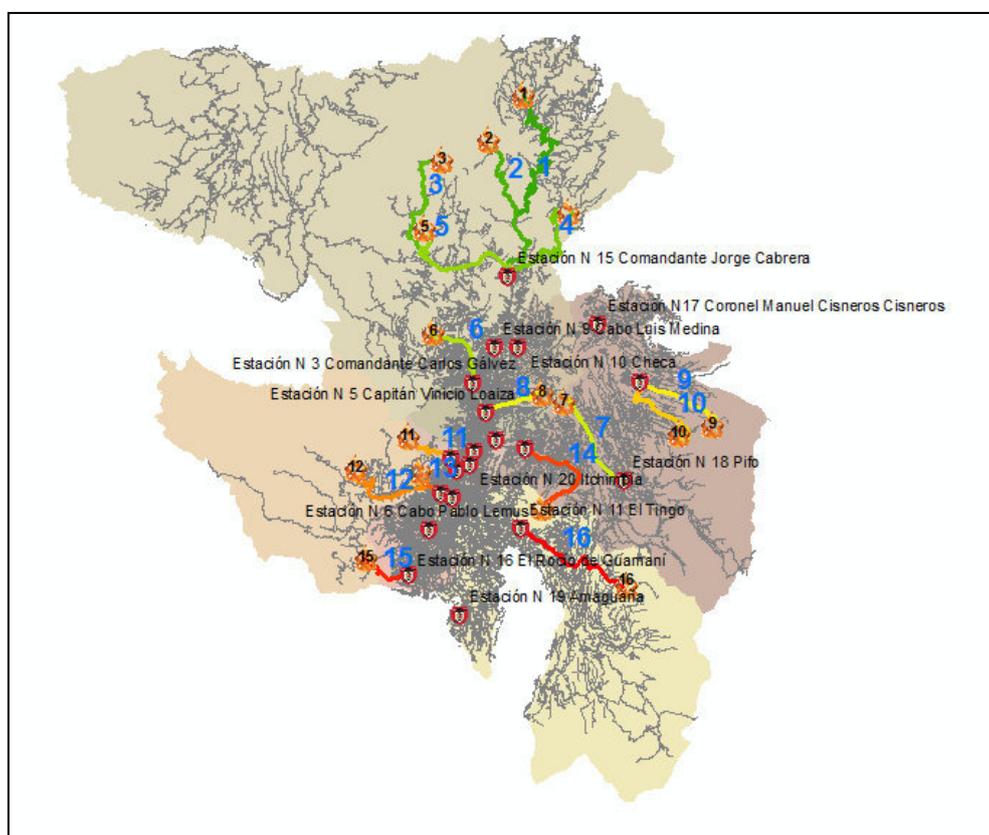
ZONA	ESTACION	ADMINISTRACION ZONAL	TIEMPO (min)
1	Comandante Jorge Cabrera	La Delicia	38.97
2	Comandante Jorge Cabrera	La Delicia	14.04
3	Comandante Jorge Cabrera	La Delicia	24.65
4	Comandante Jorge Cabrera	La Delicia	20.80
5	Comandante Jorge Cabrera	La Delicia	14.85
6	Comandante Carlos Gálvez	La Delicia	11.05
7	Pifo	Tumbaco	9.15
8	Capitán Vinicio Loaiza	Eugenio Espejo	8.26
9	Checa	Tumbaco	8.03
10	Checa	Tumbaco	10.96
11	Eugenio Espejo	Eloy Alfaro	6.01

Continúa...

Tabla. 4.4. Tiempo de respuesta

ZONA	ESTACION	ADMINISTRACION ZONAL	TIEMPO (min)
12	Suboficial Juan Cruz Hidalgo	Eloy Alfaro	14.25
13	Suboficial Juan Cruz Hidalgo	Eloy Alfaro	4.53
14	Suboficial José Hidalgo	Valle de los Chillos	10.32
15	El Rocío de Guamaní	Eloy Alfaro	6.92
16	El Tingo	Valle de los Chillos	14.27

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

**Figura. 4.6. Rutas Óptimas**

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

4.4.2 Áreas de Servicio

Se calcula el área de servicio en distintos tiempos empezando desde los 5 minutos, se observa que a los 30 minutos existe una mayor cobertura de servicio por las estaciones de bomberos.

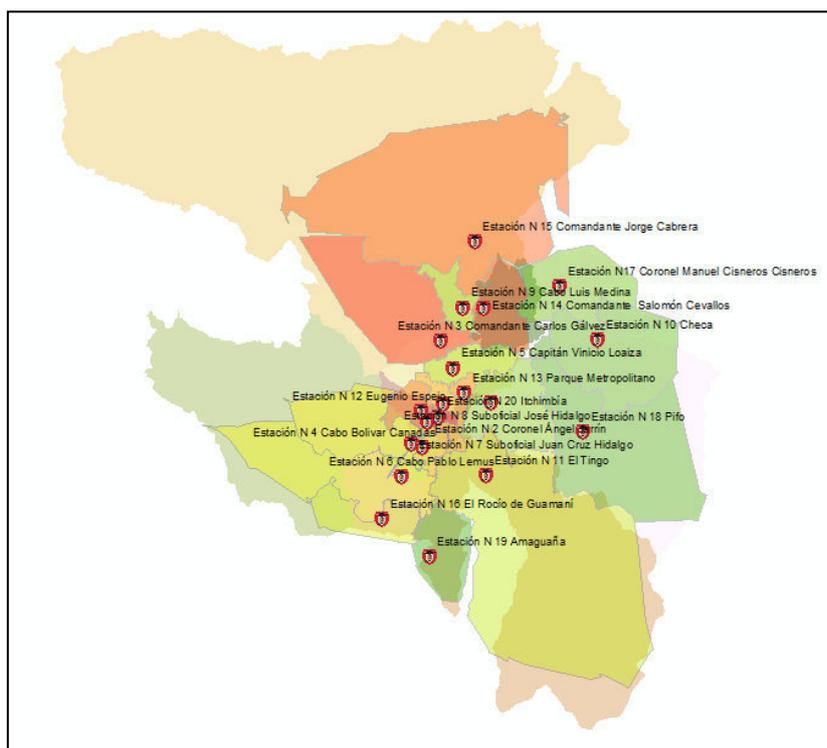


Figura. 4.7. Áreas de servicio en 30 minutos

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Tabla. 4.5. Áreas de servicio en 30 minutos

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	AREA DE SERVICIO Km ²	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	AREA DE SERVICIO Km ²
Coronel Martín Reimberg	16.30	El Tingo	602.59
Coronel Ángel Jarrín	15.45	Eugenio Espejo	25.45
Comandante Carlos Gálvez	189.58	Parque Metropolitano	7.45
Cabo Bolívar Canadas	15.69	Comandante Salomón Cevallos	66.74

Continúa...

Tabla. 4.5. Áreas de servicio en 30 minutos

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	AREA DE SERVICIO Km²	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	AREA DE SERVICIO Km²
Capitán Vinicio Loaiza	42.68	Comandante Jorge Cabrera	547.20
Cabo Pablo Lemus	168.09	El Rocío de Guamaní	57.27
Suboficial Juan Cruz Hidalgo	117.50	Coronel Manuel Cisneros Cisneros	109.84
Suboficial José Hidalgo	102.60	Pifo	289.53
Cabo Luis Medina	31.28	Amaguaña	71.65
Checa	172.58	Itchimbía	5.93

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Posteriormente se analizan 6 estaciones que superan los 150 Km² de área de servicio, y que se encuentran en zonas más cercanas a las áreas de mayor densidad de ocurrencia, se realiza el análisis en tiempos de 30, 40 y 50 minutos, las mismas que cubren una mayor parte del Distrito Metropolitano de Quito.

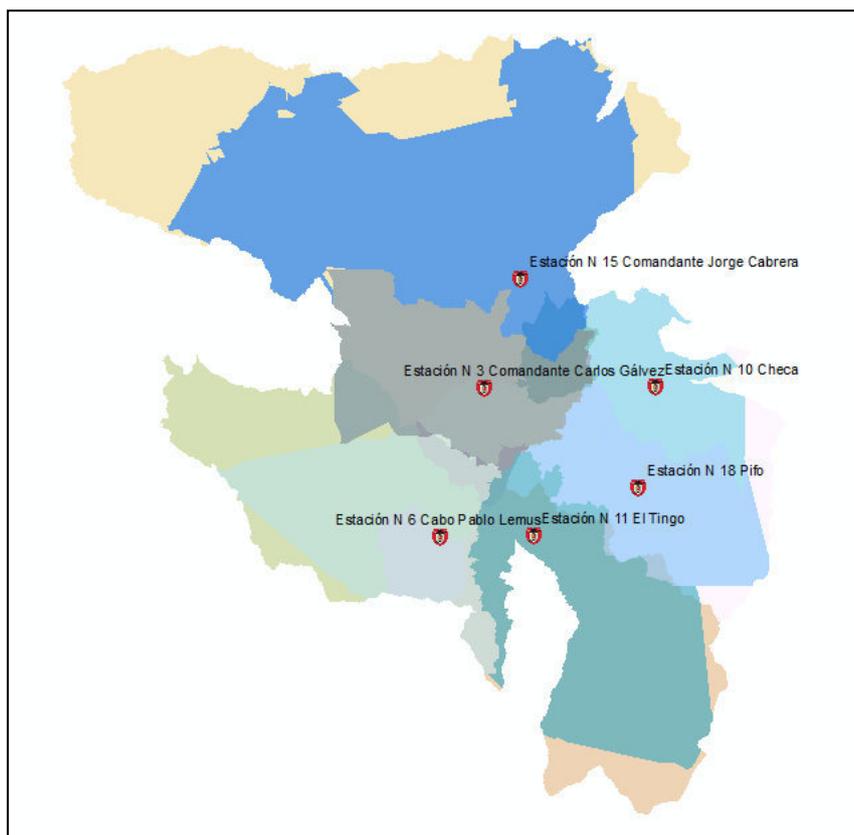


Figura. 4.8. Estaciones de bomberos cercanas a las zonas de mayor densidad de ocurrencia

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

ESTACION COMANDANTE JORGE CABRERA

Tabla. 4.6. Áreas de servicio de la Estación Comandante Jorge Cabrera

TIEMPO	AREA Km²	ADMINISTRACION ZONAL
30	553.6389	Calderón, La Delicia
40	824.6048	Calderón, La Delicia
50	1148.799	Calderón, La Delicia

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

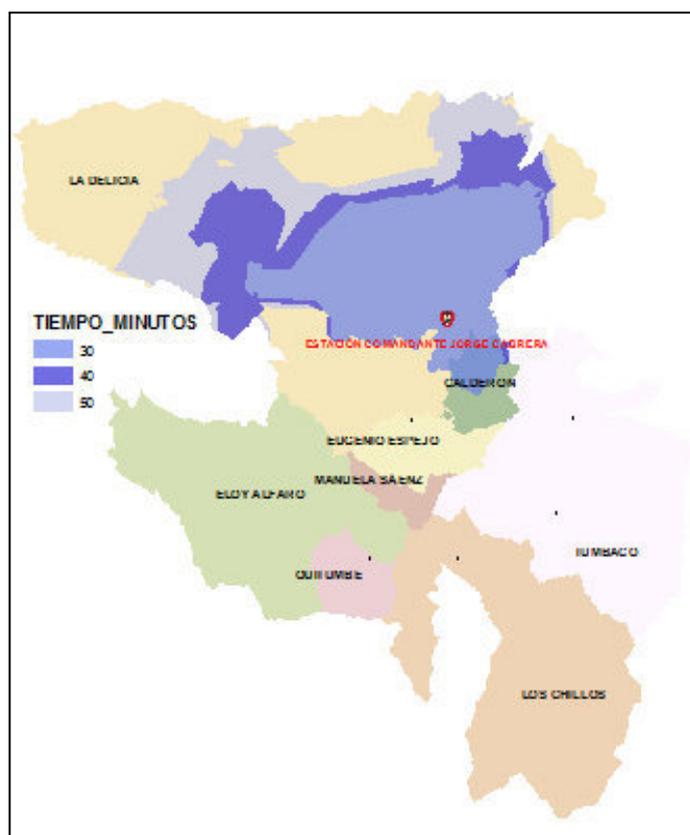


Figura. 4.9. Áreas de servicio de la Estación Comandante Jorge Cabrera

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

ESTACION COMANDANTE CARLOS GÁLVEZ

Tabla. 4.7. Áreas de servicio de la Estación Comandante Carlos Gálvez

TIEMPO	AREA Km ²	ADMINISTRACION ZONAL
30	380.1383	La Delicia, Calderón, Eugenio Espejo, Manuela Sáenz
40	432.1062	La Delicia, Calderón, Eugenio Espejo, Eloy Alfaro, Manuela Sáenz
50	470.8835	La Delicia, Calderón, Eugenio Espejo, Eloy Alfaro, Manuela Sáenz

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

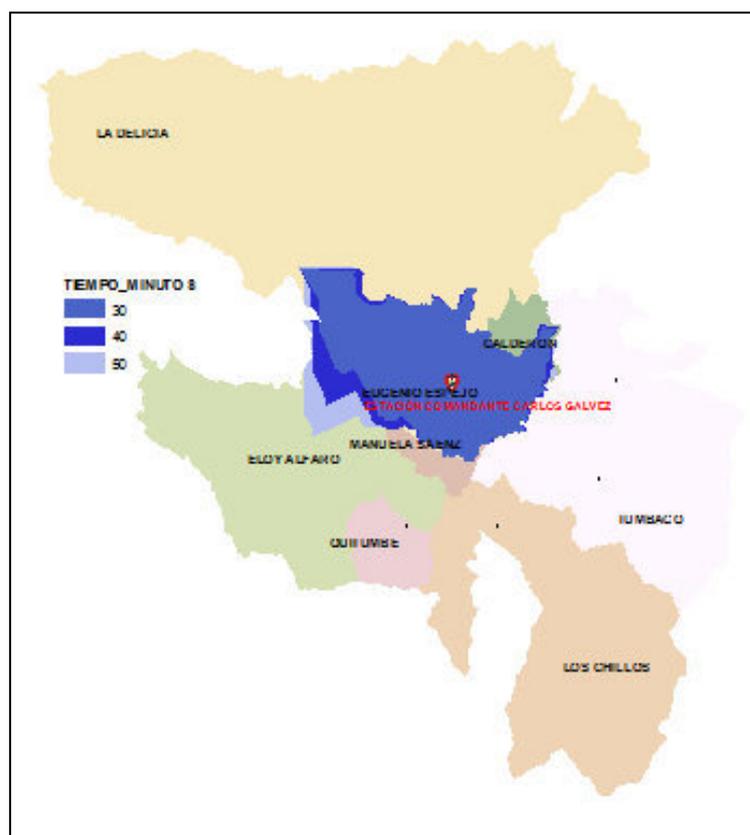


Figura. 4.10. Áreas de servicio de la Estación Comandante Carlos Gálvez

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

ESTACION CABO PABLO LEMUS

Tabla. 4.8. Áreas de servicio de la Estación Cabo Pablo Lemus

TIEMPO	AREA Km ²	ADMINISTRACION ZONAL
30	425.1767	Manuela Sáenz, Eloy Alfaro, Quitumbe, Los Chillos.
40	455.4569	Manuela Sáenz, Eloy Alfaro, Quitumbe, Los Chillos.
50	474.2394	Manuela Sáenz, Eloy Alfaro, Quitumbe, Los Chillos.

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

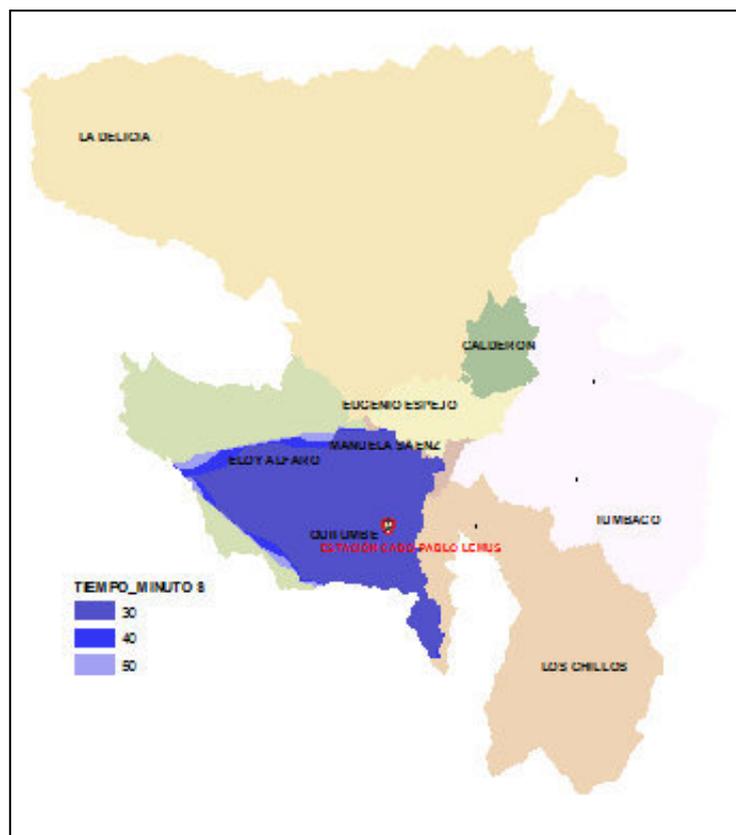


Figura. 4.11. Áreas de servicio de la Estación Cabo Pablo Lemus

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

ESTACION EL TINGO

Tabla. 4.9. Áreas de servicio de la Estación El Tingo

TIEMPO	AREA	ADMINISTRACION
	Km ²	ZONAL
30	521.6834	Los Chillos
40	542.0024	Los Chillos
50	557.0741	Los Chillos

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

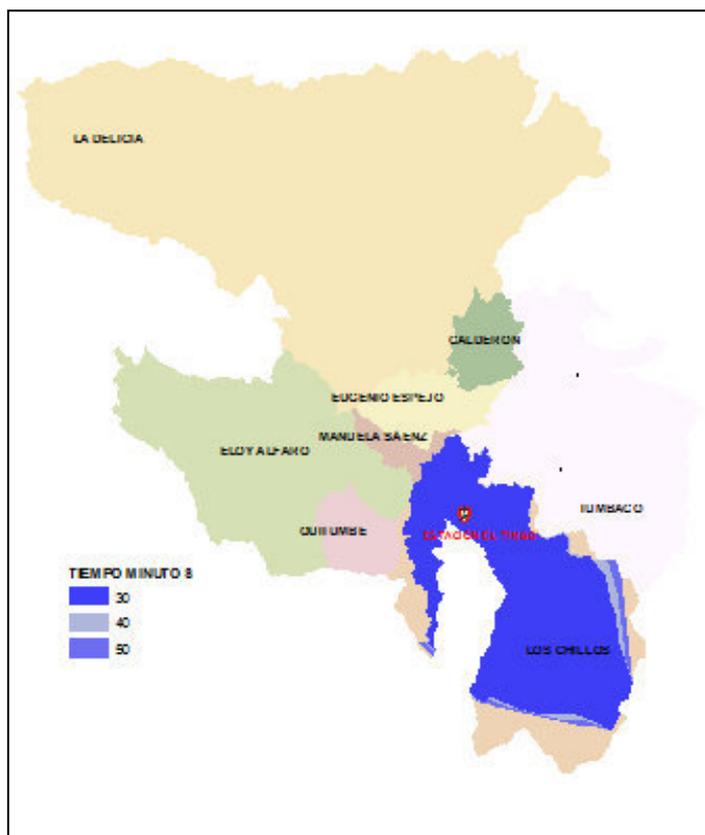


Figura. 4.12. Áreas de servicio de la Estación El Tingo

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

ESTACION PIFO

Tabla. 4.10. Áreas de servicio de la Estación Pifo

TIEMPO	AREA Km ²	ADMINISTRACION ZONAL
30	343.784	Tumbaco
40	351.7649	Tumbaco
50	361.1703	Tumbaco

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

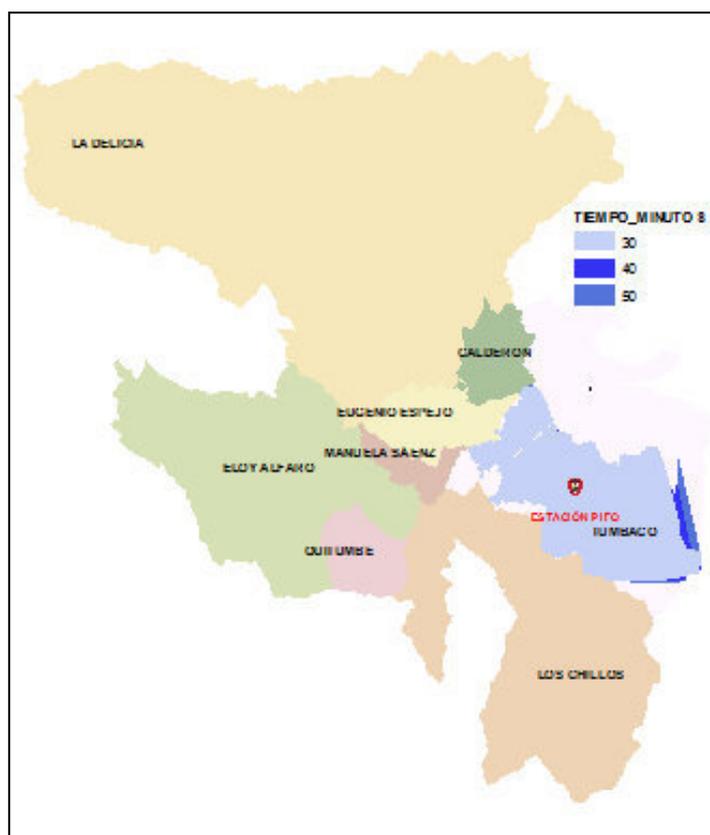


Figura. 4.13. Áreas de servicio de la Estación Pifo

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

ESTACION CHECA

Tabla. 4.11. Áreas de servicio de la Estación Checa

TIEMPO	AREA Km ²	ADMINISTRACION ZONAL
30	231.8171	Tumbaco
40	242.6999	Tumbaco
50	245.4474	Tumbaco

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

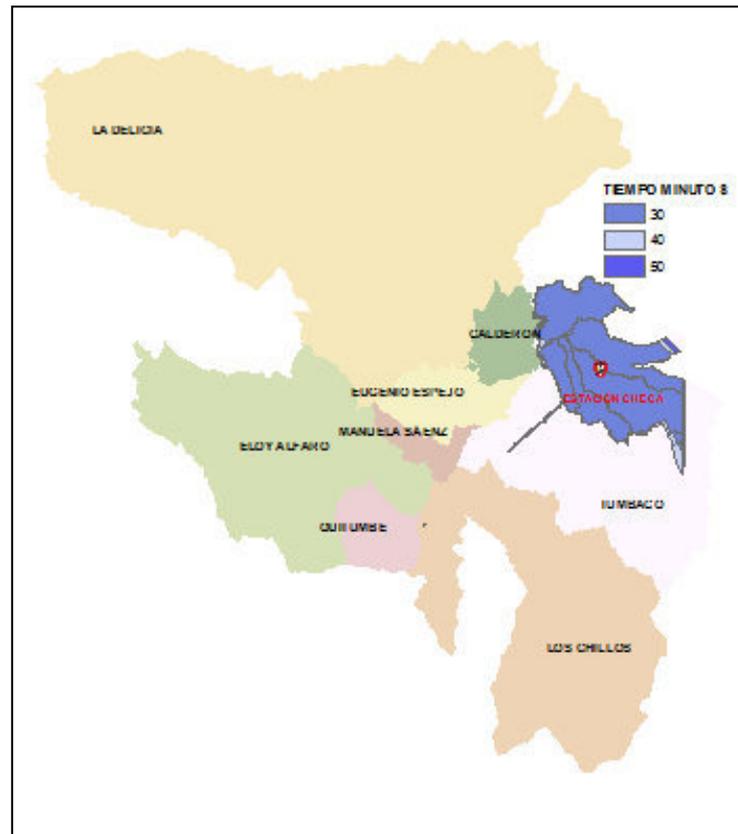


Figura. 4.14. Áreas de servicio de la Estación Checa

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

CAPITULO 5

IMPLEMENTACION

Los resultados obtenidos en el capítulo 4, se implementan al geoportal IDEESPE de la Escuela Politécnica del Ejército, lo que permitirá acceder de manera gratuita, fácil y eficaz a los datos finalmente generados, para lo cual previamente es necesario cumplir los siguientes pasos:

5.1 Generación de metadatos

La norma internacional ISO 19115 rige la creación de metadatos, la misma que define la descripción básica de los datos generados.

Para generar los metadatos existen distintos software tanto libres como propietarios, para cumplir este paso se utilizó el software libre CatMEDedit, el mismo que “es una herramienta de edición de metadatos que facilita la documentación de recursos, con especial énfasis en la descripción de los recursos de información geográfica” (GeoSpatiumLab SL, 2013), el cual se basa en la norma ISO 19115.

Una vez llenado los campos obligatorios y opcionales necesarios de los metadatos se validan y guardan en formato xml, en el anexo. 5.1. se puede observar un ejemplo.

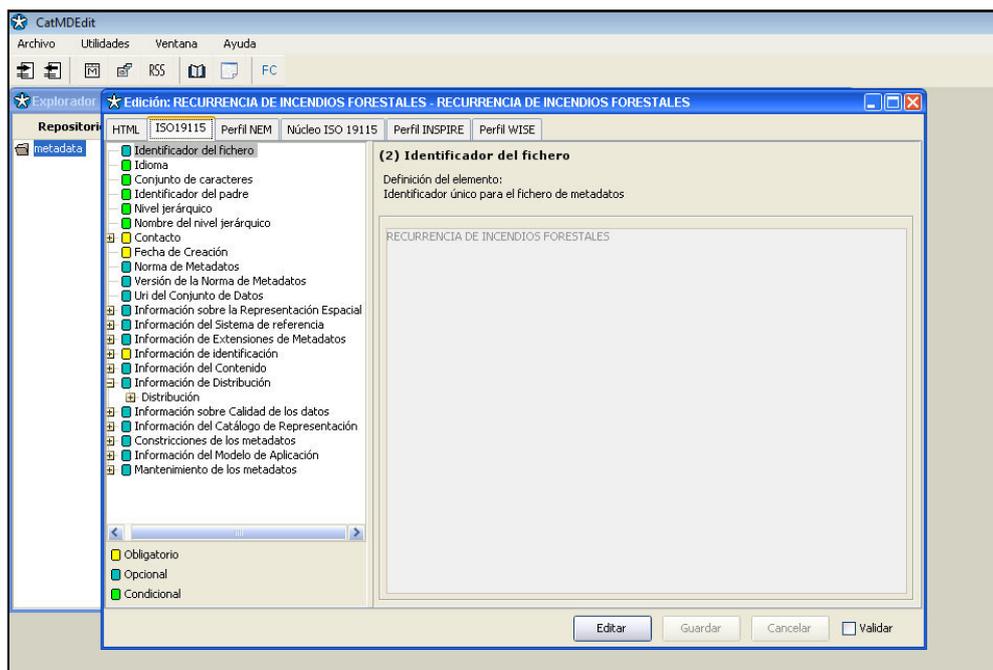


Figura. 5.1. Metadatos
Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

5.2 Generación Base de Datos en PostgreSQL

En este paso se utiliza el gestor libre de base de datos PostgreSQL, el mismo que requiere previamente la conexión al servidor IDEESPE, en el cual se crea la base de datos INCENDIODMQ, que permitirá organizar la información que será visualizada, realizar consultas de búsqueda, y facilitará también posteriores actualizaciones.

En el programa Quantum GIS se suben todos los shp que serán incorporados a la base de datos INCENDIODMQ, mediante el complemento SPIT, el cual permite cargar archivos .shp a una base de datos PostgreSQL.

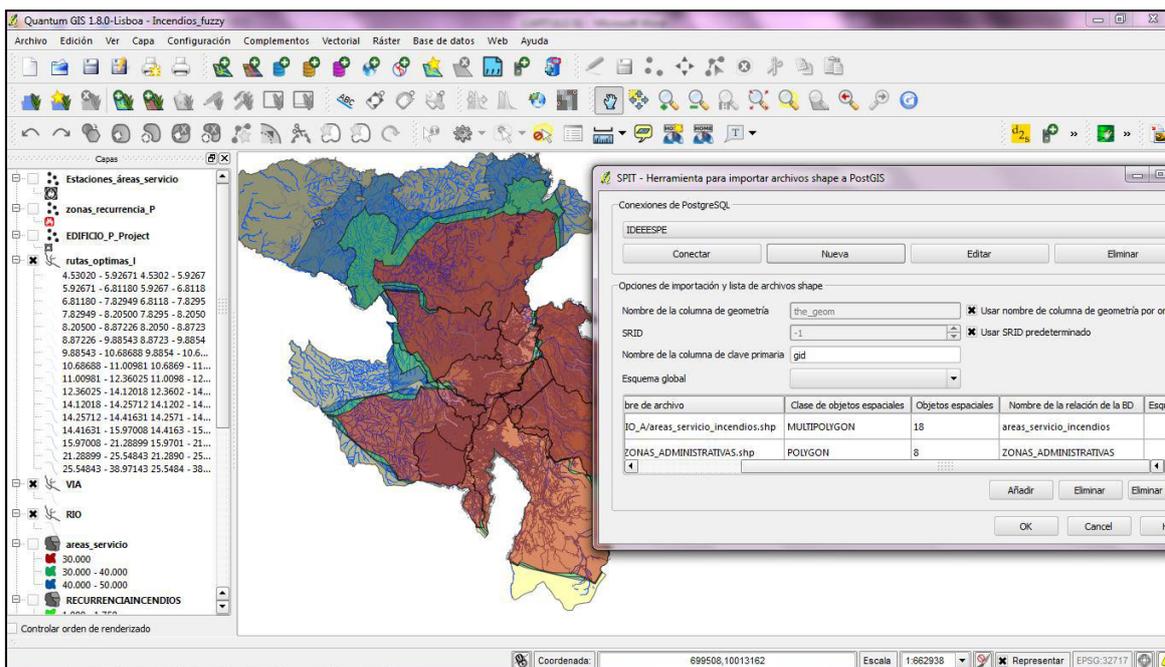


Figura. 5.2. Generación base de datos INCENDIO DMQ e incorporación de la información.shp

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

5.3 Visualización en la IDEESPE

Para poder visualizar la información generada en el Geoportal IDEESPE, son necesarios 4 archivos .map, config, search y layer, donde se configura los parámetros de visualización.

Archivo Mapfile: El archivo .map es el archivo de configuración que utiliza MapServer en “el que se incluye una serie de parámetros que definen: las capas disponibles en el servicio en el mapa interactivo, el estilo con que se mostrarán esas capas, su simbología, el formato en que se generarán las imágenes, el sistema de referencia, tamaño de las imágenes” (Gianfelici, 2013).

Para generar el archivo .map se utiliza el programa Quantum GIS, en el cual se carga la información de la base de datos INCENDIODMQ, mediante el comando añadir capa Postgis, para posteriormente definir los parámetros de orden, tamaño, estilo, color, una vez finalizada la edición se guarda en formato .map mediante el

comando MapServer export. En el anexo 5.2 se observa la estructura del archivo MapFile generado.

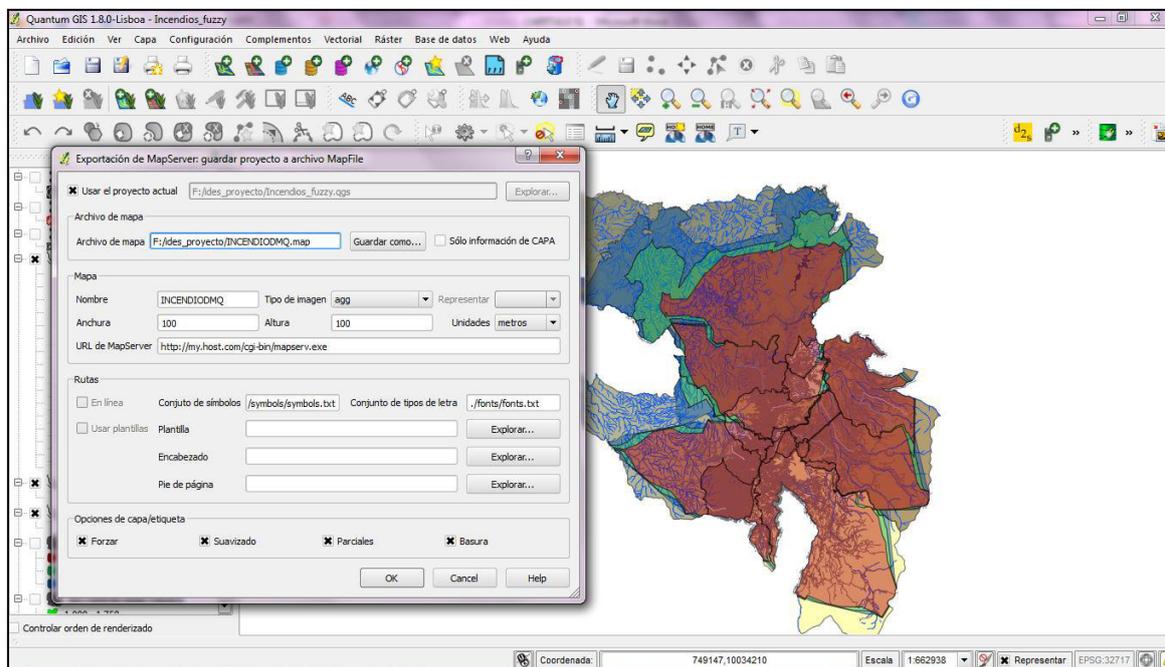


Figura. 5.3 Generación archivo MapFile

Fuente: Columba, M., Quisilema, W., 2013

Archivo config.xml: En este archivo se define principalmente la localización del archivo .map, cuáles son las capas de información que serán agregadas, etc.

Archivo search.xml: En este archivo se definen los parámetros de búsqueda y cuáles pueden ser consultados por el usuario.

Archivo layerinfo.xml: Se estructura el contenido y orden de cada layer.

En los anexos 5.3, 5.4 y 5.5 se puede observar la estructura de estos archivos.

Finalmente en el Visualizador de Mapas del Geoportal de la IDEESPE se puede observar la información generada de esta investigación.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- En el análisis de imágenes satelitales es importante realizar las correcciones geométricas y radiométricas, ya que se necesitan las mismas coordenadas geográficas y también una homogenización relativa de los valores de reflectividad, para trabajar con una misma unidad especialmente cuando se compara imágenes de distintas fechas y sensor.
- Al comparar los índices espectrales post- incendio, el IAQ y la diferencia de IAQ en análisis multitemporal, mostraron mejores resultados al discriminar áreas quemadas.
- Es preciso indicar que fue necesario realizar la digitalización de los incendios, ya que a pesar de que se lograron buenos resultados al identificar áreas quemadas con el IAQ, hubieron áreas que presentaron similares características por lo cual no se pudo extraer solamente las zonas afectadas por incendios forestales al haber aplicado la clasificación no supervisada.
- Las zonas administrativas La Delicia, Eloy Alfaro y Tumbaco, presentan una mayor recurrencia de incendios forestales, los mismos que afectan principalmente a las parroquias rurales de estas zonas.
- El modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales con las variables originales, determina las áreas vulnerables a incendios forestales y su probabilidad de ocurrencia en la zona estudiada. Ya que la zona en

tonos más intensos mostraría la mayor probabilidad y los tonos más leves la baja probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en la zona.

- La variable de índice de combustibilidad de la cobertura vegetal, interviene como un papel importante debido a que se puede observar que de acuerdo al mapa de cobertura vegetal realizado por la Secretaría de Ambiente del DMQ, la más alta probabilidad a incendios forestales se encuentra en los Bosque Secos, Arbustos Secos y Herbazales Secos.
- La metodología Fuzzy es una alternativa eficiente en el modelamiento de incendios forestales en la zona, mostrando resultados confiables.
- La validación de los modelos muestra que cuando se tiene una desviación estándar cercana a su promedio y un ajuste cercano a cero, es allí que se obtiene el óptimo modelo en la aplicación de la Lógica Fuzzy.
- Para la época seca de julio a septiembre, el mejor modelo es el realizado con las variables originales correspondiente al modelo1, debido a que tiene una desviación estándar cercana a uno y su ajuste fue menor que los modelos realizados con el 10 percentil y el 5 percentil. Su desviación estándar fue 0.657428 y su ajuste fue de 0.342572.
- Para la época seca de octubre a diciembre, el mejor modelo es el realizado con las variables originales correspondiente al modelo4, debido a que tiene una desviación estándar cercana a uno y su ajuste fue menor que los modelos realizados con el 10 percentil y el 5 percentil. Su desviación estándar fue 0.581162y su ajuste fue de 0.418838.
- La administración zonal La Delicia, presentó mayor recurrencia de incendios forestales y solamente la estación de bomberos Comandante Jorge Cabrera es capaz de atenderla en este tipo de eventos, siendo el

tiempo mínimo de atención de 14 min. y el máximo de 38 min., tiempos considerados altos en caso de atención para incendios forestales.

- En 30 minutos se logra cubrir la mayor parte del área del Distrito Metropolitano de Quito, especialmente las zonas periféricas en las cuales existe recurrencia de incendios forestales, para lo cual son necesarias 6 estaciones de bomberos Comandante Jorge Cabrera, Comandante Carlos Gálvez, Cabo Pablo Lemus, El Tingo, Pifo y Checa.
- El Distrito Metropolitano de Quito cuenta con 20 estaciones de bomberos distribuidas especialmente en la zona urbana, solamente 6 estaciones son capaces de brindar apoyo en un tiempo de 30 minutos como mínimo a zonas que presentan recurrencia de incendios forestales.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda tomar acciones preventivas en las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales para así poder mitigar los daños que posiblemente sucederán.
- Estudiar las variables en relación a la zona de estudio para establecer pesos a cada una de ellas en función de su mayor o menor influencia dentro de la zona estudiada, para que así coadyuven a la variable índice de combustibilidad de la cobertura vegetal
- Se debería implementar la metodología de Lógica Fuzzy en cualquier zona del Ecuador, para proyectos futuros corroborando a la eficiencia de los resultados.
- Es necesario realizar la validación de los resultados obtenidos, para aprobar el modelo de probabilidad de incendios forestales en la zona de estudio.

- Es importante recalcar que la desviación estándar y el mejor ajuste para este modelo es el realizado con las variables originales, pero para otros proyectos se debería realizar los estudios con otras medidas de dispersión ya que podrían variar los resultados en la zona de estudio.
- En análisis de redes es necesario trabajar con una escala mayor de la red vial, para optimizar los tiempos de atención por parte del Cuerpo de Bomberos.
- Se recomienda realizar las correcciones geométricas y radiométricas a las imágenes satelitales cuando se realiza análisis multitemporal.
- Se recomienda la implementación de otra estación de bomberos en la administración zonal de La Delicia, para que los incendios forestales que se puedan dar en esa zona sean atendidos con mayor eficacia y rapidez.
- Es importante trabajar con imágenes satelitales de alta resolución para obtener resultados más cercanos a la realidad.
- Es necesario realizar un análisis multitemporal en otros años que permitan obtener mayor cantidad de datos del comportamiento de recurrencia de incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, J. (2008). *bomberosbarbosa.es*. Recuperado el 13 de 05 de 2013, de <http://bomberosbarbosa.es.tl/Incendios-forestales.htm>
- Andocilla, L. (21 de Julio de 2012). Implementación del algoritmo de Lógica Fuzzy aplicado a la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos en el área Monjas–Ferroviaria–La Magdalena– Itchimbia del Distrito Metropolitano de Quito. *Tesis de Grado*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: ESPE.
- Andrade, A., & Navarrete, F. (2009). *Series de Manuales de Educación y Capacitación Ambiental*.
- Avilés, M., & Hermosa, L. (2009). Análisis y modelamiento de susceptibilidad a deslizamientos mediante SIG y geoestadísticas en las parroquias de Papallacta y Cuyuja, Cantón Quijos. *Tesis de Grado*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: ESPE.
- Barrientos, M. (2007). *Network Analyst: El Análisis de Redes desde ArcGIS 9.2*.
- Bernis, V., & Betancourt, F. (2006). Análisis multitemporal y generación del escenario prospectivo de cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en el Parque Nacional Llanganates. *Tesis de Grado*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: ESPE.
- Bonilla, R. (2001). *Guía Técnica en control y prevención de Incendios Forestales*. Guatemala.
- Bosque, J. (1992). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Rialp.
- Bosque, J. (2007). *Infraestructura de Datos Espaciales*. Madrid.

- Campos, C., Reyes, X., & Rodríguez, X. (2003). Desarrollo de una aplicación SIG orientada a la administración de riesgos volcánico y sísmico en el tramo de la carretera Papallacta- Lago Agrio, y por movimientos en masa en el tramo Papallacta – Baeza. *Tesis de Grado*. Sangolquí, Pichincha , Ecuador: ESPE.
- Carballas, T. (2004). *Los Incendios Forestales*.
- Carranza, D. (2008). Aplicación de la lógica difusa para la ubicación de especies faunísticas y florísticas, y su comparación con otros métodos geoestadísticos. *Tesis de Grado*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: ESPE.
- Centro Regional de Información sobre Desastres para América Latina y El Caribe, Conceptos Básicos*. (s.f.). Recuperado el 21 de marzo de 2013, de <http://www.cridlac.org>
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental, La observación de la Tierra desde el espacio*. Madrid: Ariel Ciencia.
- Chuvieco, E. (2008). *Satellite observation of biomass burning, en Earth observation of global change. The role of satellite remote sensing in monitoring the global environment*. Springer Science.
- Chuvieco, E., & Martín, M. (2004). *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. Madrid.
- Del Canto, C. (1998). *Los mapas temáticos*. Madrid.
- Díaz, A. (2004). *Manejo de cuencas y gestión del riesgo a desastres naturales, en el Área de la mancomunidad de los municipios del centro de Atlántida, Honduras*. Costa Rica.
- García, J., & Cebrián, F. (s.f.). *La interpolación como método de representación cartográfica para la distribución de la población: aplicación a la provincia de Albacete*.
- Gosswieler. (2002). *Lógica Difusa*.

Hemetsberger. (2002). *Lógica Difusa*.

Heredia, A., Martínez, S., & Quintero, E. P. (2003). Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la Cartografía de Áreas Quemadas con Imágenes Landsat Etm+. *Geofocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*.

Herrera. (2001). *Guía de Formación para Campos de Voluntariado*. Madrid.

IDEE. (2009). *Introducción a las Infraestructuras de Datos Espaciales IDE*.

Recuperado el 14 de marzo de 2013, de <http://www.idee.es>

IDEJAEN. (s.f.). *Open Geospatial Consortium*. Recuperado el 7 de abril de 2013, de <http://www.idejaen.es>

IGM. (2009). *Infraestructura de Datos Espaciales*. Recuperado el 7 de abril de 2013, de <http://www.igm.gob.ec>

IPGH. (2010). *Guía de Normas, ISO TC/211, Información Geográfica/Geomática*. México.

Korth, H. (1998). *Fundamentos de bases de datos*.

Manifestaciones del fuego. (s.f.). Recuperado el 15 de Marzo de 2013, de <http://www.bizkaia.net>

Marquéz, J. (2004). *Análisis de Redes*. Sevilla.

Menke. (1984). *Geophysical data analysis. Discrete inverse theory*. Academic Press.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, Riesgo. (s.f.). Recuperado el 26 de Mayo de 2013, de <http://www.snet.gob.sv>

Obermeyer, P. (1994). *Lo que aportan los SIG de diferente respecto a otro tipo de sistemas de información es su dependencia de la referencia espacial como también su organización y su capacidad de realizar análisis geográfico*.

Padilla, O. (2005). *Cartografía de áreas Quemadas a Escala Local*. España.

- Padilla, O. (2006). Fundamento teórico para la modelización de variables ambientales mediante operadores difusos. *Revista Geoespacial N°4*.
- Pérez, M. (2003). *Sistemas de lógica Difusa*.
- Ponce, C. (2010). *Análisis de Cambio de Cobertura Vegetal y Fragmentación en el Corredor de Conservación Comunitaria El Ángel - Bosque Golondrinas, Provincia del Carchi (1996 - 2005)*. Ecuador.
- Rivera, M. (2010). *Gestión de Riesgo en el deslizamiento de Nulti, Cantón Cuenca. Provincia del Azuay*. Ecuador.
- Rodríguez, N. (2009). *Rellenado de los gaps provocados por la falla del Scan Line Corrector en las imágenes satelitales Landsat 7 ETM+*. La Habana.
- SNGR. (2011). *Guía Para Implementar el Análisis de Vulnerabilidades a Nivel Cantonal*. Ecuador.
- Tarantola, V. (1982). *Inverse problems. quest for information. J. Geophys.*
- Ulloa, D. (2010). *Propuesta participativa para el manejo de quemas controladas, en la parroquia de La Concepción, cantón Mira*. Ecuador.
- Van Der Zee, J. (2005). *Guía práctica para la elaboración de ordenanzas para el manejo de zonas de riesgos en los municipios*. Suiza.